

ESTRATIGRAFÍA Y ESTRUCTURA DEL VOLCÁN DE COLIMA, MÉXICO

Sergio R. Rodríguez-Elizarrarás*

RESUMEN

El Volcán de Colima (103°37'W, 19°30'45"N) se ubica en el sector sudoccidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana, y con base en su historia eruptiva reciente, es considerado como el volcán más activo de México. De acuerdo con su estructura, se clasifica como un típico volcán compuesto o estratovolcán, característico de las márgenes continentales adyacentes a zonas de subducción.

En el presente estudio, se propone informalmente 11 unidades litoestratigráficas, las cuales resultaron de la actividad sucesiva de tres estratovolcanes: el Nevado de Colima, el Volcán de Colima ancestral y el Volcán de Colima actual. Esta secuencia descansa sobre un espesor considerable de rocas volcánicas del Terciario, así como sobre un basamento de rocas volcánicas y sedimentarias deformadas del Cretácico.

Las unidades litoestratigráficas propuestas, de la más antigua a la más reciente, son las siguientes: el grupo Nevado, el cual está conformado por la andesita La Calle, la formación Atenquique, la toba Los Mazos y la dacita Loma Alta. Estas unidades litoestratigráficas tienen un volumen aproximado de 560 km³ y se depositaron entre el Pleistoceno medio y el Pleistoceno tardío.

La andesita La Membrillera, la avalancha Los Lobos y la avalancha San Antonio yacen sobre el grupo Nevado. Estas tres unidades se derivaron del Volcán de Colima ancestral durante el período comprendido entre 10,000 y 4,000 años A.P., y constituyen un volumen de aproximadamente 13 km³.

Las unidades que se han derivado del actual Volcán de Colima abarcan aproximadamente los últimos 4,000 años de la historia eruptiva y son las siguientes: la andesita La Lumbre, el lahar Cofradía, la andesita El Playón y la grava Cordobán; éstas suman un volumen estimado de 6.85 km³.

Las fallas y fracturas, que aparentemente afectan al edificio volcánico del Volcán de Colima, tienen dos orientaciones predominantes, una de norte a sur que coincide con la alineación de la cadena volcánica Cántaro-Nevado-Colima-Hijos del Volcán; y otra, de noreste a sudoeste, que coincide con la alineación de los conos parásitos de Los Volcancitos.

Las composiciones química y petrográfica promedio de las rocas de los volcanes de Colima han sufrido pocos cambios. Predominan de una manera importante las rocas andesíticas de olivino y piroxenos. Sin embargo, es posible observar cambios evidentes en los límites de las unidades litoestratigráficas, especialmente en los contenidos de MgO, CaO, FeO* (como hierro total) y Al₂O₃.

Palabras clave: Estratigrafía, estructura, volcanología, Volcán de Colima, México.

ABSTRACT

The Volcán de Colima (103°37'W, 19°30'45"N) is in the southwestern part of the Trans-Mexican Neovolcanic Belt and, based on its recent eruptive history, it is regarded as the most active volcano of Mexico. According to its structure, it is classified as a typical composite volcano—stratovolcano—characteristic of continental margins adjacent to subduction zones.

In this study, 11 lithostratigraphic units are informally proposed, which resulted of the successive activity of three stratovolcanoes: the Nevado de Colima, the ancestral Volcán de Colima and the present Volcán de Colima. This sequence overlies Tertiary volcanic rocks of considerable thickness, as well as a Cretaceous basement of deformed volcanic and sedimentary rocks.

The proposed lithostratigraphic units, from the oldest to the most recent are the following: the Nevado group, which is constituted by the La Calle andesite, the Atenquique formation, the Los Mazos tuff, and the Loma Alta dacite. These units have an approximate volume of 560 km³ and were deposited between middle and late Pleistocene. The La Membrillera andesite, the Los Lobos avalanche and the San Antonio avalanche overlie the Nevado group; these three units were derived from the ancestral Volcán de Colima during the period between 10,000 and 4,000 years B.P., and have a volume of approximately 13 km³. The La Lumbre andesite, the Cofradía lahar, the El Playón andesite and the Cordobán gravel were derived from the present Volcán de Colima, covering approximately the last 4,000 years of eruptive history, and have an estimated volume of 6.85 km³.

The faults and fractures that apparently affect the Volcán de Colima have two main directions: N-S, coinciding with the Cántaro-Nevado-Colima-Hijos del Volcán volcanic chain lineament; and NE-SW that coincides with the Los Volcancitos parasitic-cone lineament.

The average chemical and petrographic composition of rocks from the Colima volcanoes show little variation, prevailing olivine and pyroxene andesite; nevertheless, it is possible to observe evident changes in the lithostratigraphic unit limits, specially in the contents of MgO, CaO, FeO* (as total iron) and Al₂O₃.

Key words: Stratigraphy, structure, volcanism, Volcán the Colima, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo pasado y principios de éste, varios natu-

ralistas y geólogos, como Mariano Bárcena, Ezequiel Ordóñez y Paul Waitz, entre otros, aportaron importantes avances en el conocimiento de algunos volcanes mexicanos.

El Volcán de Colima se considera actualmente el más activo de México y es, posiblemente, el que más interés ha despertado en la comunidad internacional de volcanólogos.

*Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F.

Esto se debe, sin lugar a dudas, a sus variadas y constantes manifestaciones, así como a su amplio registro histórico, que suma unos 400 años. Una parte muy importante de este archivo histórico es producto de las observaciones realizadas por los eminentes naturalistas Don José María Arreola y Don Severo Díaz, quienes estuvieron encargados de los observatorios volcánológicos que funcionaron en las ciudades de Zapotlán El Grande—hoy Ciudad Guzmán—y en Colima, durante el período de 1894 a 1914.

Sin embargo, salta a la vista que entre los múltiples artículos publicados e informes técnicos que han sido escritos sobre el Volcán de Colima, no existe hasta la fecha uno que trate sobre la geología y estratigrafía básicas. Estos aspectos deben de considerarse fundamentales para el desarrollo de modelos evolutivos de cualquier aparato volcánico, así como información primordial para la elaboración de mapas, que permitan conocer la probable distribución de los productos generados por los distintos tipos de actividad volcánica; es decir, mapas de riesgo volcánico. Con el objetivo de llenar este vacío tan importante, se decidió el levantamiento de un mapa geológico a semidetalle, utilizando unidades litoestratigráficas. Los primeros resultados de ese estudio son presentados en esta publicación.

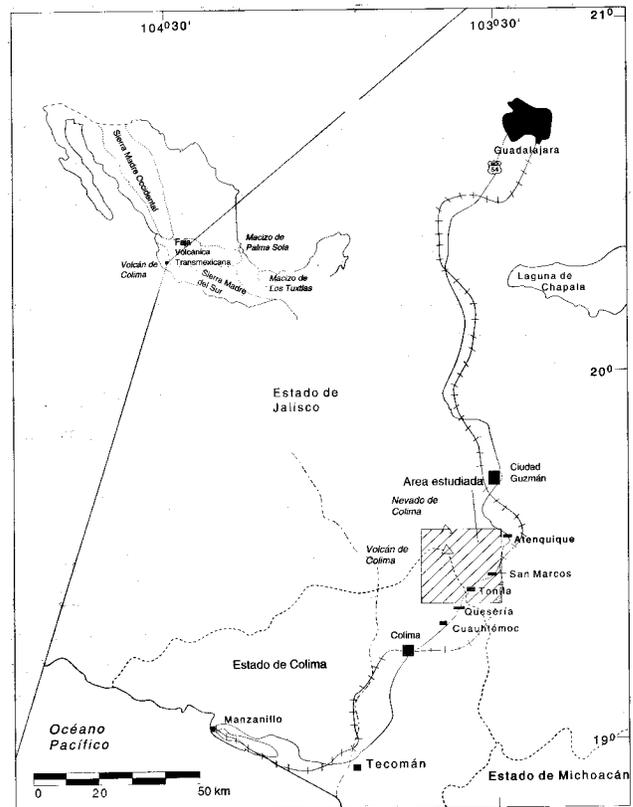
LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio abarca una superficie de aproximadamente 500 km², entre las coordenadas 103°28' - 103°43' W y 19°23' - 19°35' N, ubicándose, en su mayoría, en el extremo meridional del Estado de Jalisco y, en menor proporción, en el de Colima en su sector septentrional (Figura 1). El Volcán de Colima—103°37' W - 19°30' 45" N—ocupa la parte central del área de estudio, con una altitud de 3,850 m s.n.m.m., y constituye el rasgo más meridional de una cadena volcánica con alineación N - S, conformada por el volcán El Cántaro, en el norte; el Nevado de Colima, en la parte central; y el Volcán de Colima, en el sur.

La carretera federal 54, que une las ciudades de Guadalajara, Colima y Manzanillo, es la vía de comunicación más importante, que actualmente se está ampliando a cuatro carriles. Asimismo, el área cuenta con una vía de ferrocarril que une las ciudades ya mencionadas con estaciones en Ciudad Guzmán y Colima, principalmente.

La carretera estatal 25, totalmente asfaltada, comunica los poblados de Quesería, San Antonio, Comala y Colima.

Las vías de acceso a las partes más próximas al Volcán de Colima son principalmente caminos madereros los cuales, durante la estación de lluvias, suelen quedar total o parcialmente intransitables y, por este motivo, gran parte de ellos está abandonada. El más importante de estos caminos de terracería se desvía de la carretera federal 54, aproximadamente 2 km al sur del poblado de Atenquique, y termina a la altura de 3,200 m s.n.m.m., en el lugar conocido como El Playón, entre la pared de la antigua caldera y el flanco septentrional del volcán.



Dibujo en computadora por Gabriela Pantoja-Irby y José de Jesús Vega-Carrillo

Figura 1.- Mapa de localización del área de estudio.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE TRABAJO

En este estudio, se buscó los objetivos siguientes:

- La elaboración de un mapa geológico a la escala de 1:50,000, que abarca una superficie aproximada de 500 km², el cual cubre a semidetalle las zonas central y meridional del Volcán de Colima y, en forma generalizada, la parte meridional del Nevado de Colima.
- El establecimiento de la secuencia estratigráfica utilizando unidades litoestratigráficas informales, con base en el principio de la superposición.
- La descripción de los principales rasgos estructurales del Volcán de Colima y su asociación con la actividad volcánica.
- La interpretación, con base en la secuencia estratigráfica, de los análisis químicos realizados en el presente estudio, así como aquéllos publicados con anterioridad, tanto químicos como radiométricos, en lavas y unidades piroclásticas.

El mapa base inicial a la escala de 1:25,000 se obtuvo a partir de la amplificación de las cartas topográficas, de escala 1:50,000, Venustiano Carranza (CETENAL, 1982), Ciudad Guzmán (INEGI, 1987), Comala (INEGI, 1988) y Cuahtémoc (DETENAL, 1988), cuyas partes cubren el área de estudio. Mediante la interpretación de las fotografías aéreas, se integró un mapa fotogeológico preliminar, que sirvió de base para el trabajo de campo, que tuvo una duración total de seis meses.

En la última etapa del estudio, desarrollada en el gabinete y el laboratorio, fueron ordenados e interpretados los datos obtenidos en el campo, preparadas las muestras para su estudio petrográfico—láminas delgadas de roca—y geoquímico—análisis por fluorescencia de rayos X y absorción atómica. Los análisis fueron realizados por José Luis Macías, durante su permanencia en la Universidad de Florencia, Italia; y por el Dr. Steve Nelson, de la Universidad de Tulane en Nueva Orleans. Otros fueron tomados de artículos publicados con anterioridad.

El mapa geológico final se elaboró mediante la integración de los datos de campo y la interpretación fotogeológica. Por último, se procedió a la construcción de las secciones estructurales y la columna estratigráfica generalizada propuesta para el Volcán de Colima.

TRABAJOS PREVIOS

La bibliografía existente sobre el Volcán de Colima se considera como una de las más amplias y actualizadas, en comparación con la de otros volcanes mexicanos de sus mismas características. No obstante, es necesario mencionar que se carece, en gran medida, de datos fidedignos y científicamente documentados acerca de las erupciones registradas con anterioridad al año de 1869, cuando cambió radicalmente la topografía del volcán, al crecer dos conos adventicios en el flanco nororiental, conocidos como Los Volcancitos. Al respecto, Waitz (1932) señaló:

Algo más se sabe, naturalmente, de las erupciones que se verificaron después de la conquista... casi siempre se restringen las noticias sobre estos fenómenos, en primer lugar sólo a verdaderas catástrofes, y en segundo lugar, a la fecha del acontecimiento y a los destrozos causados por ellas, y si alguna que otra vez el cronista nos da mayores detalles de los sucesos, los ve con ojos de testigos aterrorizados y los describe a manera del hombre poco erudito en la materia, de tal modo, que no podemos tener fe en sus relatos, que no sirven para darnos cuenta ni del verdadero tamaño y carácter de los fenómenos ni de su sucesión.

Por consiguiente, en este apartado sólo se mencionará las publicaciones de carácter científico más importantes, que han aparecido desde mediados del siglo pasado hasta nuestros días.

Sartorius (1871) hace una breve descripción de la erupción ocurrida en 1869, durante la cual surgieron los conos parásitos conocidos como Los Volcancitos. Esta publicación no deja de tener algunas inexactitudes muy propias de la época, como son la ubicación del volcán y su altura.

Posteriormente, Bárcena (1887) hace una síntesis de los conocimientos más importantes acumulados hasta esa fecha, así como de las observaciones que él mismo hizo durante sus trabajos de campo. Ordóñez (1897) describe los rasgos más importantes que observó durante una ascensión realizada al Volcán de Colima desde la Hacienda de Quesería. En este

estudio, el autor se refiere a los volcanes de Colima, como una larga cadena de montañas, dependiente del sistema de la Sierra Madre Occidental, dato sin lugar a duda incorrecto.

A partir de las observaciones realizadas desde el seminario de Zapotlán El Grande—hoy Ciudad Guzmán—, Arreola (1903) da una descripción de la actividad eruptiva desarrollada durante los meses de febrero y marzo del mismo año. Si bien la información consignada por el autor reviste un carácter de mucha importancia, en sus conclusiones infiere de manera errónea que el Volcán de Colima nunca ha arrojado lava.

La mayor parte de los datos recabados en los observatorios de Zapotlán y Colima, que funcionaron durante el período de 1894 a 1914, quedaron registrados en informes técnicos y efemérides—en su mayoría inéditos—escritos por sus encargados, Don José María Arreola (1915) y Don Severo Díaz (1903, 1906).

Durante la Décima Sesión del Congreso Geológico Internacional, celebrada en México en 1906, Waitz (1906) fue el encargado de conducir la excursión geológica al Volcán de Colima y presentó un mapa topográfico a la escala de 1:50,000, que muestra algunos de los derrames de lava más importantes. Posteriormente, describió las *nubes ardientes* arrojadas por el volcán durante la erupción paroxísmica de enero de 1913 (Waitz, 1915, 1921), y en 1932 hizo una recopilación de los datos históricos y bibliográficos acerca de este volcán, en la cual describe de una manera por demás interesante, tanto sus propias experiencias, como las de otros investigadores y testigos presenciales de erupciones pasadas (Waitz, 1932).

Probablemente, el único levantamiento de triangulación geodésica en el Volcán de Colima publicado hasta la fecha, es el realizado por Ortiz (1944), donde además se incluye un mapa topográfico de buena calidad, si se toma en consideración las limitaciones de la época y lo accidentado del terreno.

Mooser (1961) describió sus observaciones de la expedición al Volcán de Colima que se llevó a cabo en 1958, año en que el volcán volvió a mostrar signos de actividad, después de aproximadamente 40 años de reposo. El autor incluye, además, un pequeño croquis con la distribución de algunos derrames de lava y *nubes ardientes*, así como una breve descripción de la historia geológica y las estructuras más importantes de los volcanes de Colima.

Constantino-Herrera (1966) desarrolló su tesis de licenciatura sobre los volcanes de Colima, tratando aspectos generales de varios de los conos cineríticos y describiendo una ascensión a la zona del cráter del Volcán de Colima, donde midió temperaturas de entre 200 y 300°C, estando imposibilitado para tomar muestras representativas de los gases, debido a la baja concentración de éstos.

Un análisis estadístico de las erupciones históricas del Volcán de Colima fue realizado por Medina-Martínez (1983), donde se ofrece una tabla con la ocurrencia de las principales erupciones volcánicas dentro de los últimos 400 años.

Si bien sus trabajos nunca fueron publicados en revista especializada alguna, Sobota (1986) proporcionó algunos da-

tos interesantes sobre la actividad del Volcán de Colima, durante el período comprendido entre los años de 1894 a 1966, recopilados en una pequeña edición tardía del Gobierno del Estado de Jalisco.

Thorpe y colaboradores (1977) hicieron referencia a la actividad efusiva de enero de 1976, durante la cual el volcán arrojó un volumen considerable de lava de composición andesítica, siendo los autores testigos presenciales del evento.

En un estudio regional del sector occidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana, Demant (1979) describió algunos aspectos de los volcanes de Colima, e hizo una interpretación volcanológica y petrogenética que incluye un mapa geológico generalizado a una escala aproximada de 1:200,000.

Entre los artículos que han aportado una cantidad importante de información geoquímica y petrológica, destacan los de Luhr y Carmichael (1980, 1981, 1982), los que basados fundamentalmente en análisis geoquímicos de los diferentes derrames de lava y productos piroclásticos de caída, ofrecieron un panorama muy completo acerca de lo que ellos llaman el complejo volcánico de Colima y su evolución petrogenética. En estos estudios, se incluye algunas columnas estratigráficas compuestas, con los primeros fechamientos por el método de ^{14}C , hechos en muestras de materia vegetal carbonizada incluida en unidades piroclásticas.

Después de la erupción del volcán St. Helens, en los Estados Unidos de América en mayo de 1980, muchos de los conceptos de la volcanología cambiaron, especialmente aquellos que se refieren a la interpretación del origen de algunos derrames piroclásticos y la formación de calderas de avalancha (Siebert, 1984), como la que caracteriza al Volcán de Colima. Luhr y Prestegard (1985) presentaron una comparación entre el evento del volcán St. Helens y el que probablemente ocurrió en el Volcán de Colima hace 4,300 años A.P. Posteriormente, Robin y colaboradores (1987) dieron a conocer una reseña de la historia eruptiva de los volcanes de Colima, comparando igualmente el origen de la formación de sus calderas con un evento del tipo del St. Helens; estos autores dan una fecha para la formación de la del Volcán de Colima de 10,000 años A.P., e incluye un mapa geológico generalizado del área a escala aproximada de 1:250,000.

Martin del Pozzo y colaboradores (1987) se refieren a la distribución de derrames piroclásticos en el área de La Yerbabuena, los cuales, según estos autores, pertenecen al Volcán de Colima y "representan una acumulación de flujos piroclásticos y lahares que han sido retrabajados en algunos puntos por las crecidas durante la temporada de lluvias"; además, presentan un mapa geológico del Volcán de Colima a una escala aproximada de 1:150,000.

Luhr y Prestegard (1988) presentaron una compilación de sus interpretaciones acerca del origen de la caldera del Volcán de Colima, dando la fecha ya mencionada en el artículo anteriormente citado, incluyendo un mapa geológico a la escala de 1:400,000 y un cálculo aproximado del volumen total de los depósitos producidos.

Capaccioni y Rodríguez-Elizarrarás (1989) realizaron muestreos de gases en la zona del cráter.

Luhr y Carmichael (1990a) dividieron los 400 años de registro histórico de erupciones del Volcán de Colima en cuatro ciclos de 50 o más años de duración, postulando que cada uno de éstos ha terminado con una potente erupción del tipo de la del Mt. Pelé. Sus datos están centrados principalmente en los productos del tercero y cuarto ciclos del Volcán de Colima, los cuales culminaron con una erupción muy explosiva en 1818 y 1913, respectivamente. Estos autores concluyen que el cuarto ciclo está próximo a finalizar.

Robin y colaboradores (1990) hacen una interpretación de la evolución petrológica del Nevado y Volcán de Colima, su relación con la formación de las calderas de avalancha que caracterizan a ambos volcanes, y el riesgo volcánico que actualmente representa el Volcán de Colima.

Luhr y Carmichael (1990b) ofrecen sus ya clásicas apreciaciones acerca de la evolución del complejo volcánico de Colima, y presentan un mapa geológico de escala 1:100,000, así como una sección estructural del área.

Rodríguez-Elizarrarás (1991) realizó un levantamiento geológico a semidetalle, como parte de su tesis de maestría.

Mediante el uso de técnicas de teledetección, Abrams y colaboradores (1991) resaltan la importancia del monitoreo de temperaturas en volcanes activos, usando dos imágenes Landsat del Volcán de Colima; presentan, además, un mapa geológico simplificado, el cual incluye al Nevado de Colima y al Volcán de Fuego.

Robin y colaboradores (1991) argumentan acerca de los ciclos magmáticos y eruptivos del Volcán de Fuego; para estos autores, un ciclo eruptivo comienza con un evento explosivo violento de corta duración y continúa con un largo período efusivo. A raíz del último evento eruptivo de 1991, Rodríguez-Elizarrarás y colaboradores (1991) presentan sus observaciones de campo y algunos resultados de laboratorio, sobre los depósitos de bloques y ceniza emplazados el 16 y 17 de abril, e incluyen un mapa de su distribución.

Stoops y Sheridan (1990) proponen la existencia de cuando menos dos grandes depósitos de avalancha, asociados con el complejo volcánico de Colima; incluyen un mapa que muestra la distribución de estos depósitos, donde se observa una avalancha derivada del Nevado de Colima, que alcanzó la línea de costa del Océano Pacífico, encañalada en los ríos El Naranjo y Salado. La edad que asignan a esta unidad, con base en un fechamiento de ^{14}C , es de $18,520 \pm 260$ años A.P.

FISIOGRAFÍA

Fisiográficamente, la zona de los volcanes de Colima pertenece al sector occidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana. El complejo volcánico de Colima está constituido por una cordillera de orientación norte-sur, cuyos centros eruptivos principales son el volcán El Cántaro, en su porción septentrional, con una altitud de aproximadamente 3,000 m

s.n.m.m.; el Nevado de Colima, en la parte central, con una altitud máxima de 4,300 m s.n.m.m.; y en su extremo meridional, el Volcán de Colima o Volcán de Fuego, con una altitud de 3,850 m s.n.m.m. (Figura 2).

En el área del presente estudio, la disección fluvial se manifiesta por la presencia de barrancas muy profundas, que generalmente nacen en las partes más elevadas y configuran un patrón radial característico en torno al Volcán de Colima. Entre las más espectaculares están las barrancas Atenquique, El Limón y El Durazno, ubicadas al oriente y sudoriente; del Muerto, Playa de Montegrando y San Antonio, al sur; y La Lumbre, al sudponiente (Lámina 1).

En el flanco oriental del Volcán de Colima, la mayoría de las corrientes fluviales forma parte de la cuenca hidrográfica del río Tuxpan o Naranjos (Figura 2), que sigue su curso hacia el sur hasta desembocar en el Océano Pacífico. En la parte occidental, se localiza la cuenca hidrográfica del río Armería, el cual a su vez desemboca también en el Océano Pacífico. Estos dos ríos constituyen los rasgos hidrográficos más importantes del área.

La morfología de las zonas más próximas al volcán se caracteriza por ser sumamente abrupta, cambiando gradualmente hacia las partes intermedias, aunque sin dejar de presentar un terreno muy accidentado. Una particularidad que se manifiesta, especialmente en la parte sudoccidental del área estudiada, es la existencia de pilones aislados, de alturas que

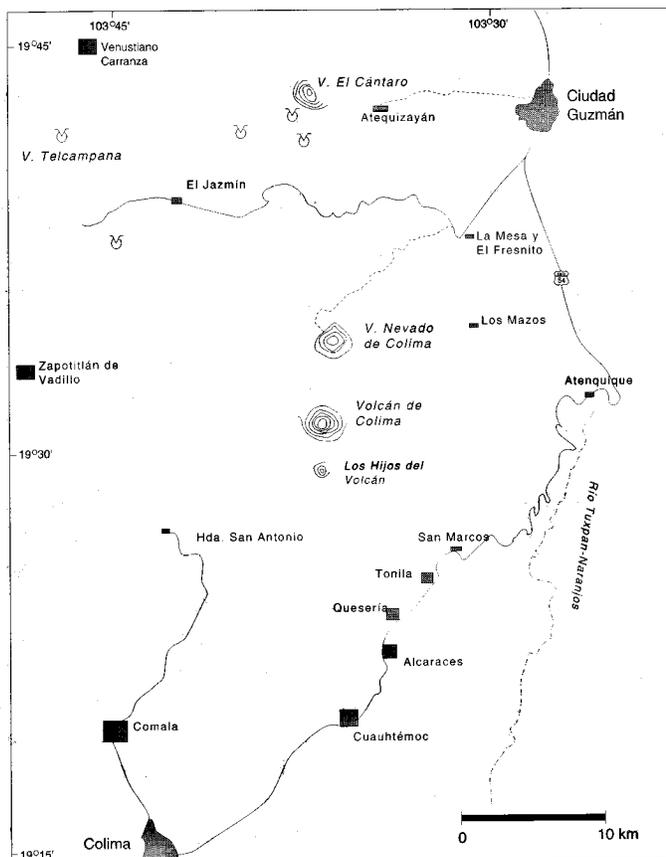


Figura 2.- Principales centros eruptivos del complejo volcánico de Colima.

varían entre 25 y 100 m, conocidos en la literatura en inglés como *hummocks* (Ui, 1983; Voight *et al.*, 1981).

Las zonas más distantes del volcán están conformadas por una topografía ondulada y de pendiente suave, que caracteriza en gran medida a una gran extensión del valle de Colima.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La región en que se ubica el Volcán de Colima pertenece al sector sudoccidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana. Ésta constituye una de las regiones más activas del territorio mexicano, cuyo marco tectónico, de acuerdo con Drummond (1981), está integrado por la Trinchera Mesoamericana, la Dorsal del Pacífico Oriental, la Placa de América del Norte, la Placa de Cocos y la Falla Rivera (Figura 3). Esta última falla, a la vez, delimita una placa pequeña conocida en la literatura como Placa Rivera, misma que Demant (1979) consideró como la responsable del volcanismo en el sector occidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana.

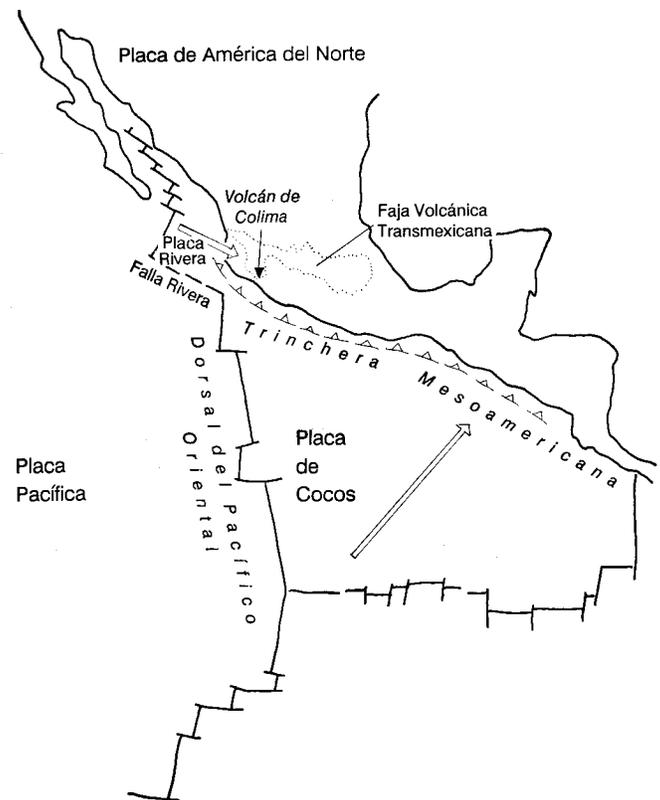
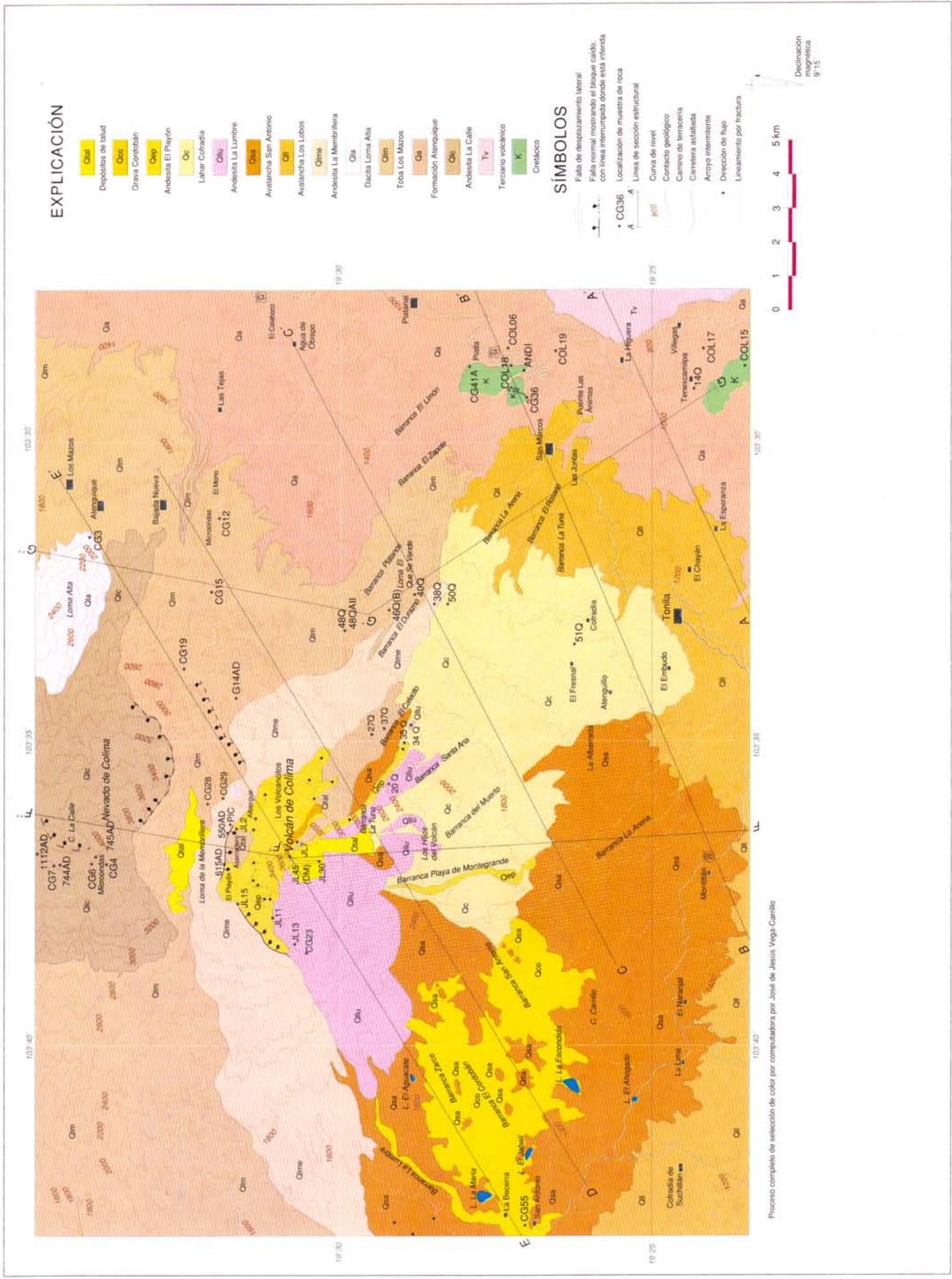


Figura 3.- Marco tectónico del área de estudio.

Esta región fue y es actualmente objeto de múltiples estudios, que abarcan tanto su geología, interpretación tectónica y datos geofísicos a nivel regional (Demant, 1978, 1979; Luhr *et al.*, 1985; Johnson, 1987; Skidmore, 1988; Serpa *et al.*, 1990; de la Fuente *et al.*, 1990), como su geología, estratigrafía y geoquímica a escalas más locales (Luhr y Carmichael, 1981; Allan y Carmichael, 1984; Allan, 1986).



MAPA GEOLÓGICO DEL VOLCÁN DE COLIMA

El Volcán de Colima constituye la estructura más meridional de una cadena volcánica orientada norte-sur (Cántaro-Nevaldo-Colima). Esta cadena, a su vez, está ubicada en la parte centromeridional de una depresión, orientada igualmente norte-sur, de unos 90 km de longitud y de unos 40 km de anchura, cuyo límite occidental es el río Armería, y oriental el río Tuxpan. Esta depresión fue considerada por algunos autores como una fosa tectónica, comúnmente conocida en la literatura como *graben* de Colima (Demant, 1979; Luhr y Carmichael, 1980; Allan y Carmichael, 1984; Allan, 1986), cuyas características, según estos autores, son las de una zona típica de tensión cortical en el continente, la cual es el resultado de la interacción entre las placas de Cocos, Rivera, Pacífico y América del Norte.

El marco geológico regional que domina este sector de la Faja Neovolcánica Transmexicana, de acuerdo con las cartas geológicas Colima (DGG, 1982) y Guadalajara (DGGTN, 1981), lo integra un conjunto de sierras con orientación aproximada de N-S, formadas, en su mayoría, por rocas sedimentarias marinas del Cretácico, intensamente plegadas y modificadas por fallas, de las cuales la sierra de Manantlán, al occidente del Volcán de Colima, constituye uno de los rasgos más sobresalientes.

Las rocas marinas del Cretácico tienen una distribución amplia; existen desde los alrededores de los poblados de Tamazula y Zapotiltic, en el Estado de Jalisco, hasta una vasta región al sur de la ciudad de Colima (Figura 4) a lo largo del curso del río Armería, cerca de su desembocadura al mar, hasta

las proximidades de la población de Tecomán, en la parte meridional del Estado de Colima.

La secuencia de rocas marinas cretácicas sufre la intrusión de grandes cuerpos batolíticos de composición granítica y granodiorítica, de edad igualmente cretácica. La distribución más amplia de estos cuerpos se concentra hacia el poniente del Volcán de Colima, en una región que se extiende hasta Puerto Vallarta, Jalisco. Hacia el oriente, otro gran batolito, de unos 2,500 km² de superficie, se extiende entre Tamazula, Jalisco, en el norponiente, y Tepalcatepec, Michoacán, en el sudoriente.

Con base en los datos obtenidos en un gran número de estaciones gravimétricas, recientemente algunos autores (Serpa *et al.*, 1990; de la Fuente *et al.*, 1990) cuestionaron la existencia del llamado *graben* de Colima, basándose en la escasa definición gravimétrica obtenida para la zona del Volcán de Colima y las prácticamente inexistentes anomalías gravimétricas hacia el sur del volcán.

Los afloramientos de rocas del Terciario inferior están constituidos por derrames de basalto y andesita. Éstos son escasos, debido probablemente a una intensa erosión que hizo desaparecer a estas rocas, especialmente en la zona de los volcanes de Colima, y dejó al descubierto las rocas cretácicas marinas con intrusión. Sin embargo, en los alrededores del poblado de Atenquique, es posible observar espesores grandes de roca ignimbrítica bien consolidada, con una textura eutaxítica típica, los cuales quedan expuestos a lo largo del curso del río Tuxpan. En el presente estudio, estas rocas han sido consideradas como parte del Terciario superior y, conjuntamente con los basaltos y andesitas ya mencionados, constituyeron posteriormente el basamento de las potentes secuencias de rocas volcánicas pliocénico-pleistocénicas, las cuales, con una secuencia de sedimentos lacustres de gran espesor, rellenan la zona septentrional interna de la depresión anteriormente descrita, cuya distribución se limita hacia el norte de los volcanes de Colima.

ESTRATIGRAFÍA

La secuencia estratigráfica de la región estudiada tiene un alcance desde el Pleistoceno medio hasta el Holoceno, y descansa discordantemente sobre un basamento formado por rocas cretácicas y terciarias.

Los contactos de la mayoría de las unidades litoestratigráficas aquí propuestas coinciden con rasgos topográficos muy notables, como son las grandes barrancas o paredes verticales, y solamente en muy pocos casos es posible observar claramente las relaciones de contacto en afloramientos. Por consiguiente, la designación de secciones tipo es una tarea sumamente difícil. Es por ello que las descripciones de las unidades litoestratigráficas aquí presentadas no cumplen con todos los requisitos del Código de Nomenclatura Estratigráfica (Comisión Norteamericana de Nomenclatura Estratigráfica, 1984), necesarios para definiciones formales.

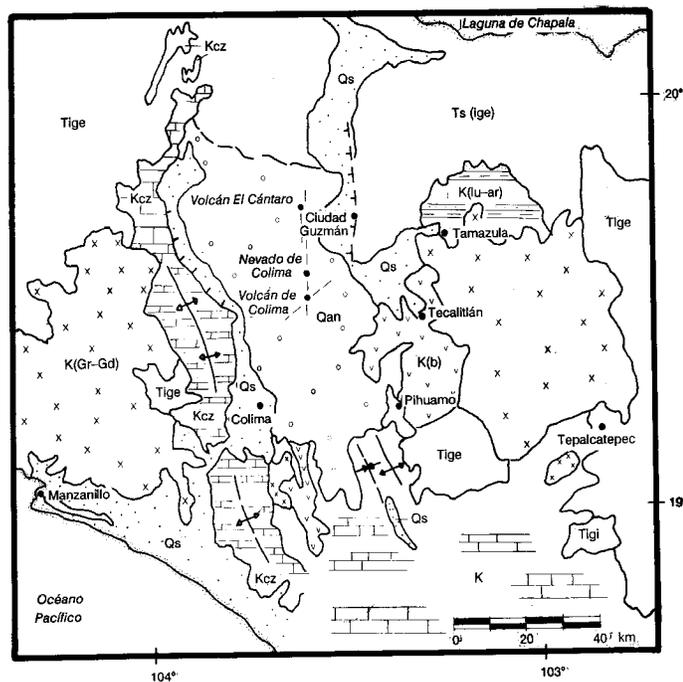


Figura 4.- Mapa geológico generalizado de la región de Colima y sur del Estado de Jalisco. K, Cretácico; T, Terciario; Q, Cuaternario; cz - lu - ar, calizas, lutitas y areniscas; Gv - Gd, intrusivos graníticos y granodioríticos; mz - b - an, monzonita, basalto y andesita; ige, ígneo extrusivo; igi, ígneo intrusivo; S, costero y lacustre. DGGTN (1981) modificado.

En este estudio, se propone informalmente 11 unidades litoestratigráficas (Figura 5), cuyos contactos están en gran medida delimitados por discordancias que, en los afloramientos, están presentes generalmente con una inclinación leve. El contacto, sin embargo, con el basamento anterior a los volcanes de Colima, corresponde a una discordancia bastante pronunciada.

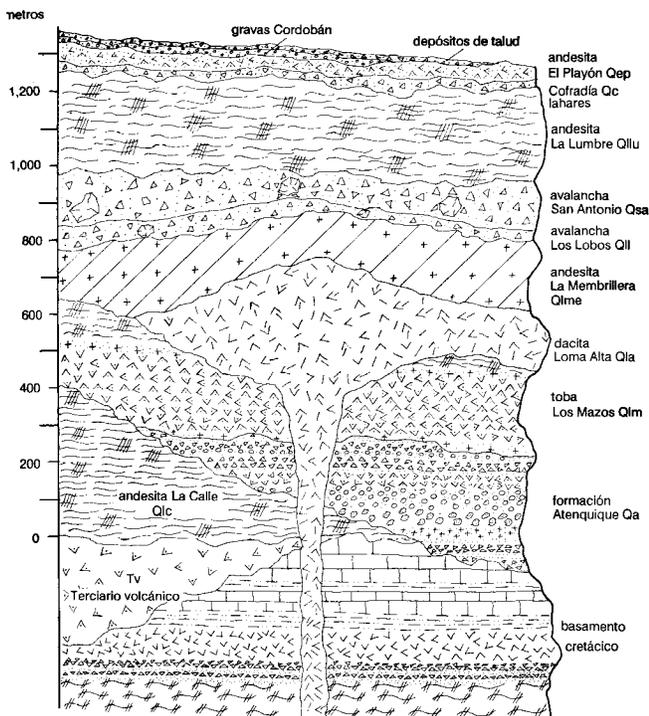


Figura 5.- Columna estratigráfica esquematizada del Volcán de Colima.

Las unidades litoestratigráficas propuestas, de la más antigua a la más reciente, son las siguientes: el grupo Nevado, el cual está conformado por la andesita La Calle (Qlc), la formación Atenquique (Qa), la toba Los Mazos (Qlm) y la dacita Loma Alta (Qla); estas unidades constituyen el macizo mismo del Nevado de Colima. La andesita La Membrillera (Qlme), la avalancha Los Lobos (Qll) y la avalancha San Antonio (Qsa) yacen sobre el grupo Nevado. Estas unidades fueron derivadas de un Volcán de Colima antiguo o *Paleofuego* (Robin *et al.*, 1987), y su expresión morfológica proporciona a su área de afloramiento rasgos tan sobresalientes como la loma de La Membrillera, al norte del Volcán de Colima, o los pilones y grandes colinas que sobresalen en la región de las haciendas San Antonio y Jabalí, así como en los poblados La Becerra y La Yerbabuena. Las unidades litoestratigráficas que constituyen la estructura de lo que actualmente se conoce como el Volcán de Colima o Volcán de Fuego son: la andesita La Lumbre (Qllu), el lahar Cofradía (Qc), la andesita El Playón (Qep) y la grava Cordobán (Qco). El lahar Cofradía y la grava Cordobán incluyen un material muy reciente, fundamentalmente epiclástico, derivado del Volcán de Colima, el cual está muy relacionado con la actividad de éste.

BASAMENTO ANTERIOR A LOS VOLCANES DE COLIMA

El basamento que sostiene a toda la secuencia volcánica producida por el complejo de los volcanes de Colima, está integrado por rocas volcánicas, volcanosedimentarias y sedimentarias marinas, relacionadas con procesos de arco magmático insular (Pantoja-Alor y Estrada-Barraza, 1986). La edad de esas rocas se sitúa entre el Neocomiano y el Albiano temprano (Alencáster y Pantoja-Alor, 1986), aunque bien pudiera extenderse hasta el Jurásico Tardío. De acuerdo con las relaciones estratigráficas observadas en el campo, las rocas más antiguas corresponden a una brecha volcánica bien consolidada, cuyos clastos están compuestos por material lítico anguloso de composición dacítica, con una matriz de cuarzo microcristalino. Los principales afloramientos de las rocas basales están constituidos por lavas andesíticas masivas intensamente zeolitizadas y cortadas por diques de composición similar (Tablas 1 y 2), y se distribuyen al oriente y sudoriente del Volcán de Colima. Tanto la andesita zeolitizada como la brecha dacítica, afloran dentro del área comprendida entre las barrancas El Durazno-Beltrán y El Limón (Lámina 1), cerca de la carretera federal 54, donde se aprecia claramente la discordancia entre el basamento y los depósitos epiclásticos del grupo Nevado.

Tabla 1.- Análisis de roca entera de muestras del basamento cretácico.

MUESTRA	AND1	COL15	COL18
SiO ₂	55.36	58.99	63.39
TiO ₂	1.70	1.17	0.73
Al ₂ O ₃	16.98	15.11	16.19
FeO*	9.23	7.89	4.73
MnO	0.12	0.09	0.73
MgO	5.30	4.46	2.60
CaO	5.68	5.64	4.50
Na ₂ O	4.43	4.82	4.15
K ₂ O	0.82	1.56	2.73
P ₂ O ₅	0.39	0.28	0.27
H ₂ O ⁺	nd	nd	nd
H ₂ O ⁻	nd	nd	nd
Total	100.01	100.01	100.02

FeO*: Fe total; nd: no determinado.

AND1: andesita masiva; COL15: dique; COL18: dique.

Análisis: J.L. Macías, Universidad de Florencia, Italia.

Método: Fluorescencia de rayos X (FRX).

Otro afloramiento importante de rocas anteriores a los volcanes de Colima se localiza cerca del poblado de Tenexamilpa, aproximadamente 5 km al sur de San Marcos (Lámina 1). Ahí aflora una secuencia de rocas carbonatadas que incluye mármol producido por metamorfismo de contacto de las cali-

Tabla 2.- Análisis modales de muestras del basamento cretácico, de la andesita La Calle y de la formación Atenquique.

Unidad litoestratigráfica	Muestra	PI	OI	Cpx	Opx	Anf	Ox. Fe-Ti	Matriz	Observaciones
Formación Atenquique	14Q	10	2	1	1	<<1	5	80	Andesita de olivino. Textura porfídica con abundancia de fenocristales de plagioclasa. Matriz microlítica principalmente de PI y óxidos de hierro.
	19COL	15	3	2	1	<1	5	73	Andesita de olivino. Textura porfídica seriada; abundancia de fenocristales de plagioclasa y olivino. Matriz microlítica de PI, Px, óxido de hierro y vidrio.
Andesita La Calle	CG6	20	1	1	1	1	5	71	Andesita de piroxeno. Textura porfídica con un alto porcentaje de cristales de ferromagnesianos reemplazados por óxidos de hierro. Matriz microlítica de PI y óxidos de hierro.
	CG4	15	2	5	1	<1	2	74	Andesita de clinopiroxeno. Textura porfídica con abundancia de fenocristales de PI, Cpx y Opx. Matriz microlítica de PI, óxidos de hierro y poco vidrio.
	745AD	31	1	6	2	<1	2	58	
	1112AD	20	<1	4	<1	-	<1	-	
	744AD	29	1	10	1	<1	1	57	
Basamento cretácico	AND1	50	-	-	-	-	-	50	Andesita masiva alterada. Textura afanítica. La mayoría de la PI se encuentra alterada a zeolita.
	CG36	10	-	-	-	-	-	70	Brecha dacítica. Textura clástica, al menos un 20% de la muestra está constituido por fragmentos angulosos de líticos sericitizados. La matriz es de cuarzo microcristalino con límites difusos.

zas cretácicas, con diques andesíticos similares a los de la barranca El Durazno-Beltrán.

Si bien dentro del área de estudio no hay afloramientos de rocas volcánicas del Terciario, éstas están constituidas por derrames de basalto y andesita, y por derrames piroclásticos—ignimbrita—de composición riódacítica. En los alrededores del poblado de Atenquique, es posible observar una roca ignimbrita de textura eutaxítica, cuyos afloramientos mejores quedan expuestos a lo largo del curso del río Tuxpan. Esta ignimbrita se considera dentro del paquete de rocas volcánicas del Terciario.

GRUPO NEVADO

Se propone el nombre informal de grupo Nevado para el conjunto de unidades litoestratigráficas de composición predominantemente andesítica, formadas por derrames de lava y material piroclástico, originados por diversas emisiones del volcán Nevado de Colima y que constituyen la estructura principal de este macizo volcánico. Las unidades litoestratigráficas que integran este grupo, desde la más antigua hasta la más reciente, son las siguientes: andesita La Calle, formación Atenquique, toba Los Mazos y dacita Loma Alta.

Estas unidades están distribuidas en una superficie de aproximadamente 150 km², que abarca casi la tercera parte del mapa geológico (Lámina 1), aunque su distribución total, fuera de los límites del área de estudio, alcanza una superficie de aproximadamente 400 km².

Considerando el área total de distribución y asumiendo un espesor promedio de 1,400 m, el volumen estimado para las rocas que constituyen el grupo Nevado es de 560 km³.

Este grupo se acumuló durante el intervalo transcurrido entre el Pleistoceno medio—0.75 Ma—y el Pleistoceno tardío—0.01 Ma—de acuerdo con los fechamientos por el méto-

do de K/Ar consignados por Allan y Luhr (1982), Allan (1986), Robin y colaboradores (1987) y Stoops y Sheridan (1990).

El límite inferior del grupo Nevado es un contacto discordante con el basamento anterior a los volcanes de Colima, el cual aflora en los dos sitios antes mencionados, dentro del área del presente estudio. Se infiere que su contacto superior también sea una discordancia con las lavas de la andesita La Membrillera. En otras áreas, el grupo Nevado está cubierto por material lítico y pumítico transportado, que no fue incluido en alguna unidad litoestratigráfica.

La unidad inferior del grupo Nevado—andesita La Calle—podría correlacionarse con las últimas emisiones del volcán El Cántaro (Luhr y Carmichael, 1980), ubicado al norte del área.

Andesita La Calle

Los potentes derrames de lava formados por la andesita de clinopiroxenos que afloran en el cerro La Calle (4,000 m s.n.m.), el cual es uno de los rasgos más prominentes de la parte central del Nevado de Colima, junto con los cerros El Picacho (4,200 m s.n.m.), constituyen las rocas más antiguas del macizo volcánico y en este estudio se les denomina como andesita La Calle.

El cerro La Calle se ubica aproximadamente a 500 m al norte de la estación de microondas del Nevado, a la cual se llega por un camino de terracería que sube por el flanco nororiental del volcán. Esta prominencia topográfica constituye la localidad más típica de la andesita La Calle y, en estudios anteriores (Mooser, 1961; Robin *et al.*, 1987), ha sido considerada como el remanente de una posible caldera, debido a su forma claramente semicircular.

Su superficie de afloramiento dentro del área de estudio es de aproximadamente 20 km² y se presenta como un terreno

rocoso y abrupto, con bastante vegetación arbórea—aunque excesivamente talada. En los puertos topográficos y partes más bajas, está cubierta parcialmente por tefra, formada por capas de pómez y material lítico de espesor variable, provenientes de las erupciones más recientes del Volcán de Colima, cuya distribución podrá conocerse con trabajos cartográficos más detallados que los desarrollados para el presente estudio.

El espesor promedio que se estima para esta formación es de unos 500 m; se acuña hacia el oriente y sudoriente del Nevado de Colima, donde queda cubierta, aparentemente en forma concordante, por los depósitos piroclásticos y epiclásticos de las formaciones Atenquique y Los Mazos (Lámina 2, sección E-E').

Dentro del área de estudio, no fue posible observar el contacto entre el basamento anterior a los volcanes de Colima y la andesita La Calle. Su contacto superior está caracterizado por una interdigitación hacia los depósitos epiclásticos y piroclásticos de la formación Atenquique. Estas relaciones pueden observarse a distancia, desde el camino que sube a la zona El Playón, en las paredes gigantescas de la barranca de Atenquique. Sin embargo, en el contacto con la dacita Loma Alta, en el cerro del mismo nombre (Lámina 1), la andesita muestra una clara inclinación hacia el sudponiente, como resultado del ascenso dómico de la dacita Loma Alta, la cual, a su vez, desplazó a los depósitos de caída de la toba Los Mazos, faltando claramente el potente espesor de la formación Atenquique, la cual no se depositó en esta zona (Lámina 2, sección E-E').

Petrográficamente, esta unidad se caracteriza por ser holocristalina, con predominio de plagioclasa cálcica (An₆₀₋₇₅) y clinopiroxeno en menor cantidad (Tabla 2). La textura es porfídica con desarrollo de bordes de oxidación en los piroxenos y zoneamiento en las plagioclasas. La matriz está constituida por microcristales de plagioclasa, piroxenos, óxidos de hierro y poco vidrio.

Las rocas de la andesita La Calle que afloran en la cima del Nevado—cerros El Picacho, La Calle, Pico del Águila—(Figura 6), son petrográficamente muy similares entre sí y sólo



Figura 6.- Vista de la cima del Nevado de Colima, con la andesita La Calle formando el cerro El Picacho.

se observa algunas variaciones en los contenidos de olivino y anfíbol. En la Tabla 3, se observa los análisis químicos de cinco muestras de lava incluidas en esta unidad. Los resultados analíticos indican un comportamiento geoquímico bastante similar entre las diferentes muestras recolectadas. Su contenido de SiO₂ varía entre 56.75 y 62.89%, el cual queda ubicado claramente dentro del intervalo de las rocas andesíticas.

Tabla 3.- Análisis de roca entera de muestras de la andesita La Calle y de la formación Atenquique.

Muestra	744AD	1112AD	745AD	CG4	CG6	COL06	COL17
SiO ₂	56.75	57.37	59.09	60.50	62.89	59.39	60.54
TiO ₂	0.85	1.10	0.98	0.68	0.63	0.67	0.66
Al ₂ O ₃	18.68	17.61	18.14	19.01	17.28	18.64	18.09
FeO*	5.94	6.04	6.04	4.55	4.91	5.11	5.11
MnO	0.06	0.05	0.06	0.09	0.10	0.09	0.10
MgO	4.12	3.62	3.54	2.01	2.21	3.69	3.25
CaO	6.49	6.02	5.83	5.86	5.30	6.33	6.21
Na ₂ O	4.41	4.33	4.44	5.01	4.68	4.56	4.37
K ₂ O	1.37	2.37	1.28	1.65	1.83	1.37	1.52
P ₂ O ₅	0.29	0.46	0.25	0.24	0.18	0.16	0.16
H ₂ O*	0.01	0.59	0.01	nd	nd	nd	nd
H ₂ O'	0.04	0.02	0.05	nd	nd	nd	nd
Total	99.01	99.58	99.71	99.60	100.01	100.01	100.01

FeO*: Fe total; nd: no determinado.

Muestras 744AD, 1112AD, 745AD. CG4 y CG6: andesita La Calle; COL06 y COL17: Fm. Atenquique.

Análisis—744AD, 1112AD y 745AD: Demant (1981).

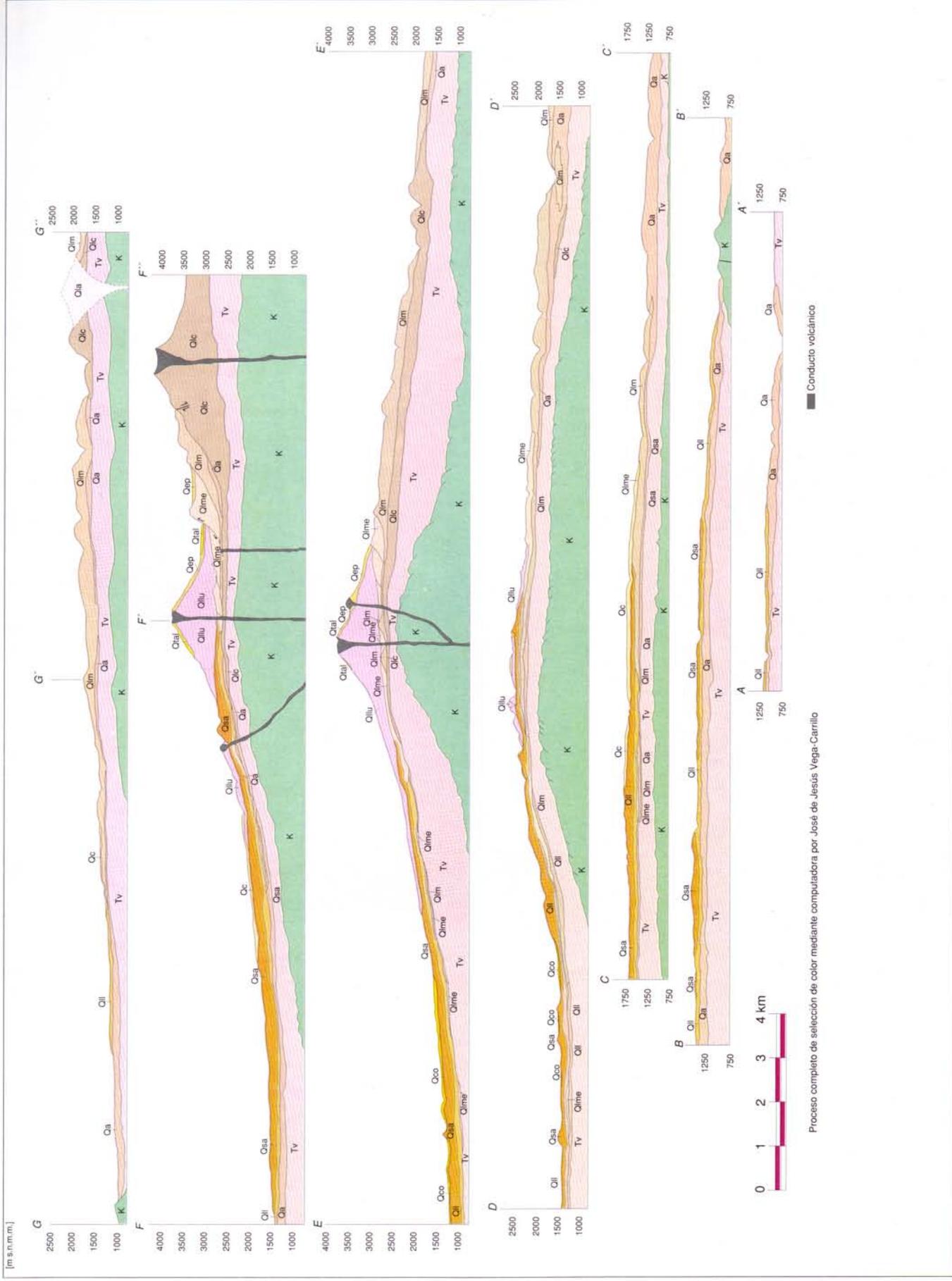
CG6, COL06 y COL17: J.L. Macías, Universidad de Florencia, Método: FRX, excepto K y Mg, por absorción atómica.

El volumen aproximado de la andesita La Calle, tomando en consideración su distribución total al norte del área, se calcula en 150 km³.

Robin y colaboradores (1987) fecharon por el método de K/Ar dos clastos incluidos en los niveles conglomeráticos de la formación Atenquique, y obtuvieron edades de 0.38 ± 0.10 y 0.26 ± 0.06 Ma. Si se considera que estas edades corresponden a la andesita La Calle y que la mayoría de los clastos que constituye el conglomerado necesariamente tuvo que derivarse de esta unidad, se infiere que la citada andesita se haya formado durante el período comprendido entre los 500,000 y 250,000 años A.P., durante el cual se presentaron etapas sucesivas de actividad del Nevado de Colima, que alternaron con intervalos de reposo, y que permitían el depósito de los niveles conglomeráticos de la formación Atenquique.

Formación Atenquique

Las lavas masivas de la andesita La Calle se caracterizan por un relieve abrupto e irregular. El terreno sobre estas lavas



cambia transicionalmente hacia el oriente, sudoriente y poniente, conformando un terreno plano con la presencia de grandes y profundas barrancas. En estos cortes naturales, se puede observar una secuencia desordenada de depósitos fluvio-lacustres, lahares, derrames piroclásticos y tefra, medianamente consolidados a no consolidados, así como algunos derrames de lava que están intercalados dentro de toda la secuencia, cuyo espesor promedio se calcula en 300 m.

Mooser (1961) utilizó el nombre de "series Atenquique" para referirse a una secuencia alternante de depósitos fluvio-lacustres, constituidos por material lítico derivado, en su mayoría, del Nevado de Colima. Demant (1979) mencionó por vez primera la *Formación Atenquique*, citando erróneamente como fuente para este nombre al estudio de Mooser de 1961. Luhr y Carmichael (1982) describieron un espesor de 300 m de conglomerados, arenas y cenizas de origen volcánico en la base del complejo de los volcanes de Colima, cuyo volumen estimaron en 450 km³. Robin y colegas (1987) se refirieron a esta unidad como "series conglomeráticas Atenquique" y consignan los dos fechamientos de roca contenida en dicho conglomerado, ya mencionados anteriormente.

La formación Atenquique está conformada por potentes espesores de brechas, lahares y conglomerados volcánicos que afloran alternadamente en los alrededores del centro industrial de Atenquique (Figura 7), y que están profundamente disecta-

dos por el río que fluye por la barranca del mismo nombre, que baja de las partes altas del Nevado de Colima (Lámina 1).

La mayoría del material lítico y pumítico que constituye esta formación, se derivó principalmente de los diferentes ciclos de actividad del Nevado. El tamaño de sus líticos varía desde ceniza y arena, hasta megabloques de 2 a 3 m de diámetro con formas redondeadas y hasta angulosas. Es posible reconocer ciertas estructuras primarias, fundamentalmente de sedimentación, como diastratificación y estratificación inversa.

Debido a su heterogeneidad y, por consiguiente, sus diversos orígenes, es casi imposible hacer una clasificación petrográfica única para esta formación, ya que esto requeriría de un muestreo muy detallado que rebasa los objetivos de este estudio. Sin embargo, se considera que entre los bloques incluidos, tanto en los niveles conglomeráticos como en los derrames piroclásticos, haya una tendencia hacia la mayor presencia de andesita de ortopiroxeno y clinopiroxeno, mientras que en los derrames de lava masiva, predomina la andesita de olivino. El contenido de fenocristales de plagioclasa en la roca varía entre 10 y 50% y su composición promedio es de An₄₀₋₅₀ (Tabla 2). En la Tabla 3 se señala los análisis químicos de dos muestras, cuyos contenidos de SiO₂ (59.39 y 60.54%) reflejan claramente su carácter básico.

El contacto inferior de esta formación con las rocas del basamento anterior a los volcanes de Colima es, sin lugar a duda, discordante, lo que se atribuye a la interrupción periódica de la actividad volcánica y a la erosión subsecuente. Dicho contacto discordante se observa en el cruce de la carretera federal 54 con las barrancas El Limón y Beltrán, donde la formación Atenquique yace sobre el basamento anterior a los volcanes de Colima, formado por rocas andesíticas con muy bajo grado de metamorfismo, atravesadas por diques de composición similar (Figura 8). Su contacto superior se manifiesta

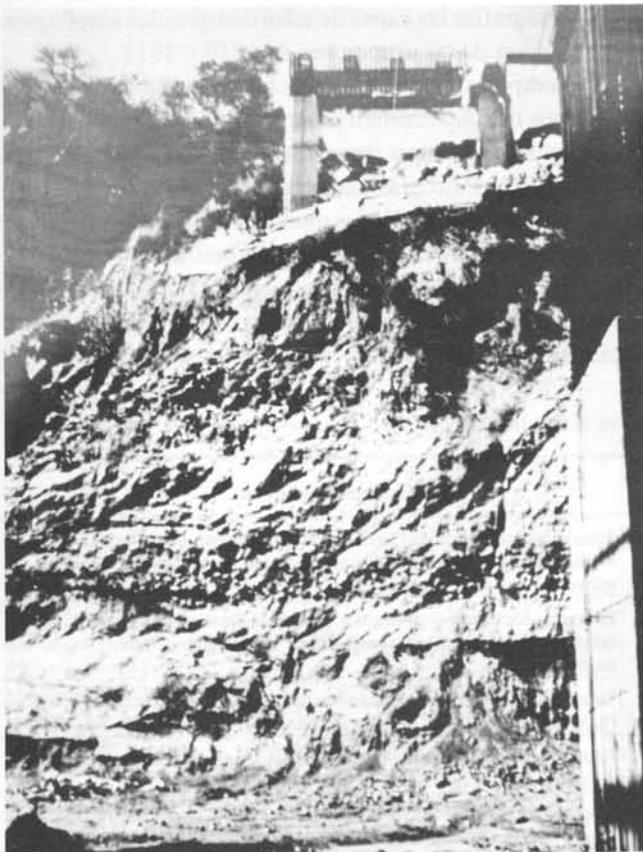


Figura 7.- Vista parcial de la formación Atenquique, donde se observa los depósitos alternados de brecha, lahar y conglomerado de origen volcánico.



Figura 8.- Relaciones de contacto de la formación Atenquique.

por una interdigitación que cambia hacia una unidad compuesta fundamentalmente por tefra y, en menor proporción por derrames piroclásticos con escasos derrames de lava en la base. Esta interdigitación se observa entre los últimos depósitos de la formación Atenquique, y los primeros de la toba Los Mazos (Lámina 2, sección D-D').

La distribución de esta formación dentro del área de estudio es de aproximadamente 40 km² y, si se toma en cuenta el espesor estimado de 300 m, se obtiene un volumen aproximado de 15 km³. La topografía desarrollada sobre la formación Atenquique corresponde a grandes terrazas cortadas, a su vez, por profundas barrancas que dejan expuesta gran parte de la secuencia clástica, y que se caracteriza por el desarrollo de una vegetación de matorrales y árboles en menor cantidad.

Robin y colaboradores (1987) dieron a conocer algunas fechas radiométricas por el método de K/Ar de clastos incluidos en los intervalos conglomeráticos, las cuales arrojaron edades de 0.38 ± 0.10 y de 0.26 ± 0.06 Ma, que reflejan la edad de la andesita. Sin embargo, se puede afirmar que los procesos de extrusión de la andesita La Calle y la erosión, transporte y depósito de sus clastos, que constituyeron los niveles conglomeráticos de la formación Atenquique, en cierta forma coincidieron temporalmente o, al menos, se sucedió uno después del otro, con intervalos muy cortos. Stoops y Sheridan (1990) obtuvieron una fecha de 18,000 años A.P. en un fragmento de carbón, el cual fue incluido en el presente estudio dentro de los niveles de avalancha superiores—*avalanche deposits*—de la formación Atenquique, que resultaron probablemente del último evento catastrófico del Nevado de Colima.

De lo anterior, se deduce que los diferentes niveles que constituyen a la formación Atenquique abarcan un lapso entre los 400,000 y 18,000 años A.P., que corresponde aproximadamente al Pleistoceno medio y tardío.

Toba Los Mazos

Esta unidad litoestratigráfica del grupo Nevado la cons-

tituye un paquete de material piroclástico y epiclástico, cuyo espesor promedio estimado es de 200 m. Morfológicamente, se caracteriza por un relieve suave a medianamente abrupto, con abundante vegetación arbórea y matorrales. Su superficie de afloramiento se calcula en 80 km², aproximadamente, abarcando partes importantes de los flancos oriental y occidental de los volcanes de Colima (Lámina 1), entre las cotas 2,600 y 1,300 m s.n.m.m. Esta área de afloramiento se extiende desde la loma "El que se Vende", ubicada en el ejido de Juan Barragán, aproximadamente 5 km al norponiente del poblado de San Marcos, hasta los alrededores del poblado de Los Mazos, ubicado 20 km al sudponiente de Ciudad Guzmán, por el camino que principia en El Fresno.

En este estudio se introduce el nombre de toba Los Mazos para referirse a un conjunto de depósitos piroclásticos, principalmente de caída libre, con intercalaciones de derrames pumítico-líticos y depósitos de surgencia—*surge deposits*—con materia vegetal carbonizada. Este conjunto de depósitos indica que fue originado por actividad volcánica altamente explosiva. El poblado de Los Mazos fue elegido como localidad tipo, debido a que se encuentra sobre los depósitos tefríticos de esta unidad y, en sus alrededores, es posible observar una buena parte del espesor total de las tobas.

La toba Los Mazos está cubierta parcialmente por horizontes de tefra, derivados de las últimas erupciones del Volcán de Colima; sin embargo, se requiere de un estudio más detallado para cartografiar las capas de tefra distribuidas ampliamente, provenientes de las erupciones de 1818 y 1913.

La composición de los líticos incluidos en los depósitos piroclásticos es fundamentalmente andesítica, aunque en ocasiones se puede encontrar fragmentos de rocas, tanto dacíticas como basálticas. Petrográficamente, esta unidad fue clasificada como toba andesítica. En las muestras estudiadas predomina una textura clástica vesicular, con una matriz criptocristalina a vítrea con microcristales de plagioclasa (Tabla 4). Incluidos en la matriz, en forma de xenocristales, están presentes abundantes plagioclasas (An₄₀₋₅₀), ortopiroxenos, clinopiroxenos y

Tabla 4.- Análisis modales de muestras de la toba Los Mazos.

Unidad litoestratigráfica	Muestra	Pl	OI	Cpx	Opx	Anf	Ox. Fe-Ti	Matriz	Observaciones
toba Los Mazos	46Q(A)	10	1	3	1	<1	1	83	Toba andesítica de caída. Textura clástica. Matriz: vidrio y óxidos de hierro englobando a fragmentos líticos y cristales angulosos de plagioclasa y minerales ferromagnesianos.
	46Q(B)	10	1	3	1	<1	1	83	Derrame piroclástico andesítico. Textura clástico-traquita. Cristales tabulares de plagioclasa alineados en una dirección. Matriz vítrea con óxidos de hierro.
	48Q(A) II	1	1	1	1	—	<<1	95	Toba de caída. Textura clástica vesicular. Matriz criptocristalina, vítrea con Pl. Xenocristales de Pl, OI, Opx y Cpx.
	CG12	15	3	1	1	<1	1	78	Andesita de olivino. Textura porfídica. Matriz criptocristalina de Pl y óxidos de hierro. Inclusiones de magnetita en OI y piroxeno.
	CG15	35	1	2	2	<1	3	57	Andesita de piroxeno. Textura pseudotraquita. Los cristales tabulares de Pl son abundantes con orientación preferente.
	CG19	10	3	1	3	<1	2	80	Andesita de olivino. Textura porfídica con una ocurrencia de fenocristales de 10%. Matriz criptocristalina de Pl, óxidos de hierro (hematita) con escaso vidrio.

olivino. Es común encontrar los fragmentos líticos de tamaño de arena gruesa a fina, englobados en un material pumítico de composición intermedia; ésta es una característica muy común de las pómez del Volcán de Colima.

La composición química de cuatro muestras analizadas arroja un contenido entre 55.7 y 60.9% de SiO₂. Estos valores están dentro del alcance de las rocas andesíticas. Asimismo, se observa un contenido de 4.5% de MgO en una de las muestras, el cual es notoriamente mayor que en el resto de las muestras analizadas del Nevado de Colima (Tabla 5).

Tabla 5.- Análisis de roca entera de muestras de la toba Los Mazos.

Muestra	40Q	66CR	614AD	48Q
SiO ₂	55.70	59.01	60.01	60.90
TiO ₂	0.90	0.60	0.70	0.71
Al ₂ O ₃	20.80	16.60	18.43	17.20
FeO*	6.45	6.31	5.01	5.03
MnO	0.13	0.09	0.02	0.10
MgO	2.30	4.50	2.59	3.10
CaO	5.36	6.90	5.86	5.40
Na ₂ O	3.40	4.15	4.21	4.30
K ₂ O	0.81	1.45	1.04	1.37
P ₂ O ₅	0.24	nd	0.15	0.19
H ₂ O*	nd	0.43	1.56	nd
H ₂ O ^o	nd	0.22	0.36	nd
Total	96.09	100.26	99.93	98.30

FeO*: Fe total; nd: no determinado.

Análisis—66CR: Robin y colaboradores (1987).

614AD: Demant (1981).

40Q y 48Q: S. Nelson, Universidad de Tulane, Nueva Orleans.

Método: FRX

El volumen de esta formación, de acuerdo con los parámetros aproximados señalados con anterioridad, se calcula en 20 km³.

El contacto inferior de esta unidad es transicional con la formación Atenquique y se infirió por la interpretación de fotografías aéreas. El contacto superior con la dacita Loma Alta es discordante y muy limitado en su extensión, por tratarse ésta de un domo; sin embargo, también es posible observar una interdigitación con la andesita La Membrillera, principalmente a lo largo de la barranca El Durazno-Beltrán.

Sin lugar a duda, la última etapa de acumulación de esta unidad puede atribuirse, en gran medida, a la actividad explosiva del paleovolcán de Colima, pero ante la dificultad de diferenciar otra unidad para este evento, se decidió incluir todo el paquete dentro del grupo Nevado.

De la toba Los Mazos no se ha fechado material alguno que permita conocer su edad en términos absolutos; sin embargo, por su posición estratigráfica se ubica en el Pleistoceno tardío.

Dacita Loma Alta

El último evento asociado con la actividad volcánica del

Nevado de Colima corresponde a la formación de un domo de composición dacítica, cuya expresión morfológica es el cerro Loma Alta (2,700 m), ubicado aproximadamente 1.5 km al poniente del poblado Los Mazos. El flanco oriental de este cerro está constituido por una serie de derrames de lava dacítica masiva, intensamente fracturada y de apariencia brechoide, que contrasta topográficamente con los depósitos de relieve suave de la toba Los Mazos.

Su superficie de afloramiento se aproxima a los 8 km² y se presenta como un terreno rocoso de pendientes muy abruptas, con bastante vegetación arbórea.

El espesor promedio que se calcula para esta unidad es de 400 m, constituyendo una estructura dómica típica que, al ascender, afectó a rocas de la andesita La Calle y toba Los Mazos, lo cual se manifiesta en un ligero basculamiento de estas unidades en las zonas próximas al contacto con la dacita Loma Alta (Lámina 2, sección G-G').

Petrográficamente, se trata de una roca holocristalina con predominio de plagioclasas cálcicas An₅₀₋₆₀, las cuales presentan zoneamiento, una proporción reducida de clinopiroxenos y ausencia total de olivino. La textura es porfídica-seriada y los cristales de augita presentan bordes de oxidación. La matriz está constituida por microcristales de plagioclasa, piroxenos y óxidos de hierro (Tabla 6).

En la Tabla 7 se muestra el análisis geoquímico de una muestra (CG3) perteneciente a esta unidad, cuyo contenido de SiO₂ es de 64.34%, el cual cae dentro del campo de las dacitas, de la misma manera en que su bajo contenido de MgO—1.60%—está en concordancia con la ausencia de olivino.

El volumen aproximado de la dacita Loma Alta es de 3 km³ y su edad, si bien se desconoce, se asocia con las últimas etapas de actividad volcánica del Nevado de Colima.

ANDESITA LA MEMBRILLERA

La andesita de piroxeno, denominada en este estudio como andesita La Membrillera, constituye una unidad litoestratigráfica que conforma la estructura principal del antiguo Volcán de Colima o Paleofuego a manera de *somma* (Lámina 2, sección F-F'-F"). La superficie de afloramiento de la andesita La Membrillera se aproxima a los 60 km², extendiéndose principalmente hacia el poniente, norponiente y sudoriente del Volcán de Colima.

Esta unidad tiene una inclinación entre 30 y 40° hacia el norte y está cubierta por una vegetación boscosa, en sus partes más altas—3,000-3,400 m s.n.m.m.—y arbustos y pastizales, en las laderas y partes más bajas.

Waitz (1932, p. 366) utilizó el nombre de loma de La Membrillera para referirse al promontorio delimitado por acantilados casi verticales, que rodea por el norte al Volcán de Colima, y que le sirvió como punto de observación antes y después de la gran erupción de enero de 1913; asimismo, interpretó este rasgo fisiográfico tan espectacular, localizado

Tabla 6.- Análisis modales de muestras de la dacita Loma Alta, de la andesita La Membrillera y de la avalancha San Antonio (no se recolectó muestra de la avalancha Los Lobos).

Unidad litoestratigráfica	Muestra	Pl	OI	Cpx	Opx	Anf	Ox. Fe-Ti	Matriz	Observaciones
avalancha San Antonio	CG55	10	2	1	1	<<1	1	84	Andesita de olivino. Textura porfídica con una ocurrencia de fenocristales de 15-20%. Matriz criptocristalina de Pl y piroxeno con muy poco vidrio. Bloque contenido en un depósito de avalancha.
	CG24	15	2	1	1	<<1	1	79	Andesita de olivino. Textura porfídica con una ocurrencia de fenocristales de 20%. Matriz criptocristalina de Pl, óxidos de hierro. Clasto contenido en depósito de avalancha.
andesita La Membrillera	38Q	15	3	1	1	<1	3	76	Andesita de olivino. Textura porfídica con una ocurrencia de cristales de 10-15%. Matriz criptocristalina de Pl, piroxeno y óxidos de hierro.
	PIC	20	2	2	3	-	10	63	Andesita de olivino. Textura porfídica seriada. Matriz criptocristalina de Pl, piroxeno y óxidos de hierro. Inclusiones de magnetita en el piroxeno.
dacita Loma Alta	CG3	20	-	3	<1	<<1	3	72	Dacita de augita. Textura porfídica seriada. Matriz criptocristalina de Pl, piroxeno y óxido de hierro. Inclusiones de magnetita en el piroxeno.

aproximadamente en el punto intermedio entre las cimas del Nevado y del Volcán de Colima, como un *maar* perteneciente al macizo del Nevado, en cuyo centro se formó posteriormente el Volcán de Colima. Mooser (1961) definió a las rocas de esta unidad como pertenecientes a una gran *caldera de sumergencia*, las cuales forman un semicírculo claramente visible en el flanco septentrional del Volcán de Colima. Demant (1979, p. 52) describe este rasgo estructural como una caldera de 5 km de diámetro, constituido por andesita de hornablenda, que se formó por una sucesión de erupciones violentas, cuyos productos son capas alternantes de pómez y ceniza. Robin y colaboradores (1987, p. 108) emplean el nombre de Paleofuego, cuando se refieren a un Volcán de Colima o Fuego ancestral, el cual fue destruido por un evento del tipo del St. Helens hace

Tabla 7.- Análisis de roca total de muestras de la dacita Loma Alta y de la andesita La Membrillera.

Muestra	CG3	550AD	PIC	615AD	38Q
SiO ₂	64.34	60.54	63.20	60.89	58.80
TiO ₂	0.48	0.86	0.62	0.65	0.69
Al ₂ O ₃	17.47	18.05	17.60	18.20	19.70
FeO*	4.36	4.93	3.97	5.41	4.58
MnO	0.09	0.12	0.08	0.09	0.09
MgO	1.60	2.93	1.60	3.51	2.20
CaO	5.22	5.99	5.34	5.72	6.50
Na ₂ O	4.79	4.46	5.20	4.37	5.10
K ₂ O	1.50	1.73	1.53	1.11	1.31
P ₂ O ₅	0.16	0.21	0.18	0.19	0.17
H ₂ O*	nd	0.01	nd	nd	nd
H ₂ O	nd	0.01	nd	nd	nd
Total	100.01	99.84	99.32	100.14	99.14

FeO*: Fe total; nd: no determinado.

Muestra CG3: dacita Loma Alta; muestras 550AD, PIC, 615AD y 38Q: andesita La Membrillera.

Análisis—550AD y 615AD: Demant (1981).

38Q: S. Nelson, Universidad de Tulane, Nueva Orleans.

Método: FRX, excepto K y Mg, por absorción atómica.

aproximadamente 10,000 años y del que sólo queda su flanco septentrional. Luhr y Carmichael (1982, p. 263) y Luhr y Prestegard (1988, p. 337) se refirieron a estas rocas como *andesitas precalders* y las agruparon con las rocas del Nevado, adjudicándoles igualmente un origen del tipo del St. Helens, que resultó en el colapso de su flanco meridional, dejando como evidencia una estructura en forma de herradura con su parte abierta hacia el sur. Luhr y Prestegard (1985) fecharon un fragmento de carbón encontrado en la base de un depósito de avalancha y obtuvieron una edad de 4,300 años A.P., misma que interpretaron como edad de colapso de la caldera.

El contacto inferior de la andesita La Membrillera con el grupo Nevado es una discordancia angular con la dacita Loma Alta. Fuera del área de distribución de la dacita Loma Alta, el límite inferior de la andesita es considerado como una interdigitación con los depósitos tefríticos de la toba Los Mazos, aunque su delimitación es difícil de precisar, ya que se encuentra cubierto por otros depósitos de tefra pertenecientes a las últimas erupciones del Volcán de Colima, así como por material epiclástico removido de las partes altas del Nevado de Colima.

El contacto superior de esta formación, en las áreas cercanas a los límites de la caldera, lo constituye una falla normal con su bloque meridional caído, que yuxtapone la andesita La Membrillera con los derrames piroclásticos y material pumítico-lítico de caída de la andesita El Playón (Lámina 2, sección F-F'-F"). Sobre las paredes verticales del bloque levantado, es posible observar diques radiales típicos de este tipo de estructuras volcánicas.

No fue posible observar en el campo el contacto con la avalancha Los Lobos, unidad litoestratigráfica que se encuentra encima. Sin embargo, la presencia del evento explosivo que generó esta avalancha debe coincidir con una edad mínima para la andesita Loma Alta.

Petrográficamente, la andesita La Membrillera fue clasificada como andesita de piroxeno (Tabla 6). Esta unidad con-

siste en una roca holocristalina, de textura porfídica típicamente seriada, en la que los fenocristales predominantes son de plagioclasa cálcica (An_{50-70}) y, en menor proporción, de piroxeno. La matriz está constituida por una mezcla de microcristales de plagioclasa, piroxeno y óxidos de hierro. La plagioclasa se presenta con zoneamiento y en forma subhedral, mientras que el piroxeno es generalmente anhedral y tiene inclusiones de magnetita.

En la Tabla 7, se observa los análisis de cuatro muestras pertenecientes a esta unidad, una de las cuales (615AD) es un dique radial. El contenido de SiO_2 para estas cuatro muestras varía entre 58.8 y 63.2%, valores que pertenecen al campo de la andesita y cuyo límite superior—muestra PIC—coincide con el límite de la dacita, aunque en este estudio se considera como andesita alta en sílice.

El espesor promedio que se adjudica a esta unidad, de acuerdo con las secciones estructurales construidas, se calcula en 100 m. Su volumen, según las dimensiones antes mencionadas, es de aproximadamente 5 km^3 . Se interpreta que esta formación represente el tiempo transcurrido desde el Pleistoceno tardío hasta el Holoceno temprano. Durante este lapso, se formó un edificio volcánico de dimensiones tal vez superiores a las del actual Volcán de Colima—paleovolcán de Colima—el cual fue totalmente destruido por, al menos, dos erupciones muy explosivas, que dejaron un *somma* como rasgo fisiográfico distintivo, cuyo punto más alto es conocido como la loma de La Membrillera.

AVALANCHA LOS LOBOS

Esta unidad litoestratigráfica está constituida por depósitos caóticos de material volcánico no consolidado y muy pobremente seleccionado, cuyas características son las de una avalancha de escombros típica—*debris avalanche deposit*—que arrastra bloques de muy diversos tamaños, los cuales "flotan" en una matriz de guijarros, arena y material fino (Figura 9).

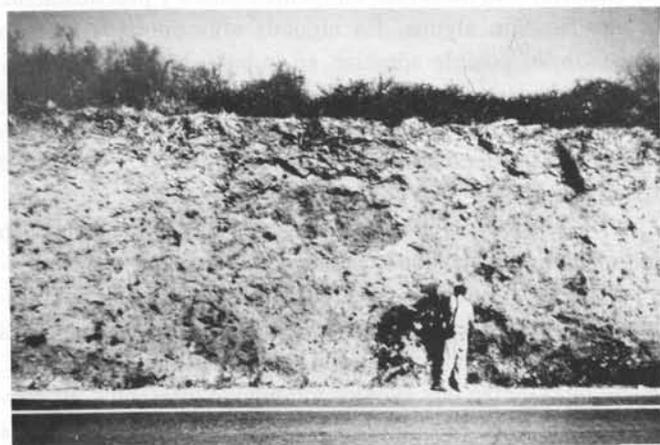


Figura 9.- Bloque perteneciente al Volcán de Fuego ancestral, incluido en los depósitos de avalancha de la unidad Los Lobos.

El origen del emplazamiento de este tipo de depósitos fue observado por vez primera durante la erupción del volcán St. Helens, en mayo de 1980, en el noroeste de los Estados Unidos de América. La observación directa de este fenómeno, antes, durante y después de la erupción, permitió ver que el volcán, momentos antes del evento explosivo, presentaba claras muestras de deformación, tanto en su cima como en su flanco septentrional (Lipman *et al.*, 1981). Un sismo desencadenó la violenta erupción, acompañada del deslizamiento sucesivo de grandes bloques del flanco septentrional del volcán (Voight *et al.*, 1981). Este gran volumen de material que constituía el edificio volcánico, fluyó gravitacionalmente por las barrancas, despedazándose entre sí, debido a la gran energía cinética contenida. Pocos segundos después del deslizamiento de ese flanco, vino el componente propiamente magmático de la erupción, en forma de derrames piroclásticos y depósitos de surgencia, debido al rompimiento del equilibrio existente al desaparecer una parte considerable del flanco del volcán. El depósito resultante, según Voight y colegas (1981), consiste en escombros volcánicos seleccionados pobremente, los cuales cubrieron un área aproximada de 60 km^2 , cuyo volumen total es comparable al que desapareció del edificio volcánico, como producto del deslizamiento sucesivo de los bloques. De acuerdo con este criterio, se decidió usar el nombre informal de avalancha, para definir a los depósitos del tipo del St. Helens observados en el Volcán de Colima.

La avalancha Los Lobos toma su nombre de los afloramientos que existen en la barranca Los Lobos, especialmente los ubicados 1 km al sudoeste de Quesería, en un corte artificial del puente que cruza la barranca sobre la nueva carretera Guadalajara-Manzanillo. En esta localidad, es posible observar unos 4 m de un material volcánico poco consolidado, compuesto por bloques andesíticos de angulosos a subangulosos, cuyos tamaños varían entre 20 y 50 cm y están englobados en arena y guijarros, producto de la trituración a la que fueron sujetos durante su emplazamiento.

La base de esta unidad está formada por una alternancia de arena fina y gruesa, de unos 40 cm de espesor, la cual presenta diastratificación y estratificación inversa. Este material ha sido interpretado como depósito de oleada piroclástica basal—*base surge deposit*—y forma parte de la unidad aquí descrita. Estos depósitos de oleada piroclástica (Araña-Saavedra y Ortiz-Ramis, 1984) han sido correlacionados en el campo con un material pumítico-lítico de carácter epiclástico o retrabajado, cuyo espesor varía entre 30 y 50 cm, y que proviene de la erosión sucesiva de las unidades anteriores—formación Atenquique, toba Los Mazos—las cuales tienen un contenido alto de piroclastos.

Estos depósitos tienen una distribución muy amplia que rebasa los límites del presente estudio y que, en términos generales, se calcula en 300 km^2 , aproximadamente. Esta unidad litoestratigráfica conforma un terreno ondulante con un declive ligero y constante hacia el sur y sudoeste. Sobre la superficie, destacan grandes bloques andesíticos, los cuales

han quedado ahí como consecuencia de la erosión del material que los englobaba.

El límite inferior de la avalancha Los Lobos (Figura 10) lo constituye un contacto discordante de ángulo muy bajo, con una brecha de avalancha que pertenece a la cima de la formación Atenquique, faltando, de manera evidente, la andesita La Membrillera y la toba Los Mazos (Lámina 2, secciones A-A' y B-B'). El contacto superior de la avalancha Los Lobos se interpreta como una discordancia con la avalancha San Antonio. Este contacto no fue observado en el campo debido al material epiclástico—lahares retrabajados—que cubre irregularmente una amplia superficie entre ambas unidades.

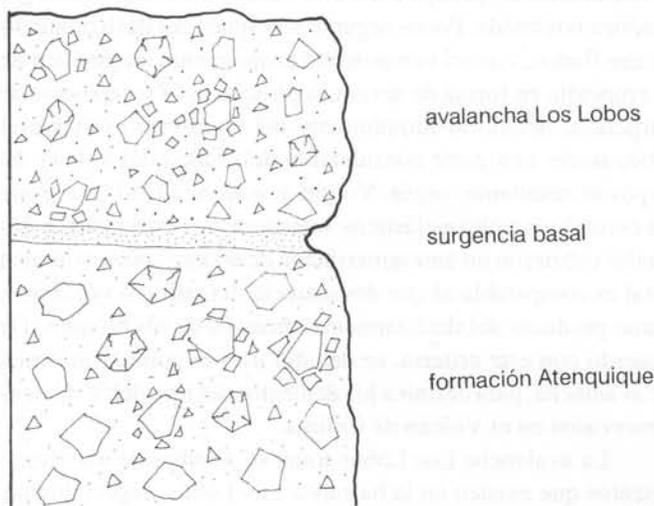


Figura 10.- Relaciones de contacto en el afloramiento tipo de la avalancha Los Lobos.

El espesor promedio estimado de la avalancha Los Lobos es de 20 m y, tomando en cuenta su vasta distribución, se le ha calculado un volumen aproximado de 5 km³.

Los imponentes depósitos de la avalancha Los Lobos fueron el resultado del colapso de una gran parte del flanco meridional del antiguo Volcán de Colima o Paleofuego, que esparció sus productos hacia las partes bajas del valle de Colima, y que pudo haber ocurrido entre los años 8,000 y 5,000 A.P.

En cuanto a su origen, los bloques y clastos contenidos en la avalancha Los Lobos son, en su mayoría, de composición andesítica. El conjunto del material no presenta estructura definida alguna y en ciertas localidades es posible observar moldes de troncos de árboles arrastrados por la avalancha. Los troncos fueron posteriormente removidos por descomposición o, en algunos casos, quedaron como remanentes semicarbonizados.

AVALANCHA SAN ANTONIO

El flanco sudoccidental del Volcán de Colima difiere de una manera notoria del resto de las áreas circundantes al volcán. Los depósitos de la avalancha San Antonio se distribu-

yen fundamentalmente en esta zona y cubren un área aproximada de 30 km², que conforma potentes espesores de un material volcánico-clástico—*debris avalanche deposit*. Sobre estos depósitos, el terreno desarrollado es abrupto, con la presencia de paredes altas que han sido cortadas por la erosión a lo largo de barrancas como la de La Lumbre o San Antonio. Las colinas desarrolladas en estos depósitos son conocidas en la literatura en inglés con el nombre de *hummocks*—en español se propone el término de pilones, entendiéndose como un apilamiento de roca—y son una de las características principales de esta formación (Figura 11).

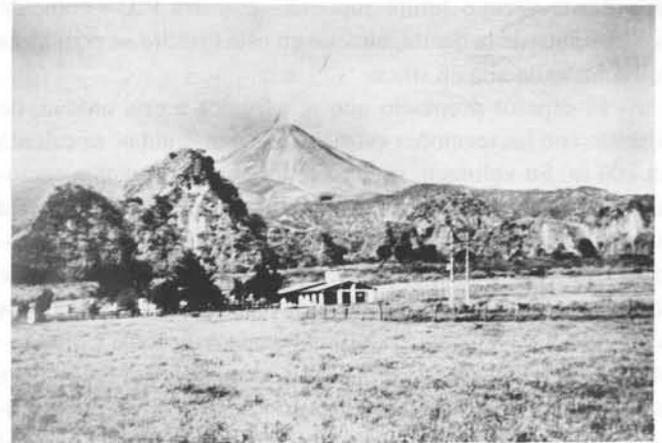


Figura 11.- Pilones (*hummocks*), en primer plano, a la izquierda, que son rasgos característicos de la avalancha San Antonio.

En la Hacienda de San Antonio, ubicada 25 km al norte de la ciudad de Colima, se puede observar depósitos de avalancha pertenecientes a esta unidad litoestratigráfica, producidos por el colapso de una parte del flanco meridional del Volcán de Colima, con espesores de entre 20 y 40 m. Estos depósitos se caracterizan por contener bloques de 1 a 2 m de diámetro, englobados en una matriz de grava y arena, con fragmentos líticos de tamaño promedio entre 10 y 20 cm. Todo este material está mezclado en forma caótica y prácticamente sin clasificación alguna. En algunos afloramientos de esta formación, es posible apreciar, en la base, conglomerados y material epiclástico, seguidos por un horizonte delgado de depósitos de oleada basal—*surge deposit*—para continuar en la cima con los depósitos de avalancha típicos de esta unidad litoestratigráfica.

No se observó el contacto inferior de la avalancha San Antonio con la avalancha Los Lobos, debido a que está cubierto por material epiclástico desprendido de esta misma unidad—lahares retrabajados. Se infiere, sin embargo, la existencia de un contacto discordante entre ambas unidades, ya que representan dos eventos totalmente diferentes. El contacto superior con la andesita La Lumbre es una discordancia cuyo ángulo es muy reducido, el cual puede ser observado en diferentes puntos a lo largo de la barranca La Lumbre (Lámina 2, secciones D-D' y E-E').

El volumen estimado para esta formación, incluyendo los afloramientos que quedan fuera del área de estudio, es de unos 3 km³, considerando un espesor medio de 100 m.

Es prácticamente imposible establecer una clasificación petrográfica única para esta unidad. Sin embargo, la mayoría de los bloques muestreados en sitios diferentes incluidos dentro de la avalancha, fue clasificada como andesita de olivino con una textura porfídica, cuyos fenocristales más abundantes son de plagioclasa y constituyen entre 15 y 20% de la roca (Tabla 6).

Luhr y Presteggaard (1985, 1988) fecharon dos fragmentos de carbón encontrados dentro de esta unidad y obtuvieron edades de 4,280 ± 110 y 4,360 ± 140 años A.P. Estos autores han considerado que el colapso de una gran parte del flanco meridional del paleovolcán de Fuego sucedió hace aproximadamente 4,300 años, durante un solo evento, que distribuyó sus productos hasta zonas tan alejadas como la ciudad de Colima. Sin embargo, en este estudio se considera que la avalancha San Antonio es el resultado del último gran colapso del paleovolcán de Colima, mismo que coincide con las edades obtenidas por Luhr y Presteggaard (*op. cit.*), y cuyos productos no se distribuyeron tan ampliamente como los depósitos de avalanchas anteriores (*i. e.*, avalancha Los Lobos).

ANDESITA LA LUMBRE

En este estudio, se nombra informalmente andesita La Lumbre a una unidad masiva de clinopiroxeno que aflora al poniente y sudponiente del Volcán de Colima, siguiendo fundamentalmente el curso de la barranca La Lumbre y sus afluentes, desde sus partes más elevadas hasta una cota de 1,700 m s.n.m.m. Cuantitativamente, esta unidad constituye la mayor parte de las lavas emitidas por el actual Volcán de Colima. Estas lavas son posteriores a la formación del *somma* del paleovolcán de Fuego y, por consiguiente, son parte fundamen-

tal de la estructura actual del cono del Volcán de Colima. Las lavas emitidas por los conos parásitos Los Hijos del Volcán, ubicados en el flanco meridional del Volcán de Colima (Lámina 1), también han sido incluidas dentro de la andesita La Lumbre.

La distribución de esta unidad litoestratigráfica es de aproximadamente 20 km². Sobre esta área, se ha desarrollado una vegetación escasa de pastizales, arbustos y árboles bajos, especialmente en la zona de la barranca La Lumbre, la cual, debido a su poca vegetación, resalta como rasgo sobresaliente en las fotografías aéreas, conformando un auténtico tobogán que baja de la zona El Playón hacia la hacienda de San Antonio. El relieve desarrollado sobre esta unidad es bastante abrupto, especialmente los grandes saltos que se han labrado a lo largo de la barranca, así como las pronunciadas pendientes que constituyen Los Hijos del Volcán. El espesor promedio considerado para esta unidad es de 250 m, que permite calcular su volumen estimado en 5 km³.

El contacto inferior de esta unidad con la avalancha San Antonio se observó en afloramientos a lo largo de la barranca La Lumbre, y fue interpretado como una discordancia de ángulo muy reducido. Esta discordancia marca el límite entre la actividad del paleovolcán de Fuego y la del Volcán de Colima actual. El contacto superior con el lahar Cofradía no fue observado en el campo, ya que este último tiende a distribuirse en las partes bajas del flanco sudoriental, mientras que los derrames de la andesita La Lumbre se concentran en las partes más altas.

Petrográficamente, las rocas de esta unidad litoestratigráfica fueron clasificadas como andesita de piroxeno. Se trata de una roca holocristalina de textura porfídica seriada. Los fenocristales constituyen el 20% del total de la roca y los más abundantes son de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y, en menor cantidad, olivino (Tabla 8). La matriz está constituida por una asociación de microcristales de plagioclasa, piroxe-

Tabla 8.- Análisis modales de muestras de la andesita La Lumbre, del lahar Cofradía y de la andesita El Playón.

Unidad litoestratigráfica	Muestra	Pl	OI	Cpx	Opx	Anf	Ox. Fe-Ti	Matriz	Observaciones
andesita El Playón	DM	10	1	2	1	1	1	84	Andesita de clinopiroxeno. Textura porfídica con 15% de fenocristales. Matriz criptocristalina de Pl, vidrio y óxidos de hierro.
	35Q	20	<1	2	1	2	5	69	Andesita de hornablenda. Textura porfídica. Matriz criptocristalina de Pl y vidrio. 15% de fenocristales de anhedrales a subhedrales.
lahares Cofradía	50Q	5	<<1	-	-	5	-	89	Diorita de hornablenda. Textura porfídica con 10% de fenocristales. Matriz criptocristalina de Pl y vidrio. La muestra pertenece a un derrame de bloques y ceniza.
	51Q	15	2	2	1	<1	1	78	Andesita de olivino. Textura porfídica seriada. Matriz de Pl y piroxeno con 20% de fenocristales. La muestra es un clasto de un depósito de lahar.
andesita La Lumbre	CG23	15	<1	1	<1	-	3	79	Textura porfídica seriada. Matriz criptocristalina de Pl y Cpx con 20% de fenocristales de anhedrales a subhedrales.
	20Q	20	-	2	1	-	5	72	Andesita de augita. Textura porfídica seriada. Matriz de Pl, Px, óxidos de hierro y vidrio. Inclusiones de magnetita en Px.
	27Q	20	1	2	1	<1	3	72	Andesita de clinopiroxeno. Textura porfídica seriada. Matriz de Pl, Px, óxido de hierro y vidrio. El olivino está alterado.
	37Q	35	-	2	1	-	10	52	Andesita de augita. Textura porfídica. Matriz de Pl, óxidos de hierro. Fenocristales de anhedrales a subhedrales.

no, óxidos de hierro y vidrio. El piroxeno suele tener inclusiones de magnetita y, en algunas muestras, el olivino está alterado a idingsita.

En la Tabla 9, se observa los análisis químicos de seis muestras de lava recolectadas dentro de la andesita La Lumbre. Estos análisis dieron contenidos de sílice inferiores al 62%, que ubica a las muestras dentro del campo de las andesitas pobres en sílice.

Tabla 9.- Análisis de roca total de muestras de la andesita La Lumbre.

Muestra	34Q	CG27	JL7	CG23	JL13	JL11
SiO ₂	59.61	59.25	61.61	57.21	56.46	56.55
TiO ₂	0.74	0.66	0.60	0.70	0.77	0.78
Al ₂ O ₃	18.27	17.81	17.82	17.34	16.67	16.63
FeO*	5.69	5.81	5.06	6.35	6.67	6.69
MnO	0.11	0.11	0.10	0.13	0.12	0.11
MgO	2.88	3.96	2.54	5.68	5.98	5.94
CaO	6.37	6.69	5.70	7.36	7.65	7.75
Na ₂ O	4.52	4.35	4.77	4.05	4.02	4.03
K ₂ O	1.55	1.21	1.43	1.05	1.06	1.06
P ₂ O ₅	0.26	0.13	0.20	0.14	0.17	0.20
H ₂ O ⁺	nd	nd	0.10	nd	0.18	0.15
H ₂ O ⁻	nd	nd	0.05	nd	0.05	0.05
Total	100.01	99.28	99.94	100.01	99.80	99.94

FeO*: Fe total; nd: no determinado.

Análisis—JL7, JL13 y JL11: Luhr y Carmichael (1980).

34Q, CG27 y CG23: J.L. Macías, Universidad de Florencia.

Método: FRX, excepto K y Mg, por absorción atómica.

De acuerdo con su posición estratigráfica, se considera que el tiempo de formación de esta unidad abarque fundamentalmente el período comprendido alrededor de los 4,300 años A.P. (Luhr y Prestegard, 1985), fecha que marca el fin de la actividad del Paleofuego, y todas las lavas y material piroclástico anteriores a 1869 A.D.

LAHAR COFRADÍA

Se emplea el nombre informal de lahar Cofradía para una unidad constituida por depósitos de lahares retrabajados, derrames piroclásticos y material lítico y pumítico de caída libre, la cual se distribuye en las partes más bajas del flanco sudoriental del Volcán de Colima.

En el extremo septentrional de la comunidad de Cofradía, ubicada 3 km al norte de Tonila (Lámina 1), se puede observar un contacto concordante entre dos paquetes. El inferior es un derrame piroclástico lítico-pumítico no consolidado, cuyos constituyentes son del tamaño de arena y arena gruesa, con material vegetal carbonizado dentro de su matriz. La unidad superior es lahárica, de clastos angulosos a subredondeados con tamaño promedio entre 10 y 20 cm, englobados en una matriz arenosa con escaso contenido de material fino. La composición de los clastos es mayoritariamente andesítica, de textura afanítica (Tabla 8).

La barranca La Tuna marca un límite importante en cuanto a la composición de esta unidad. Hacia el poniente de esta barranca, hay un predominio claro de lahares y derrames piroclásticos que contienen carbón intersticial, intercalados con horizontes de caída. En general, el grado de remoción del material es muy grande y es difícil identificar estructuras, sobre todo en las partes más elevadas. La parte oriental de esta unidad, respecto a la barranca La Tuna, representa un cambio de facies importante, caracterizándose principalmente por horizontes de material lítico-pumítico de caída, derrames piroclásticos—*block and ash flows*—compuestos de bloques con un tamaño promedio de 50 cm. La composición de estos bloques es dacítica y están cubiertos por derrames lítico-pumíticos medianamente consolidados que, a su vez, están cubiertos por material de caída del tamaño de arena gruesa.

Por frentes diferentes de todo este conjunto de material, se desprendieron lahares que arrastraron parte de las rocas preexistentes, incluyendo algunas cuya composición varía respecto a la roca andesítica promedio. Estos lahares cubrieron principalmente, y en forma irregular, las zonas circundantes a la comunidad de Cofradía, aunque se extendieron también hacia zonas próximas a la barranca El Durazno-Beltrán, que forma el límite oriental de esta unidad. Es de suponerse que una cantidad importante de lahares ya haya avanzado a lo largo de esta barranca.

La edad de esta unidad es, sin lugar a duda, muy reciente; sin embargo, la actividad histórica del Volcán de Colima con anterioridad a 1869 es conocida escasamente y, por consiguiente, es muy difícil determinar cuál o cuáles de los eventos explosivos fueron los responsables del emplazamiento sucesivo de todo el material que la compone. Es por esta razón que en este estudio se optó por agrupar a esta diversidad de material, bajo el nombre informal de lahar Cofradía.

La distribución del lahar Cofradía es de aproximadamente 45 km² y el espesor medio considerado es de 20 m. De acuerdo con estos parámetros, se ha estimado un volumen de 0.8 km³ para esta unidad.

Los contactos inferior y superior con la andesita La Lumbre y la andesita El Playón, respectivamente, no fueron observados, ya que esta unidad se distribuye hacia las zonas más bajas del volcán, donde no hay afloramiento de lavas.

ANDESITA EL PLAYÓN

Las andesitas de hornablenda y piroxeno que constituyen los derrames de lava producidos por la actividad efusiva histórica del Volcán de Colima, son denominadas informalmente en este estudio como andesita El Playón, debido a los imponentes derrames de lava en bloques que bajan a la zona El Playón, en el flanco septentrional del volcán. Para fines prácticos del trabajo cartográfico, se incluyó dentro de esta unidad el material lítico-pumítico, tanto de derrame como de caída, que pertenece a la erupción pliniana de 1913. Este material se distribuyó en El Playón, para darle así su forma plana, y fluyó

a lo largo de las barrancas principales del flanco meridional, como son las de San Antonio, Montegrande y El Durazno-Beltrán (Waitz, 1915).

Los diferentes períodos de actividad que han producido el material de esta unidad, son los siguientes:

1869 (Los Volcancitos): Lava en bloques, producida por la actividad de un cono adventicio que se formó en el flanco nororiental del Volcán de Colima, quedando actualmente dos estructuras dómicas alineadas E-W (Lámina 1), cuyos derrames de lava se distribuyeron hacia el norte, este y sudeste, y están cubiertos en forma irregular por los depósitos de caída pertenecientes a la erupción de 1913.

1913: Fundamentalmente tefra y derrames piroclásticos, cuya distribución, en el caso de los derrames, estuvo condicionada por las barrancas profundas que bajan del volcán hacia el sur. En el caso del material de caída, tiende a distribuirse selectivamente en los flancos del Volcán de Colima y del Nevado—material grueso—con orientación al noreste, lo que concuerda con la dirección de los vientos predominantes, hacia donde se ubica el material más fino.

1961-1962: El reinicio de la actividad efusiva-constructora, después de la explosión destructora de 1913. Se trata de un derrame de lava en bloques, cuya longitud es de aproximadamente 1 km, de forma lobular, que salió por el borde septentrional del cráter principal y fluyó por una de las profundas barrancas que bajan del cráter hacia El Playón.

1975-1976: La siguiente manifestación efusiva del Volcán de Colima se desarrolló durante diciembre de 1975 y junio de 1976, cuando la lava emergió por el borde oriental, produciéndose tres derrames, uno que se extiende unos 500 m de longitud hacia el noreste y otros dos que fluyeron hacia el sudeste, encajonándose en barrancas profundas. Uno de estos derrames—barranca El Cafecito—alcanzó la cota 2,000 m s.n.m. y se extendió aproximadamente 5 km. Thorpe y colaboradores (1977), quienes fueron testigos presenciales de esta erupción, describieron el desprendimiento de derrames piroclásticos de los frentes de lava, los cuales, en la actualidad, son difícilmente diferenciables de los lahares y material retrabajado que se encuentra en las partes más bajas del volcán.

1981-1982: Esta nueva actividad efusiva del Volcán de Colima se desarrolló durante diciembre de 1981 y enero de 1982, cuando cantidades pequeñas de lava y escoria se derramaron por el borde meridional del cráter, llegando hasta la cota 3,000 m s.n.m.m.

1991: La última actividad efusiva conocida hasta la actualidad, empezó a manifestarse en febrero de 1991 y tuvo su punto culminante durante el mes de abril del mismo año, cuando una fracción de la roca alterada del domo se colapsó gravitacionalmente hacia el flanco meridional del volcán, como resultado del ascenso y consecuente empuje mecánico de la lava. Tanto el material triturado a raíz del colapso, como el derrame de lava en bloques que siguió, se distribuyeron en los tres ramales superiores de la barranca El Cordobán (Rodríguez-Elizarrarás *et al.*, 1991).

El límite o límites inferiores de esta unidad, andesita El Playón, son muy difíciles de establecer. En el caso del derrame de 1869, Sartorius (1871), Waitz (1906), Mooser (1961) y Luhr y Carmichael (1980) afirman que cubrió los restos del flanco oriental de la antigua caldera; esto quiere decir que yace en forma discordante sobre las lavas de la andesita La Membrillera.

Las dimensiones aproximadas de esta formación son también muy difíciles de conocer, ya que en el caso de la erupción de 1913, es muy escaso el material que ha quedado *in situ*, puesto que casi todo ha sido removido por la erosión. Sin embargo, se considera una distribución de 10 a 15 km² con espesor medio de 50 m. Estas dimensiones arrojan un volumen de 0.750 km³, el cual, si se tomara en cuenta la distribución total de los depósitos de caída de la erupción de 1913, se vería notablemente incrementado.

Tanto las lavas, como el material tefrítico perteneciente a esta unidad, son clasificados como andesita de hornablenda. Texturalmente, la roca es porfídica, con abundancia relativa de plagioclasa cálcica y minerales ferromagnesianos. La matriz está constituida por microcristales de plagioclasa, óxidos de hierro y vidrio (Tabla 8).

En la Tabla 10, se observa los análisis químicos de seis muestras pertenecientes a los distintos derrames de lava y el derrame piroclástico de 1913, que integran esta unidad. De acuerdo con su contenido de SiO₂, el cual varía entre 57.57 y 61.02%, se observa claramente que caen dentro del campo de la andesita.

Tabla 10.- Análisis de roca total de muestras de la andesita El Playón.

Muestra	JL2	JL15	JL17	JL9	JL30	JL45
SiO ₂	60.84	57.57	60.41	61.02	58.54	58.86
TiO ₂	0.62	0.79	0.72	0.64	0.72	0.67
Al ₂ O ₃	17.8	17.42	17.17	17.72	17.41	17.36
FeO*	5.26	6.38	5.81	5.23	6.04	6.01
MnO	0.11	0.12	0.12	0.10	0.12	0.12
MgO	2.74	4.14	3.22	2.76	4.42	3.99
CaO	5.88	7.02	5.89	5.92	6.50	6.50
Na ₂ O	4.76	4.40	4.67	4.70	4.54	4.52
K ₂ O	1.46	1.16	1.40	1.40	1.18	1.21
P ₂ O ₅	0.22	0.19	0.22	0.21	0.19	0.19
H ₂ O ⁺	0.49	0.49	0.13	0.06	0.17	nd
H ₂ O ⁻	0.11	0.11	0.07	0.10	0.05	nd
Total	100.29	99.79	99.83	99.86	99.88	99.88

FeO*: Fe total; nd: no determinado.

Análisis—JL2, JL15, JL17 y JL9: Luhr y Carmichael (1980).
JL30 y JL45: Luhr y Carmichael (1990a).

GRAVA CORDOBÁN

Se emplea en el estudio presente el nombre informal de grava Cordobán para designar a los depósitos de grava recientes que se acumularon en el flanco sudoccidental del Volcán de Colima, en una depresión limitada por los depósitos de la

avalancha San Antonio. Las barrancas El Cordobán, Zarco y San Antonio, que descienden de las partes más altas del volcán por su flanco sudoccidental, hasta llegar al poblado de La Becerrera y unirse a la barranca La Lumbre, han canalizado los depósitos de arena y grava que varían entre los 10 y 15 m de espesor.

La grava Cordobán se distribuye en una superficie de aproximadamente 20 km² y constituye una planicie de la cual sobresalen los grandes pilones o *hummoks* formados por la avalancha San Antonio. Su espesor es variable y en muy pocos casos sobrepasa los 15 m. De acuerdo con lo anterior, se estima un volumen de 0.3 km³ para esta unidad. La depresión en la que están ubicadas estas gravas pudo haber sido una cuenca cerrada pequeña, la cual fue drenada posteriormente, a través de la barranca La Lumbre.

Este depósito de grava es considerado como de alta energía, debido a que las fuentes de aporte, como son las lavas de la andesita La Lumbre y la avalancha San Antonio, se encuentran a más de 600 m de altura respecto a esta planicie. Es posible pensar que el depósito de estas gravas se haya iniciado poco después del emplazamiento de la avalancha San Antonio. Sin embargo, ciertos lineamientos observados en dirección NE-SW, que coinciden con el curso de las barrancas principales, pueden ser los indicadores para considerar un fenómeno tectónico-volcánico activo, el cual ha producido una gran cantidad de grava en esta zona, relativamente en poco tiempo.

DEPÓSITOS DE TALUD

Como depósitos de talud se considera todo aquel material desprendido que cubre una parte importante de las zonas altas del volcán, desde el cráter hasta la cota 2,700 m s.n.m., aproximadamente. Las características principales de la zona de talud son la ausencia total de vegetación y su pendiente, la cual es próxima al 35%.

ESTRUCTURA GEOLÓGICA

De acuerdo con su estructura, el Volcán de Colima se clasifica como un típico volcán compuesto o estratovolcán, característico de márgenes continentales adyacentes a zonas de subducción (Cas y Wright, 1987, p. 382). Este tipo de volcán está formado por la alternancia de capas de tefra, derrames piroclásticos y de lava de composición eminentemente andesítica, los cuales pueden provenir de un cráter central o de conos adventicios asociados (Macdonald, 1972, p. 280; Cas y Wright, 1987, p. 382).

El edificio del Volcán de Colima presenta actualmente una forma cónica bastante regular y tiene asociados dos conos adventicios. Uno de ellos está localizado en el flanco meridional y es conocido como Los Hijos del Volcán, cuya edad aún no ha sido precisada. El otro está ubicado en el flanco nor-oriental, y es conocido como Los Volcancitos, habiéndose formado en el año de 1869 (Figura 12).

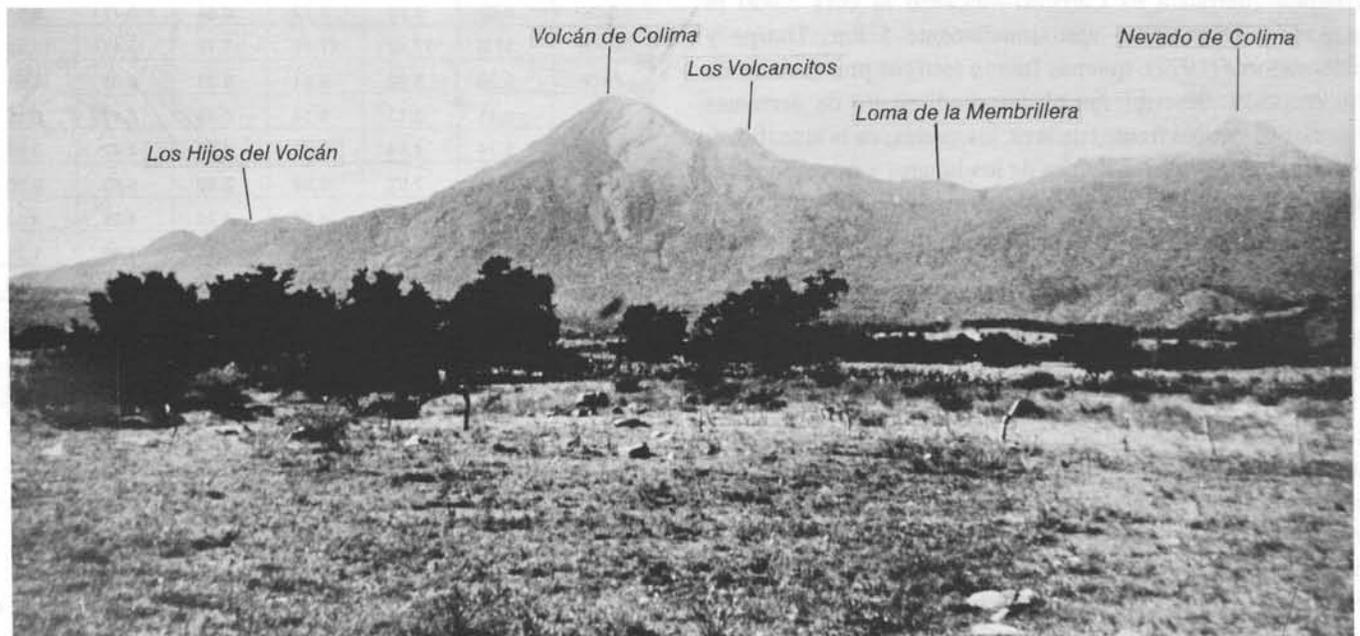


Figura 12.- Vista panorámica de los volcanes de Colima, en la que se muestra sus rasgos principales.

El cráter del cono terminal del volcán es de forma aproximadamente circular, con un radio promedio de 250 m. Está ocupado por un criptodomo de relieve irregular, con algunas depresiones y elevaciones, el cual está sujeto a una dinámica ascendente que ha generado una serie de fracturas concéntricas en la zona exterior y sólida del domo. De estas fracturas, la más importante coincide con el borde mismo del cráter, siendo una evidencia de esto el claro zoneamiento de las fumarolas y solfataras, las cuales se concentran fundamentalmente hacia los bordes y partes más externas del cráter. El levantamiento continuo del domo, asociado con el intenso proceso de fractura, provoca constantes colapsos de la roca sólida hacia las partes centrales del cráter, así como hacia las pendientes del cono volcánico mismo.

La base septentrional del Volcán de Colima, en la zona conocida como El Playón, se localiza aproximadamente en la cota de 3,100 m s.n.m.m. y se encuentra rodeada por un anfiteatro. La pared interior de este anfiteatro es vertical, con una altura de 200 m en sus partes más altas que, a su vez, constituye la traza del tramo de una falla circular cuyo bloque meridional está caído (Lámina 1). Dicha falla limita la caldera del paleovolcán de Colima o *somma*, el cual fue destruido por erupciones catastróficas con una fuerte componente lateral, que le imprimieron una forma de herradura abierta hacia el sur, en medio de la cual creció el cono actual del Volcán de Colima (Lámina 2, sección F-F'-F"). Su base meridional coincide aproximadamente con la base de los conos parásitos de Los Hijos del Volcán, a una altura de 2,400 m s.n.m.m. La diferencia de alturas entre los flancos septentrional y meridional hace pensar que el edificio mismo del Volcán de Colima esté plantado sobre un basamento inclinado hacia el sur-sudoeste, cuya pendiente se estima en 20%. En la Lámina 2—secciones AA', BB', CC', DD' y EE'—se muestra una interpretación del basamento que sostiene a los volcanes de Colima, el cual está constituido por rocas cretácicas de ambiente marino y plegadas, según se infiere del mapa geológico de la hoja Colima (DGG, 1982) (Figura 4). De acuerdo con esto, se supone que estos pliegues constituyan una zona levantada, misma que yace bajo la secuencia de los volcanes de Colima y, por consiguiente, la inclinación que presenta el edificio actual del Volcán de Colima estaría, en primera instancia, controlada por el buzamiento hacia el sur de las estructuras plegadas cretácicas, las cuales quedaron cubiertas por espesores potentes de rocas volcánicas del Terciario, cuyo emplazamiento estuvo controlado, de la misma manera, por la topografía preexistente.

Las fallas y fracturas principales, que aparentemente afectan al edificio del Volcán de Colima, tienen dos orientaciones predominantes. Una de norte a sur, la cual coincide con la alineación de la cadena volcánica Cántaro-Nevado-Colima-Hijos del Volcán; y otra, de noreste a sudoeste, que coincide con una serie de lineamientos en esta dirección a lo largo de las barrancas La Lumbre, El Zarco y Cordobán, al sudoeste del volcán, y se continúa por los conos parásitos de Los Volcancitos, hasta coincidir con una estructura de aparente fallamiento

normal, ubicada al noreste del volcán, la cual corre paralelamente a la barranca de Atenquique (Lámina 1). De estos sistemas de fracturas, se considera que el de orientación NE-SW es más reciente y aún activo. Lo anterior se deduce de la existencia de terrazas en el área de afloramiento de la grava Cordobán, las cuales podrían adjudicarse a una actividad tectónica local de levantamiento, así como al carácter indudablemente reciente de los conos parásitos de Los Volcancitos.

En la sierra de Manantlán, inmediatamente al poniente del Volcán de Colima y fuera del área de estudio, las rocas del basamento cretácico presentan espejos de falla con orientación aproximada de N30°E, con estrías que indican desplazamiento horizontal siniestro. Éstos coinciden en orientación con otro espejo de falla que contiene también estrías horizontales, que aflora en la barranca de Beltrán al sudoriente del volcán (Lámina 1), el cual afecta a brechas volcánicas de edad igualmente cretácica. La traza de esta falla de desplazamiento lateral coincide con los rasgos tectónicos de orientación nororiental consignados por Serpa y colaboradores (1990), así como con la zona de falla Atenquique-Tuxpan-Tamazula descrita por Páez-Juárez y Pantoja-Alor (1990). La edad del fallamiento en las rocas cretácicas, así como su relación con la actividad tectónica local del Volcán de Colima, son aún inciertas.

Sin lugar a duda, la erupción de mayo de 1980 del volcán St. Helens, en los Estados Unidos de América (Voight *et al.*, 1981), marcó un importante parteaguas en la interpretación de este tipo de estructuras volcánicas. El Volcán de Colima presenta características tan similares a las del volcán St. Helens, que en gran parte de la bibliografía moderna (Robin *et al.*, 1987; Luhr y Prestegard, 1988) se ha clasificado la destrucción del paleovolcán de Colima, como un evento del tipo del St. Helens.

En relación con lo anterior, Siebert (1984) introdujo el término de *caldera de avalancha* para las depresiones que difieren en morfología y origen de las calderas formadas por colapso, erosión o explosión. Este autor hizo un análisis comparativo en varias calderas de avalancha, dentro de las cuales incluye al St. Helens (Figura 13). Sus resultados indican que el volumen de material faltante en la estructura del volcán destruido es comparable al del material disperso en la base de éste. Como una conclusión, el mismo autor sugiere que el proceso dominante en el origen de este tipo de estructuras no sea por explosión destructiva del cono, sino por el deslizamiento masivo de una porción importante de uno de los flancos del edificio volcánico.

En este sentido, el paleovolcán de Colima puede considerarse como una estructura típica de caldera de avalancha, ya que su flanco meridional se deslizó en cuando menos dos ocasiones. En la Figura 13 están incluidos los datos de los volúmenes de las avalanchas Los Lobos y San Antonio.

EVOLUCIÓN PETROGENÉTICA

El objetivo de este capítulo no es presentar un análisis

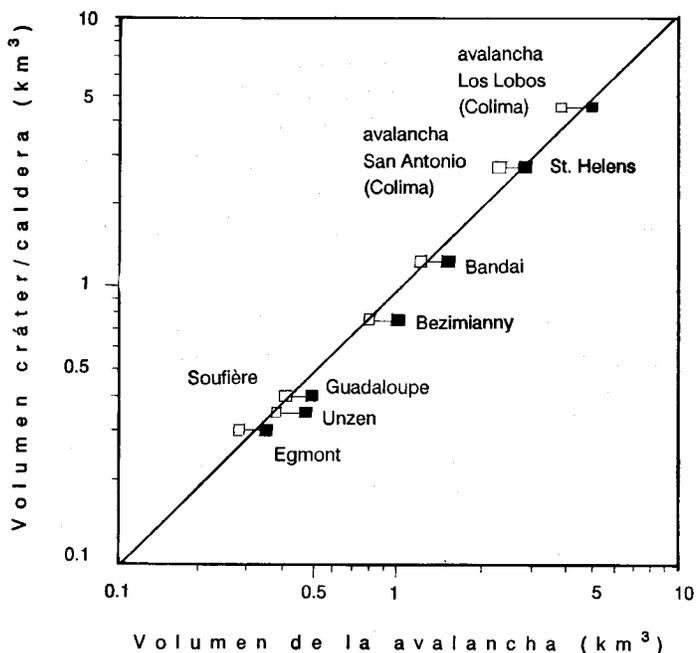


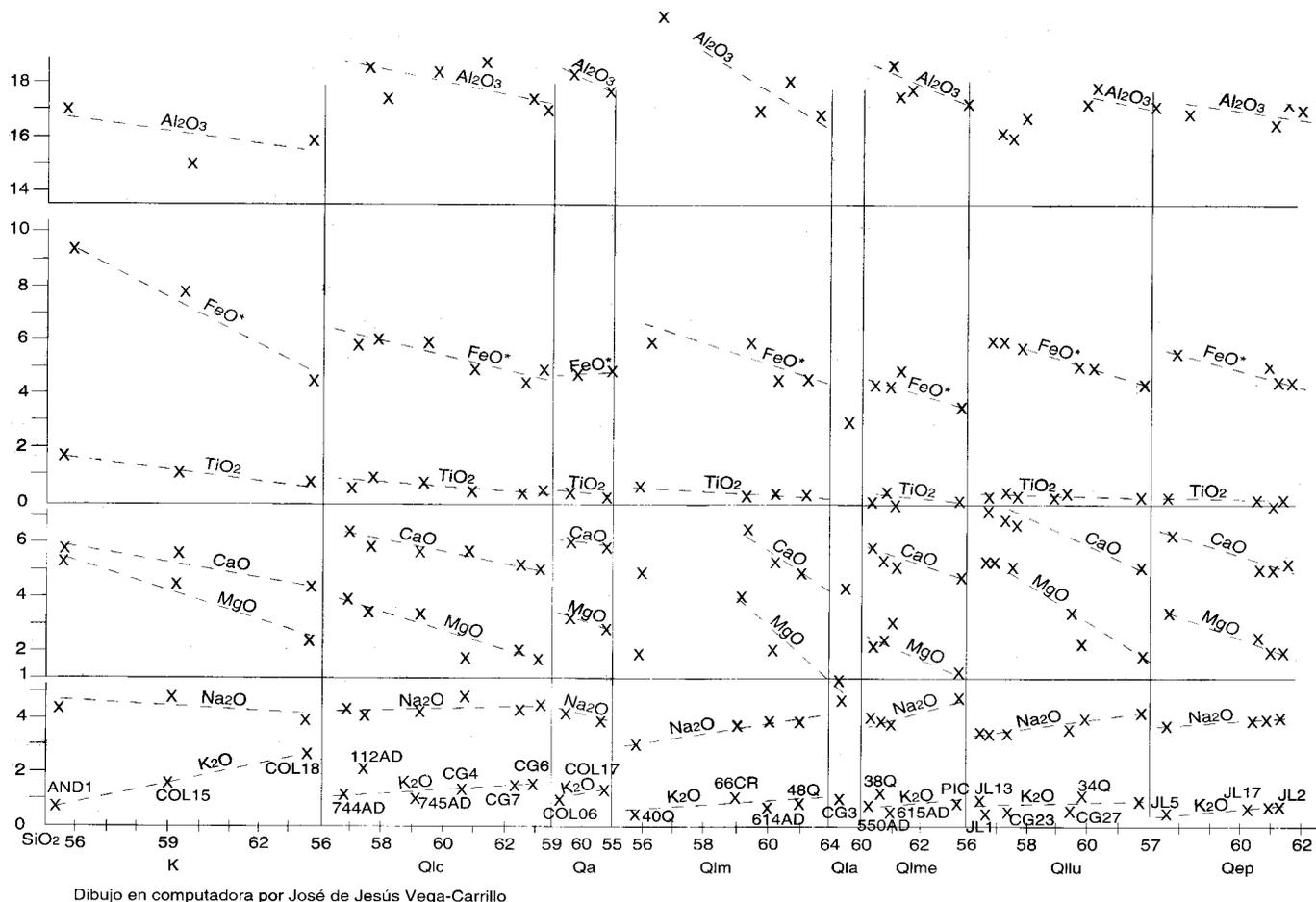
Figura 13.- Análisis comparativo de algunas calderas de avalancha. Modificado de Siebert (1984, p. 165).

■ Volúmenes medidos de depósitos de avalancha.
 □ Volúmenes calculados del cono destruido.

detallado del comportamiento geoquímico de los materiales arrojados por los volcanes de Colima, ya que esto fue tratado ampliamente con diversos métodos en estudios anteriores (Luhr y Carmichael, 1980, 1982, 1990a; Demant, 1981; Robin *et al.*, 1987, 1990). Sin embargo, se consideró necesario incluir en este estudio una interpretación generalizada de la composición geoquímica de las muestras tomadas de algunas de las unidades litoestratigráficas ya propuestas en el capítulo de Estratigrafía, en especial las que están constituidas por derrames de lava y depósitos de tefra, es decir, de material fundamentalmente juvenil.

En las Tablas 1, 3, 5, 7, 9 y 10 se observa los análisis químicos de los elementos mayores en roca total, en 31 muestras, distribuidas de la siguiente manera: tres del basamento cretácico, cinco de la andesita La Calle, dos de la formación Atenquique, cuatro de la toba Los Mazos, una de la dacita Loma Alta, cuatro de la andesita La Membrillera, seis de la andesita La Lumbre y seis de la andesita El Playón. Las avalanchas San Antonio y Los Lobos, y el lahar Cofradía, no fueron sometidos a análisis debido a la heterogeneidad de sus componentes.

Siguiendo el orden estratigráfico propuesto, las Figuras 14 y 15 muestran, de manera generalizada, un comportamiento



Dibujo en computadora por José de Jesús Vega-Carrillo

Figura 14.- Diagramas de Harker de las muestras analizadas. K, Cretácico; Qlc, andesita La Calle; Qa, formación Atenquique; Qlm, toba Los Mazos; Qla, dacita Loma Alta; Qlme, andesita La Membrillera; Qllu, andesita La Lumbre; Qep, andesita El Playón.

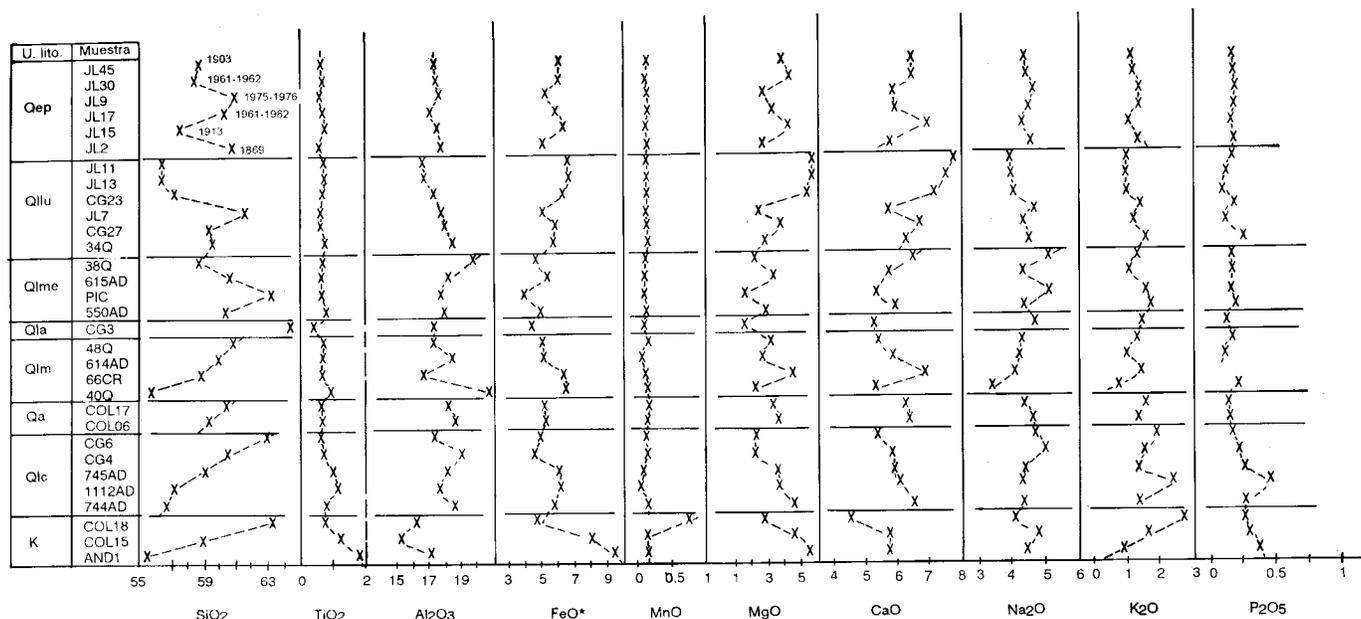


Figura 15.- Comportamiento geoquímico-estratigráfico de las muestras analizadas.

geoquímico probable para cada una de las unidades litoestratigráficas. En la Figura 14, los diagramas de Harker evidencian los cambios en el patrón de comportamiento de cada una de las unidades analizadas. De esta figura, puede deducirse que los elementos que presentan mayores variaciones entre las unidades son MgO, CaO, FeO* y Al₂O₃, aunque en general puede decirse que la evolución petrogenética de los volcanes de Colima se ha mantenido bajo patrones muy similares a lo largo de su historia.

Evidentemente, dentro de una misma unidad litoestratigráfica, se manifiestan variaciones importantes en el comportamiento geoquímico (Figura 15), ya que una sola unidad incluye diferentes eventos volcánicos, cada uno de los cuales tiene su propia caracterización geoquímica. Uno de los ejemplos más claros de esto se presenta en las erupciones históricas de 1869 y 1913 (muestras JL2 y JL15, Figura 15), incluidas dentro de la andesita El Playón, donde el decremento en SiO₂ y los incrementos en FeO*, MgO y CaO indican el carácter más básico de la erupción explosiva de 1913, respecto a la erupción precedente, cuando se formaron Los Volcancitos. Petrográficamente (Tabla 8), esta unidad está representada por una andesita de hornablenda y piroxeno, clasificación acorde con su campo de variación de SiO₂.

El cambio hacia la unidad inferior, que es la andesita La Lumbre, se manifiesta igualmente por una disminución considerable del contenido de SiO₂ y un aumento en FeO*, MgO y CaO respecto a la erupción de 1869. Sin embargo, la muestra JL7 vuelve a registrar un súbito incremento del SiO₂ (Figura 15). La Tabla 8 muestra algunos tipos de roca y sus características petrográficas para esta unidad, dentro de las que predomina la andesita de augita.

Un patrón errático similar se presenta para la andesita La Membrillera, donde una muestra—PIC—queda ubicada en el límite entre las andesitas y las dacitas, de acuerdo con su

contenido de SiO₂. Sin embargo, petrográficamente (Tabla 6) se clasificó como una andesita de olivino, la cual, de acuerdo con su análisis químico, resultó ser alta en SiO₂.

Las cuatro unidades que forman el grupo Nevado presentan patrones diferentes entre sí, con la excepción de la dacita Loma Alta, que muestra continuidad con la toba Los Mazos. Petrográficamente (Tabla 6), el domo dacítico Loma Alta se clasificó como dacita de augita. Por lo que toca a la toba Los Mazos, una de sus características es el contenido de cristales de minerales ferromagnesianos y líticos. Se considera a estas dos unidades íntimamente relacionadas entre sí, pudiendo ser la dacita Loma Alta producto del magma más evolucionado del volcán Nevado de Colima, y la fase terminal de la actividad que originó la toba Los Mazos. La unidad inmediatamente inferior—formación Atenquique—está constituida principalmente por derrames piroclásticos, material epiclástico y algunas lavas, las cuales fueron clasificadas petrográficamente (Tabla 2) como andesita de olivino. Finalmente, la andesita La Calle presenta un patrón de variación en el SiO₂, que refleja cierta evolución del magma (Figura 15); sin embargo, si se considera el MgO, CaO, K₂O y P₂O₅, el patrón de variación es más bien errático. Esta unidad tiene una amplia variación petrográfica, con tendencia a la andesita de piroxeno (Tabla 2).

Tanto en la Figura 14 como en la 10, es claramente identificable el comportamiento diferente que presentan las rocas del basamento cretácico, respecto a toda la secuencia de los volcanes de Colima. Es significativo el hecho de que la muestra más básica de todas las que fueron analizadas (AND1, Tabla 1), pertenezca a la andesita zeolitizada y constituya parte del basamento de los volcanes de Colima.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se propone informalmente 11 unidades litoestratigráfi-

cas, las cuales resultaron de la actividad sucesiva de tres estratovolcanes: el Nevado de Colima, el paleovolcán de Colima o Volcán de Fuego ancestral, y el Volcán de Colima o Volcán de Fuego actual.

De las 11 unidades, las cuatro inferiores forman el llamado grupo Nevado, que abarca más de la tercera parte del mapa geológico (Lámina 1) y, si se considera las áreas colindantes al norte del área de estudio, su volumen total sobrepasa los 500 km³.

Es muy complejo establecer un límite estratigráfico preciso entre la aparición de los primeros productos del Volcán de Colima ancestral y los últimos del Nevado de Colima. Los productos del paleovolcán de Fuego han sido agrupados en tres unidades litoestratigráficas, que tienen un volumen total aproximado de 13 km³ y yacen discordantemente sobre el grupo Nevado. Las dos unidades superiores, que son la avalancha Los Lobos y la avalancha San Antonio, fueron el resultado de dos diferentes procesos que destruyeron por completo el flanco meridional del edificio volcánico, y sus productos fueron dispersados en una vasta superficie del valle de Colima, al sur del Volcán de Colima ancestral. El último de estos eventos pudo haber ocurrido hace 4,300 años A.P. (Luhr y Prestegard, 1988).

De acuerdo con lo anterior, la historia del Volcán de Colima actual se reduciría aproximadamente a los últimos 4,000 años, tiempo durante el cual ha construido su edificio. Cuatro son las unidades litoestratigráficas que han conformado al Volcán de Colima: la andesita La Lumbre, el lahar Cofradía, la andesita El Playón y la grava Cordobán. El volumen total aproximado que se estima para las cuatro unidades es de 7 km³. De acuerdo con su geología, el Volcán de Colima ha experimentado casi todos los tipos de erupción, desde el peleano—altamente explosivo—que ha destruido partes importantes de su cráter—1818, 1913—hasta el efusivo, en el cual han sido arrojados volúmenes considerables de lava, ceniza y bombas.

La geoquímica de las rocas, según puede verse en las Figuras 14 y 15, tiende a mostrar cambios importantes en los límites de las unidades litoestratigráficas. Estos cambios son aún más evidentes en el MgO, CaO, FeO* y Al₂O₃. Sin embargo, puede afirmarse que, de acuerdo con los análisis incluidos en este estudio, la composición química promedio de las rocas de los volcanes de Colima ha sufrido pocos cambios, predominando de una manera importante las andesitas de olivino y piroxeno.

Con base en los registros históricos (Waitz, 1932; Medina-Martínez, 1983), así como en las evidencias representadas por el espesor de las capas de pómez de caída distribuidas alrededor del volcán, es posible afirmar que éste haya experimentado erupciones altamente explosivas en repetidas ocasiones y que, sin lugar a dudas, podrían ocurrir de nueva cuenta. Sin embargo, de acuerdo con las observaciones realizadas en el campo, y en especial durante el evento eruptivo de abril de 1991, el presente autor considera que el Volcán de Colima ha tenido fundamentalmente un comportamiento de tipo efusivo,

y es de esperarse que en el futuro siga siendo éste el tipo predominante de las erupciones.

El conocimiento geológico más detallado del Volcán de Colima es, sin duda alguna, necesario para el establecimiento de programas de monitoreo y mapas de riesgo cada vez más eficientes, tarea que puede aún tomar algo de tiempo a las personas implicadas actualmente en su estudio. Sin embargo, su vigilancia debe de ser permanente en aspectos físicos, como sismicidad y deformación del terreno, con el objetivo de registrar fenómenos premonitores de una probable erupción volcánica futura, y mitigar, en la mayor medida posible, las pérdidas que, de acuerdo con su intensidad, ésta provocaría.

AGRADECIMIENTOS

La idea original para llevar a cabo la investigación presente surgió de las discusiones sostenidas con el Dr. Fernando Ortega-Gutiérrez, en las que se analizó las opciones más viables para el estudio de alguno de los volcanes activos de México; se agradece de manera especial todo el apoyo y la motivación recibida de su parte.

Las múltiples revisiones críticas y acertadas sugerencias hechas por el Dr. Zoltan de Cserna, tanto en el campo como en el gabinete, fueron de fundamental importancia para la conclusión de este estudio.

Las observaciones de campo y las discusiones sostenidas con los doctores Michael F. Sheridan, James F. Luhr y Jean Christophe Komorowski, así como con Gary R. Stoops, Claus Siebe y Bruno Capaccioni, fueron muy relevantes para aclarar algunas de las ideas aquí expresadas.

El Sr. Javier Osorio dibujó el mapa geológico y las secciones estructurales, y el Sr. Esteban Monroy-Soto procesó los mapas originales para su impresión final.

Los análisis químicos de las muestras recolectadas fueron realizados por José L. Macías durante su estancia en la Universidad de Florencia, Italia, y por el Dr. Steve Nelson, de la Universidad de Tulane, E.U.A.

Sería muy largo enumerar a todas las personas que de una u otra forma intervinieron en la realización de este estudio; a todas ellas se les expresa el más sincero agradecimiento.

Los costos de esta investigación fueron sufragados en su totalidad por el Instituto de Geología de la UNAM, dentro de un proyecto global que fue, en parte, apoyado económicamente por CONACYT (núm. P221CCON892314).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, Michael; Glaze, Lori; y Sheridan, Michael, 1991, Monitoring Colima volcano, Mexico, using satellite data: *Bulletin of Volcanology*, v. 53, p. 571-574.
- Alencáster, Gloria, y Pantoja-Alor, Jerjes, 1986, *Coalcomana ramosa* (Boehm) (Bivalvia-Hippuritacea) del Albiano temprano del Cerro de Tuxpan, Jalisco: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 47, p. 33-46.
- Allan, J.F., 1986, Geology of the northern Colima and Zacoalco grabens, southwest Mexico—late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, v. 97, p. 473-485.

- Allan, J.F., y Carmichael, I.S.E., 1984, Lamprophyric lavas in the Colima graben, SW Mexico: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 88, p. 203-216.
- Allan, J.F., y Luhr, J.F., 1982, Pliocene Quaternary high-K basic intermediate volcanism in the southern Colima Graben, SW Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 14, p. 431 (resumen).
- Araña-Saavedra, Vicente, y Ortiz-Ramis, Ramón, 1984, *Volcanología*: Madrid, Editorial Rueda, 510 p.
- Arreola, J.M., 1903, The recent eruptions of Colima: *Journal of Geology*, v. 11, p. 749-761.
- 1915, Catálogo de las erupciones antiguas del Volcán de Colima: *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate (México)*, v. 32, p. 443-481.
- Bárcena, Mariano, 1887, Informe sobre el estado actual del Volcán de Colima: México, D.F., Secretaría de Fomento, 40 p.
- Capaccioni, Bruno, y Rodríguez-Elizarrarás, Sergio, 1989, Volcán de Colima—present activity inferred from stratigraphic records and geochemical data: *Bulletin of New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Continental magmatism, Abstracts*, v. 131, p. 41 (resumen).
- Cas, R.A.F., y Wright, J.V., 1987, Volcanic successions, modern and ancient: Londres, Allen and Unwin, 528 p.
- CETENAL (actual INEGI), 1982, [Hoja] Venustiano Carranza (E13-B24): México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, carta topográfica escala 1:50,000.
- Comisión Norteamericana de Nomenclatura Estratigráfica, 1984, Código estratigráfico norteamericano 1983: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Sociedad Geológica Mexicana, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 87 p.
- Constantino-Herrera, Sergio, 1966, *Geología de los volcanes de Colima*: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de licenciatura, 62 p. (inédita).
- De la Fuente, Mauricio; Cserna, Zoltan de; Mena-Jara, Manuel; y Aiken, C.L.V., 1990, Anomalías potenciales en el Volcán de Colima: Colima, Universidad de Colima, *Memorias de la Segunda Reunión Nacional "Volcán de Colima" y 1ª Reunión Internacional de Vulcanología*, p. 37 (resumen).
- Demant, Alain, 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 2, p. 172-187.
- 1979, Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 3, p. 39-57.
- 1981, L'Axe Neo-volcanique Trans-Mexicain—étude volcanologique et pétrographique; signification géodynamique: Marsella, Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille, disertación doctoral, 259 p. (inédita).
- DETENAL (actual INEGI), 1988, [Hoja] Cuauhtémoc (E13B35), Colima y Jalisco: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, carta topográfica escala 1:50,000.
- DGGTN (actual INEGI), 1981, [Hoja] Guadalajara: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección General de Geografía del Territorio Nacional, carta geológica escala 1:1'000,000.
- DGG (actual INEGI), 1982, [Hoja] Colima (E13-3): México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección General de Geografía, carta geológica escala 1:250,000.
- Díaz, Severo, 1903, Las últimas erupciones del Volcán de Colima a la luz de nuestra diaria observación: México, D.F., Sociedad Astronómica de México, Ed. Aguilar e hijos, 17 p.
- 1906, Efemérides del Volcán de Colima, según las observaciones practicadas en los observatorios de Zapotlán y Colima de 1893 a 1905: México, D.F., *Compte Rendu, Congrès Géologique International*, 10, t. 11, p. 763-960.
- Drummond, K.J., ed., 1981, Plate tectonic map of the circum-Pacific region—northeast quadrant: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, scale 1:10,000,000.
- INEGI, 1987, [Hoja] Ciudad Guzmán (E13-B25), Jalisco: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, carta topográfica escala 1:50,000.
- 1988, [Hoja] Comala (E13-B34), Colima: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, carta topográfica escala 1:50,000.
- Johnson, Christopher, 1987, A study of neotectonics in central Mexico from Landsat thematic mapper imagery: Miami, Florida, University of Miami, tesis de maestría, 111 p. (inédita).
- Lipman, P.W.; Moore, J.G.; y Swanson, D.A., 1981, Bulging of the north flank before the May 18 eruption—Geodetic data, in Lipman, P.W., y Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p.143-155.
- Luhr, J.F., y Carmichael, I.S.E., 1980, The Colima volcanic complex, Mexico—I. Post-caldera andesites from Volcán Colima: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 71, p. 343-372.
- 1981, The Colima volcanic complex, Mexico—II. Late Quaternary cinder cones: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 76, p. 127-147.
- 1982, The Colima volcanic complex, Mexico—III. Ash and scoria-fall deposits from the upper slopes of Volcán Colima: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 80, p. 262-275.
- 1990a, Petrological monitoring of cyclical eruptive activity at Volcán Colima, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 42, p. 235-260.
- 1990b, Geology of Volcán de Colima: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Boletín* 107, 101 p.
- Luhr, J.F.; Nelson, S.A.; y Carmichael, I.S.E., 1985, Active rifting in southwestern Mexico—manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump: *Geology*, v. 13, p. 54-57.
- Luhr, J.F., y Prestegard, K.L., 1985, Caldera formation at Volcán Colima, Mexico—a large, Mount St. Helens-type avalanche event 4,300 years ago: *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, v. 66, p. 411 (resumen).
- 1988, Caldera formation at Volcán Colima, Mexico, by a large Holocene volcanic debris avalanche: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 35, p. 335-348.
- Macdonald, G.A., 1972, *Volcanoes*: Nueva Jersey, Prentice-Hall, 510 p.
- Martin del Pozzo, A.L.; Romero, V.H.; y Ruiz-Kitcher, R.E., 1987, Los flujos piroclásticos del Volcán de Colima, México: *Geofísica Internacional (México)*, v. 26, p. 291-307.
- Medina-Martínez, Francisco, 1983, Analysis of the eruptive history of the Volcán de Colima, Mexico (1560-1980): *Geofísica Internacional (México)*, v. 22, p. 157-178.
- Mooser, Federico, 1961, Los volcanes de Colima, in *Fenómenos geológicos de algunos volcanes mexicanos*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Boletín* 61, p. 49-71.
- Ordóñez, Ezequiel, 1897, *Los Volcans Colima et Cebruco*: *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate (México)*, v. 11, p. 325-333.
- Ortiz, S.G., 1944, La zona volcánica "Colima" del Estado de Jalisco: Guadalajara, Universidad de Guadalajara, Instituto de Geografía, 44 p. y 1 mapa.
- Páez-Juárez, Vicente, y Pantoja-Alor, Jerjes, 1990, Estudio geomorfológico de la región de Tamazula de Gordiano, Estado de Jalisco, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, *Reunión Nacional de Geomorfología*, 2, p. 20-21 (resumen).
- Pantoja-Alor, Jerjes, y Estrada-Barraza, Samuel, 1986, Estratigrafía de los alrededores de la mina de hierro de El Encino, Jalisco: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 47, p. 1-15.
- Robin, Claude; Camus, Guy; y Gourgand, Alain, 1991, Eruptive and magmatic cycles at Fuego de Colima volcano (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 45, p. 209-225.
- Robin, Claude; Komorowski, J.C.; Boudal, Christian; y Mossand, Philippe, 1990, Mixed-magma pyroclastic surge deposits associated with debris avalanche deposits at Colima volcanoes, Mexico: *Bulletin of Volcanology*, v. 52, p. 391-403.
- Robin, Claude; Mossand, Philippe; Camus, Guy; Cantagrel, J.M.; Gourgand, Alain; y Vincent, P.M., 1987, Eruptive history of the Colima Volcanic Complex (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 31, p. 99-113.
- Rodríguez-Elizarrarás, S.R., 1991, Geología del Volcán de Colima, estados de Jalisco y Colima: México, D.F., Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 103 p. (inédita).

- Rodríguez-Elizarrarás, S.R.; Siebe, Claus; Komorowski, J.C.; Espíndola, J.M.; y Saucedo, Ricardo. 1991. Field observations of pristine block-and ash-flow deposits emplaced April 16-17, 1991 at Volcán de Colima. Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 48, p. 399-412.
- Sartorius, Charles. 1871. Eruption of the volcano of Colima in June, 1869: *American Journal of Science*, v. 102, p. 381-383.
- Serpa, Laura; Cassandra, Katz; y Skidmore, Charles. 1990. Potential field studies south of Volcán de Colima: Colima, Universidad de Colima. *Memorias de la Segunda Reunión Nacional "Volcán de Colima", 1ª Reunión Internacional de Vulcanología*, p. 36 (resumen).
- Siebert, Lee. 1984. Large volcanic debris avalanches; characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 22, p. 163-197.
- Skidmore, Charles. 1988. A geophysical and tectonic study of the Colima graben, Mexico: Nueva Orleans, University of New Orleans, tesis de maestría, 89 p. (inédita).
- Sobota, Félix. 1986. Estudio sobre el ciclo de la actividad del Volcán de Colima, Jalisco en los años 1894-1966: Guadalajara, Gobierno del Estado de Jalisco, 53 p.
- Stoops, G.R., y Sheridan, M.F., 1990. Hazards related to giant volcanic debris avalanches from Volcán de Colima and Nevado de Colima, Mexico: Colima, Universidad de Colima, *Segunda Reunión Nacional "Volcán de Colima", 1ª Reunión Internacional de Vulcanología*, p. 15-16 (resumen).
- Thorpe, R.S.; Gibson, I.L.; y Vizcaíno, J.S., 1977. Andesitic pyroclastic flows from Volcán Colima: *Nature*, v. 265, p. 724-725.
- Ui, Tadahide. 1983. Volcanic dry avalanche deposits—identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 18, p. 135-150.
- Voight, Barry; Glicken, Harry; Janda, R.J.; y Douglass, P.M., 1981. Catastrophic rockslide avalanche of May 18. *in* Lipman, P.W., y Mullineaux, D.R., eds., *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*. Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 347-378.
- Waitz, Paul. 1906. Le Volcán de Colima: México, D.F., *Congreso Geológico Internacional*, 10. Guide des Excursions, v. 13, 28 p.
- . 1915. Der gegenwärtige Stand der mexikanischen Vulkane und die letzte Eruption des Vulkans von Colima (1913): *Zeitschrift für Vulkanologie*, v. 1, p. 247-274.
- . 1921. "Nubes ardientes" observadas en las erupciones del Jorullo (1759), del Ceboruco (1870) y del Colima (1913): *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate (México)*, v. 37, p. 267-313.
- . 1932. Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima: *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate (México)*, v. 53, p. 349-384.

Manuscrito presentado: 30 de noviembre de 1992.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 4 de marzo de 1993.

Manuscrito aceptado: 15 de marzo de 1993.