Publicado en línea el 7 de septiembre de 2011
Disponible en http://satori.geociencias.unam.mx/

Estudio aeromagnético del complejo volcánico de Colima, occidente de México – implicaciones tectónicas y estructurales

Héctor López-Loera[1,*], Jaime Urrutia-Fucugauchi[2] y Luis Alva-Valdivia[2]

[1] División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., Camino a la Presa San José No. 2055. Col. Lomas 4ª. Secc, San Luis Potosí, S.L.P., México.
[2] Laboratorio de Paleomagnetismo y Geofísica Nuclear, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D,F., México.
** hlopezl@ipicyt.edu.mx*

EN PRENSA

RESUMEN

Se reporta la interpretación cualitativa y cuantitativa de anomalías aeromagnéticas del complejo volcánico de Colima (CVC) y sus alrededores. La zona se caracteriza por anomalías magnéticas de distintas amplitudes y longitudes de onda asociadas con estructuras volcánicas y cuerpos intrusivos, incluyendo al CVC. Se identifican 24 dominios aeromagnéticos definidos por patrones característicos de anomalías en un área de aproximadamente 11,500 km² alrededor del CVC. El Volcán de Colima y el Nevado de Colima se caracterizan por anomalías dipolares de gran amplitud. Se investiga la estructura profunda del complejo volcánico utilizando un modelo magnético dimensional 2¾-D, encontrando que la fuente asociada a las anomalías de los volcanes se relaciona con una posible cámara magmática de forma alargada, con una longitud mayor a los 6.8 km en dirección N-S y espesor máximo de 5.6 km. En el Volcán de Colima, ésta se localiza a una profundidad de 4.8 km. Este cuerpo se extiende por una distancia del orden de 5.6 km hacia el sur del CVC con un espesor promedio del orden de 0.54 km. Bajo el volcán Nevado de Colima se interpreta una posible cámara magmática colapsada de forma alargada con una longitud en dirección N-S mayor a 5.6 km y con espesor máximo de 1.2 km con una profundidad del orden de los 5.2 km bajo el cráter del Nevado. Se documentan, por primera vez, nuevas estructuras geológicas asociadas a anomalías magnéticas sepultadas por productos volcánicos, como fallas y cuerpos intrusivos. En la mayor parte del mapa magnético reducido al polo, se observan anomalías monopolares de grandes dimensiones, amplitudes altas y longitudes de onda largas, asociadas a rocas intrusivas. A 47 km al NW de los volcanes Colima y Nevado de Colima se puede apreciar un cinturón formado por tres de estas anomalías. En la zona también existe una serie de anomalías magnéticas relacionadas con la presencia de yacimientos de mineral de hierro, como la mina El Encino ubicada a 48 km al SE y el área mineralizada de la Sierra de Manantlán a 42 km al ESE del volcán de Colima.

Palabras clave: anomalías aeromagnéticas, modelo aeromagnético, mapeo geológico, tectónica, complejo volcánico de Colima, México.

ABSTRACT

Results of qualitative and quantitative interpretation of aeromagnetic anomalies over the Colima volcanic complex (CVC) and surrounding areas are presented. The area is characterized by magnetic anomalies of distinct amplitude and wavelength associated with volcanic structures and intrusive bodies, including the CVC. We identified 24 aeromagnetic domains in an area of 11,500 km² around the CVC.

We identify, for the first time, new geological structures buried under volcanic products, like faults and intrusive bodies. High amplitude magnetic dipolar anomalies characterize the volcanic structures of Colima and Nevado de Colima volcanoes. CVC deep structure was investigated by using a 2¾ D magnetic model, finding that the source is related to a possible magmatic chamber of elongated shape, >6.8 km long, in north-south strike with maximum thickness of 5.6 km, which is located at 4.8 m depth beneath the Colima volcano. The body extends to 5.6 km south of the Colima volcano, with average thickness of about 0.54 km. Under Nevado de Colima volcano, we interpreted a collapsed magmatic chamber, with elongated shape, >5.6 km long and 1.2 km of maximum thickness at a depth of around 5.2 km below the Nevado summit.

In most of the reduced to the pole magnetic anomaly map, we observed large monopolar anomalies, high amplitude, and long wavelengths associated to the intrusive bodies. Three of these anomalies form a 47 km long belt to the NW of the CVC. There are several magnetic anomalies related to iron-ore deposits, i.e., El Encino mine (48 km SE of CVC) and Sierra de Manantlán (42 km ESE of CVC).

Key words: magnetic anomalies, aeromagnetic modeling, geological mapping, tectonics, Colima volcanic complex, Mexico.

EN PRENSA

INTRODUCCCIÓN

Desde que se realizaron los primeros estudios aeromagnéticos a principios del siglo pasado en globos aerostáticos (Heiland, 1963) se han reportado avances en la instrumentación y plataformas de observación que han permitido utilizar las nuevos métodos en una gran variedad de situaciones y objetivos. Los estudios aeromagnéticos se han usado de manera intensiva en el estudio de regiones volcánicas en gran parte del mundo (*e.g.*, Hagiwara, 1965; Finn y Williams, 1987; Hildenbrand *et al*., 1993; Gibson and Milligan, 1998; Fedi *et al*., 1998; López-Loera y Urrutia-Fucugauchi, 1999; Okuma *et al*., 2009; López-Loera *et al*., 2010), en donde han demostrado su utilidad para delinear las estructuras volcánicas y su gran potencial.

El procesamiento de la información aeromagnética ha tenido un gran avance gracias al desarrollo de programas computacionales y algoritmos que facilitan el manejo de gran cantidad de datos y la utilización de procesos y filtrados que permiten eliminar o resaltar rasgos que facilitan la interpretación, pudiendo observar la información de fondo, relacionada con la estructura, y eliminando ruido superficial de una manera relativamente fácil y rápida.

La teoría de los métodos potenciales (p. ej., Blakely, 1995, Telford *et al.*, 1976) aplicada a la interpretación de estudios de geofísica aplicada ha permitido que la aeromagnetometría se utilice para estudiar la reactivación de fallas (Meridee, 1995); zonas de falla (Blakely *et al.*, 2002); evaluar las propiedades magnéticas en volcanes antes y después de erupciones (Finn y Williams, 1987; Nakatsuka et al, 2009); establecer la existencia de cinturones volcanomagnéticos (Honkura, 1991); estudiar las relaciones con la topografía (Flanagan y Williams, 1982; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2002, Nakatsuka *et al.*, 2009; Okuma *et al.*, 2009). Los métodos magnéticos aéreos han permitido delinear la extensión lateral de estructuras como rifts, cimas de calderas, bocas de cráteres y fisuras de ventilación (Hildenbrand, et al., 1993; López-Loera *et al.*, 2008); asimismo, han permitido investigar y localizar cuerpos intrusivos en el subsuelo que no tienen manifestaciones superficiales (Williams y Finn, 1987). Con estudios de magnetismo marino se han desarrollado trabajos sobre procesos de fuerte serpentinización en el manto superior en el sur de México (Manea y Manea, 2008), también se ha podido, con estudios marinos, delimitar cráteres de impacto (Rebolledo-Vieyra *et al*., 2010) y conocer y modelar estructuras geológicas bajo la Bahía de Banderas, Jalisco (Alvarez *et al*., 2010).

El objetivo principal de la investigación aeromagnética en el complejo volcánico de Colima (CVC) fue caracterizar y analizar los patrones de anomalías aeromagnetométricas y determinar las relaciones estructurales del Volcán de Colima con sus áreas circunvecinas, así como localizar posibles de estructuras volcánicas (Figura 1). En la mayoría de los volcanes activos en el mundo se han realizado estudios aeromagnéticos para evaluar las propiedades magnéticas, así como para conocer las estructuras geológicas asociadas a los volcanes (Finn y Williams, 1987; Nakatsuka et al, 2009; Honkura 1991, Hildenbrand, et al., 1993; López-Loera et al., 2008), sin embargo en el Volcán de Colima no se había realizado un análisis aeromagnético hasta el presente estudio.

La zona de estudio se ubica en la porción occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano, en lo que se conoce como Graben Central de Colima y en la porción sur del rift de Colima (Allan, 1986; Ferrari *et al*., 2000; Ferrari, 2000). La zona investigada se localiza al sur de la triple unión de los grábenes o rifts de Colima (dirección N-S), Tepic–Zacoalco (NW-SE) y Chapala (E-W). En la imagen de satélite (Figura 1) se puede observar cómo los dos primeros rifts, el de Colima y Tepic-Zacoalco, limitan al E y al N, respectivamente, al bloque de Jalisco, mostrándose las direcciones de los lineamientos estructurales mayores con líneas blancas discontinuas. También se observa en la porción W de México la interacción que existe entre las placas de Rivera, Pacífico y Cocos.

En la zona central del complejo volcánico de Colima

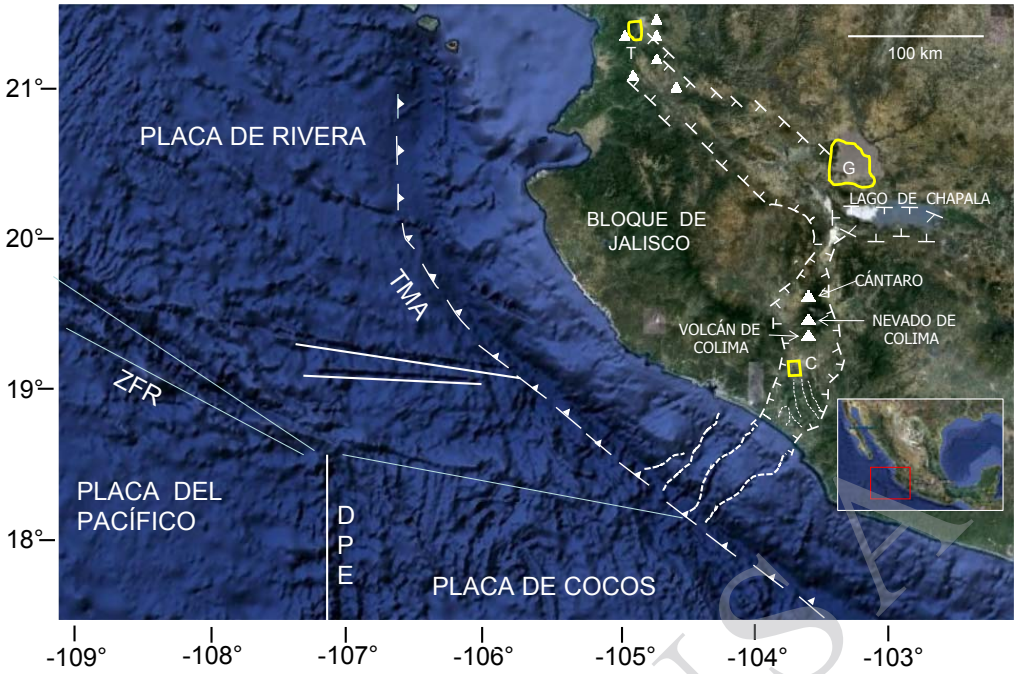


Figura 1. Imagen de satélite del occidente de México en donde se observa la triple unión de los rifts de Colima (dirección N-S), de Tepic-Zacoalco (dirección NW-SE) y Chapala (dirección E-W). En la porción SW de la imagen se observa la interacción que existe entre las placas de Rivera, Pacífico y Cocos. Los triángulos blancos representan los centros volcánicos más importantes del área. Los lineamientos estructurales mayores indicados por las líneas blancas discontinuas muestran las direcciones de las depresiones tectónicas. En la porción central del rift o graben de Colima se pueden observar los volcanes que constituyen el complejo volcánico de Colima; Cántaro, Nevado y Colima. G: Guadalajara; T: Tepic; C: Colima; TMA: Trinchera Mesoamericana; DPE: Dorsal del Este del Pacífico; ZFR: zona de fractura de Rivera. El cuadro en color rojo marca el área del levantamiento aeromagnético.

se localizan tres grandes estratovolcanes alineados de Norte a Sur: Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima (Figura 1). Estos tres volcanes son evidencia de migración de la actividad volcánica de norte a sur (Luhr, 1993), la cual posiblemente se extiende hasta las estructuras dómicas denominadas "Hijos del Volcán" (Luhr y Carmichael, 1990; Rodríguez-Elizarrarás, 1992).

COMPLEJO VOLCÁNICO DE COLIMA

El complejo volcánico de Colima (CVC), localizado en el extremo occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano, está estructural y topográficamente controlado por el rift de Colima, el cual tiene una orientación norte-sur y consiste de una gran fosa tectónica (Luhr y Carmichael, 1990). Hacia el sur, el rift constituye el graben de Colima, el cual contiene a los estratovolcanes mencionados de composición principalmente andesítica: volcán El Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima. Estos conos compuestos son progresivamente más jóvenes de norte a sur (Figura 2).

El volcán El Cántaro es un complejo de domos y derrames de lava de composición calcialcalina que varía desde andesita hasta dacita. Su edad por K-Ar oscila entre 4.6 a 0.6 Ma (Allan, 1986). Cortés-Cortés *et al.*(2005) reportan que la actividad del CVC se inició con la formación de este volcán, cuya actividad inició hace 1.7 Ma y terminó hace 0.95 Ma.

Después de la extinción de El Cántaro, se formó a 17 km hacia el sur el volcán Nevado de Colima, de similar composición (Luhr y Carmichael, 1990). El desarrollo del Nevado incluyó varios eventos formadores de calderas. La edad de las unidades tiene un rango entre 0.53 y 0.08 Ma (Luhr y Carmichael, 1990). La evolución del Nevado de Colima ha sido dividida en tres etapas, o eventos formadores de caldera (Robin *et al.*, 1987). La etapa 2 es un colapso del cono del tipo avalancha Monte Santa Helena, con un volumen del orden de los 22–23 km^3 (Stoopes y Sheridan, 1992). La gigantesca avalancha de escombros se extendió ~120 km hacia el Sur, hasta la costa del Océano Pacífico. Estudios recientes (Capra, 2000) consideran que estos depósitos no alcanzaron esta distancia como depósitos primarios, sino que son producto de un lahar secundario. Una característica más de este volcán, son explosiones mayores y eventos de avalancha, incluida una de escombros volcánicos también del tipo Monte Santa Helena (Stoopes y Sheridan, 1992) que formó una caldera de 5 km de diámetro en forma de herradura. Para este evento, Robin *et al.*(1987) reportaron fechas de radiocarbono de 9,370 ± 400 años antes del presente (A.P.), para una muestra de carbón de un depósito piroclástico arriba de la avalancha. Luhr y Prestegaard (1988) encontraron una edad de 4,280 ± 110 años A.P. para una muestra de carbón subyacente al depósito de avalancha

EN PRENSA

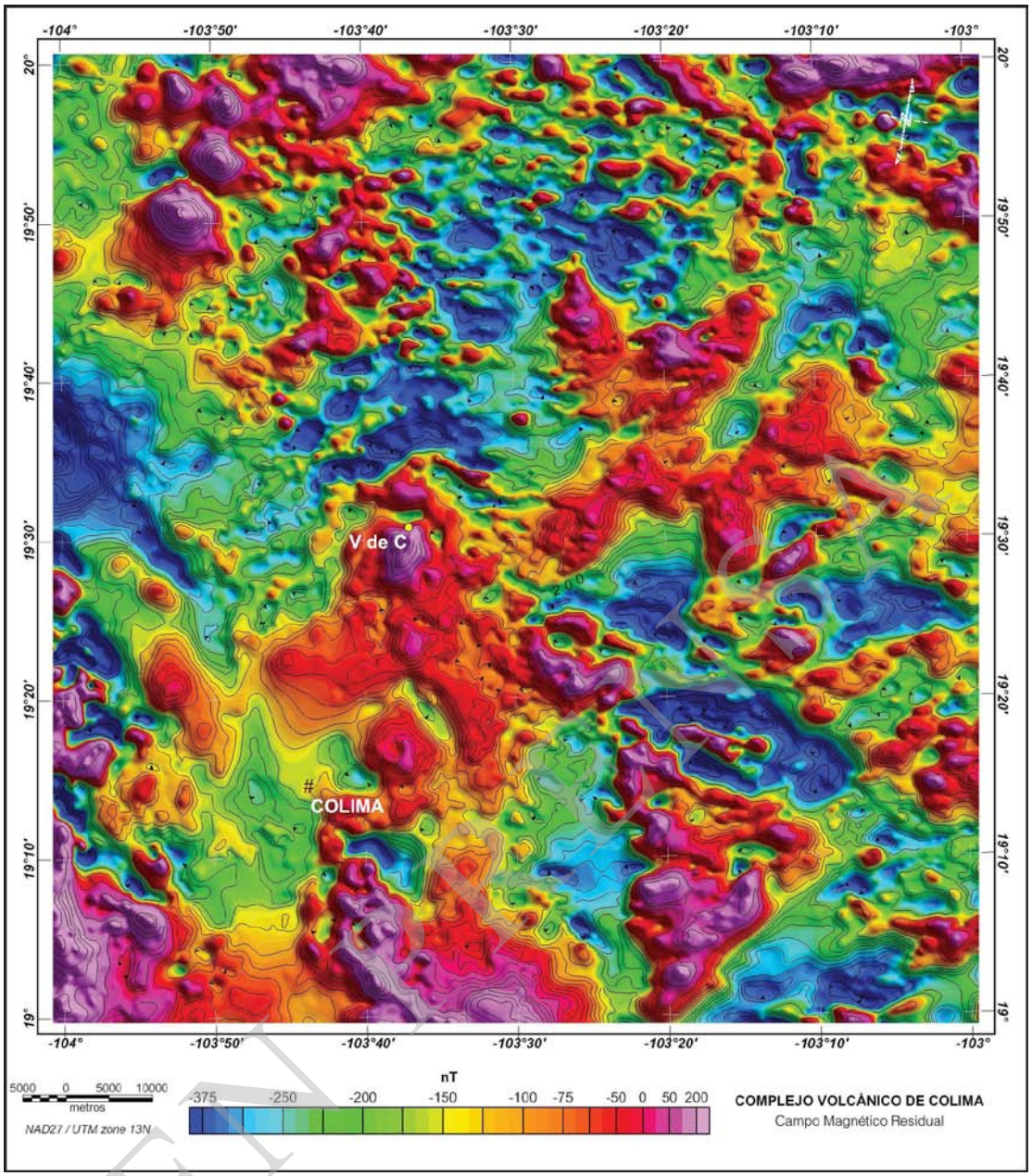


Figura 2. Mapa de la configuración del campo magnético residual del complejo volcánico de Colima. Obsérvese en la porción central la anomalía aeromagnética asociada con el Volcán de Colima (V de C) y en línea recta hacia el sur las anomalías de Quesería y El Trapiche, que se localiza a 10 km al NE de la Cd. de Colima. Hacia el NW del mapa se observan anomalías de características monopolares asociadas con intrusivos. Los contornos de las líneas de isovalores están espaciadas cada 20 nT.

de escombros. Komorowski *et al.*(1996) sugieren una edad de 2,500 años para este último evento de colapso del edificio. Este autor y colaboradores consideran que los volcanes Colima y Nevado de Colima se han colapsado al menos 12 veces en los últimos 45,000 y que probablemente nueve de los colapsos han generado avalanchas hacia el sur. Ellos dataron cinco avalanchas bien definidas con edades que van desde los 18,553 hasta los 2,565 años A.P. Después de esta última avalancha, el cono andesítico empezó a crecer dentro de la caldera, culminando con la formación del volcán de Fuego o de Colima.

El Volcán de Colima está localizado a 19.514°–19.58° N y 103.62°–103.626°. Es el cono compuesto más joven y se ubica a 30 km al sur de la ciudad de Colima. Éste tiene una elevación de 3,850 m sobre el nivel del mar, se ubica a 175 km al norte de la trinchera Mesoamericana y está a 5.5 km al sur del volcán Nevado de Colima. Su actividad probablemente inició al cesar la actividad del Nevado, hace aproximadamente 50,000 años (Robin *et al.*, 1987).

En el complejo volcánico de Colima y en el rift de Colima se han realizado numerosos estudios describiendo su geología (Luhr y Carmichael, 1980, 1981, 1990; Allan

y Carmichael, 1984; Allan, 1985, 1986); petrología (Luhr y Carmichael, 1980, 1981, 1982, 1990; Robin *et al.*, 1990; Connor *et al.*, 1993; Macías *et al.*, 1993; Luhr, 2002; Mora *et al.*, 2002); eventos eruptivos (Waitz, 1906, 1932; Mooser, 1961; Thorpe *et al.*, 1977; Allan, 1986; Robin *et al.*, 1987; Luhr y Carmichael, 1990; Rodríguez-Elizarrarás, 1992; Stoopes y Sheridan, 1992; Komorowski *et al.*, 1996; Saucedo *et al.*, 2002); ciclicidad de los eventos eruptivos (Luhr, 1981; Medina-Martínez, 1983; Robin *et al.*, 1991, Bretón *et al.*, 2002); paleomagnetismo de las unidades volcánicas (Clement *et al.*, 1993; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1997; López-Loera y Urrutia Fucugauchi, 1999); posibilidades geohidrológicas (López-Loera y Gutiérrez-Pineda, 1977); estudios geofísicos (Allan, 1985; Aubert y Lima, 1986; Urrutia-Fucugauchi y Molina-Garza, 1992; Bandy *et al.*, 1993, 1995; Serpa *et al.*, 1992; Medina-Martínez *et al.*,1996; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1999; López-Loera y Urrutia-Fucugauchi, 1999; López-Loera *et al.*, 1996, 2010); imágenes de satélite (Abrams *et al.*, 1991; Álvarez *et al.*, 1993, Galindo y Domínguez, 2002); modelos de explosividad (De la Cruz-Reyna, 1993); geomorfología (Lugo-Hubp *et al.*, 1993, Norini *et al.*, 2010); sismicidad (Lermo *et al.*, 1993; Zobin *et al.*, 2002), deformación (Murray 1993; Murray y Woller, 2002; Ramírez-Ruiz *et al.*, 2002), composición química e isotópica (Taran *et al.*, 2002) y flujos de avalancha (Capra y Macías, 2002; Navarro-Ochoa *et al.*, 2002), y tectónica (Rosas-Elguera et al., 1986).

Nixon (1982) propone que, en una etapa temprana, el rift de Colima estuvo relacionado con la zona de subducción de la placa Rivera. Por su parte, Serpa *et al.* (1989) sugiere que debido a la subducción oblicua de una de las placas que convergen en el área se tiene un rompimiento desde la costa hacia la región de Zacoalco. Luhr *et al.*(1985) proponen que el graben de Colima marca una zona de incipiente expansión de la Dorsal del Pacifico Este.

Tomando como base un estudio gravimétrico y magnético realizado por Serpa *et al.*(1992) en la porción sur del graben de Colima, se considera que no hay evidencias de tectonismo tensional activo al sur de la ciudad de Colima. Hacia el norte, esos autores interpretan la gravimetría como producida por un basamento extensional existente hace 4,000 años, cuando tuvo lugar la erupción explosiva del Volcán de Colima. El rasgo dominante obtenido por Serpa *et al.* (1992) de los datos gravimétricos es un gradiente de tendencia regional que decrece hacia el noreste. Bandy *et al.* (1993) combinan un levantamiento gravimétrico en el área costera con datos disponibles y estiman un basamento de más de 100 km de longitud compuesto por dos pequeños grábenes separados por un delgado horst. Estudios posteriores realizados por estos mismos autores (Bandy *et al.*, 1995) les permitió encontrar una zona de baja densidad a profundidades entre 30 y 100 km al norte de los volcanes Colima y Nevado de Colima, en la porción central del graben de Colima. Este rasgo es atribuido al calentamiento por convección térmica en respuesta a la divergencia a lo largo de la frontera de la subducción de las placas de Rivera y Cocos. Medina-Martínez *et al.*(1996), con una base de datos obtenida de PEMEX, realizaron el análisis de un cuadrángulo ubicado en el centro y sur del CVC y localizaron anomalías gravimétricas de Bouger que muestran un decremento en la tendencia regional hacia el NE, al igual que lo indicaba Serpa *et al.*(1992). La diferencia en el área de Medina-Martínez *et al.*(1996) fue de 170 mGales contra 135 mGales obtenido por Serpa *et al.*(1992). Medina-Martínez *et al.*(1996) modelaron la anomalía gravimétrica asociada a los volcanes como un cuerpo de más de 2 km de ancho y más de 5 km de largo, estando el techo del cuerpo cerca de 1.5 km bajo el nivel del mar, y lo interpretan como la posible cámara magmática de los volcanes.

La zona del graben de Colima es una zona altamente sísmica, en donde la mayoría de los temblores está asociada a los procesos de subducción (Reyes y Jiménez, 1996), aunque, en los periodos de actividad volcánica, la mayoría de los eventos sísmicos muestra algunas características de interés, como que la mayoría de los focos de los temblores se localizan al norteste del cráter del Volcán de Colima, algunos de ellos a profundidades del orden de los 7 a 11 km bajo el cráter, presentando una región sísmicamente quieta entre los 4 y 7 km bajo el nivel del cráter (Nuñez-Cornú *et al.*, 1994).

En un estudio realizado por Luhr (2002) sobre la petrología y geoquímica de los flujos de lava del Volcán de Colima emitidos durante 1991 y 1998-1999, y con base en los cambios en la composición mineralógica y química de roca total durante los dos eventos claramente definidos en los ciclos eruptivos históricos de 1818 a 1913 y de 1913 al presente, reporta que en el primer ciclo (1818-1913), las rocas eran andesitas máficas con ~58% SiO_2, cambiando a flujos de lava en bloque andesíticos con ~61% SiO_2 en 1961-1962 y 1975-1976. Menciona Luhr (2002) que a partir de estos últimos eventos se inició una tendencia hacia un contenido menor de SiO_2, alcanzando un mínimo en 1981, probablemente por un ascenso de magma máfico hacia el reservorio andesítico bajo el volcán. Asimismo reporta que a partir de 1981 las lavas andesíticas han venido siendo progresivamente más ricas en SiO_2 desde las erupciones de 1991 y 1999. Por su parte Mora *et al.*(2002) reportan que durante la actividad de 1998-2000 del Volcán de Colima se generaron una serie de flujos de lava y bloques, así como flujos de ceniza de composición andesítica con contenidos de SiO_2 entre 59 y 61 %.

LEVANTAMIENTO AEROMAGNÉTICO

El estudio aeromagnético comprendió de la coordenada 19° a la 20° latitud Norte y de la 103° a 104° longitud Oeste, con una superficie del orden de 11,568 km^2 (104.5 km × 110.7 km). El levantamiento aeromagnético fue realizado por el Consejo de Recursos Minerales (CRM; actualmente

EN PRENSA

Servicio Geológico Mexicano, SGM) con la finalidad de cubrir la República Mexicana con vuelos aeromagnéticos sistemáticos que permitieran investigar las condiciones geológicas y estructurales del subsuelo que permitan seleccionar zonas prospectivas, principalmente para minería.

Nuestro mapa de anomalías aeromagnéticas representa una integración de varias campañas aeromagnéticas (1963,1983 y 1999) llevadas a cabo utilizando diversos instrumentos. En el año de 1963 el vuelo se realizó con un avión Twin Pioneer Scottish, utilizando un magnetómetro Gulf Mark III con sensibilidad menor a 1 nT, con líneas de vuelo cada 1000 m y a una altura sobre el nivel del terreno de 300 m en promedio y con un rumbo NE-SW. La identificación de las trayectorias de vuelo se efectuó mediante el sistema de navegación visual. Para el posicionamiento de las líneas de vuelo se utilizó una cámara fotográfica Aeropath As-5, 35 mm y la altura fue controlada mediante un radar altímetro RT/APN-1.

El vuelo de 1983 se realizó con un avión Islander BN-B27, con líneas de vuelo NE-SW y altura promedio sobre el nivel del terreno de 300 m. En este vuelo se utilizó un magnetómetro Geometrics G-803 con sensibilidad de 0.25 nT. Para el posicionamiento de las líneas de vuelo se utilizó la cámara fotográfica Automax G-2 (35mm) y la altura fue controlada mediante radar altímetro Collins ALT-50.

Para la campaña de 1999 se utilizó el avión Islander BN2-B27, utilizando un magnetómetro Scintrex CS-2 de vapor de cesio con resolución de 0.001 nT con sensor fijo. Las líneas de vuelo fueron cada 1000 m con un rumbo N-S y una altura promedio de 300 m sobre el nivel del terreno. El posicionamiento de las trayectorias de vuelo se hizo mediante el sistema de navegación por satélite GPS, utilizando el módulo PNAV 2001 y procesador Novatel y como estación base un magnetómetro GEM-System GSM-19, con sensor Overhauser con sensibilidad de 0.01 nT. (Pascacio-Toledo, 2001).

El proceso realizado para la generación del mapa original fue el método de empalme de sutura, para los años 1963,1983 y 1999. Para los vuelos de los años de 1963 y 1983 se utilizó una compilación analógica y para la sustracción del campo geomagnético internacional de referencia se utilizaron los IGRF de 1965 y 1985, respectivamente. La digitalización de la información aeromagnética fue analógica. Para los vuelos de 1999 se realizó una compilación digital, corrección por movimiento del avión (compensación magnética), corrección por variación diurna y sustracción del campo geomagnético internacional de referencia (IGRF) de 1995.

La información digital se integró y procesó mediante la generación de una rejilla de datos con un tamaño de celda de 200 m × 200 m. Los procesos que se aplicaron a la información magnética consistieron en corrección por deriva y líneas de control, corrección por movimiento del avión (compensación magnética) y micro-nivelación (Figura 2).

Los procesos anteriores fueron realizados por el CRM. Los procesos posteriores que se realizaron a los datos, como reducción al polo, derivadas verticales, continuaciones ascendentes y modelado, los realizamos con el sistema de análisis y procesamiento de datos Oasis Montaj de Geosoft y para el modelado magnético usamos el software de GM-SYS. En los procesos se aplicaron algoritmos matemáticos para el cálculo de reducción al polo (Baranov y Naudy, 1964), primera y segunda derivada (Telford *et al.*, 1976) y continuaciones analíticas ascendentes (Henderson y Zietz, 1949; Henderson, 1970; Blakely, 1995).

También se construyó un mapa de elevación digital con el sistema denominado Geomodelos de Elevación (GEMA) con datos basados en modelos 1:50,000, con una resolución de 50 m, para el complejo volcánico de Colima, el cual muestra para el Nevado de Colima una estructura volcánica de grandes dimensiones en relación con el Volcán de Colima, se observan grandes zonas de barrancas, así como la zona del volcán paleo-Fuego del Colima caracterizada por un fragmento de anillo del cráter que aún se puede observar hacia el norte de la estructura volcánica actual (Figura 3).

PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Las propiedades magnéticas en el complejo volcánico de Colima han sido reportadas por Urrrutia-Fucugauchi *et al.*(1997), Connor *et al.*(1993), López-Loera y Urrutia-Fucugauchi (1999). El segundo trabajo incluye muestras del domo del cráter. Susceptibilidades magnéticas de cinco muestras que esos autores consideran representativas están en un rango entre 2.61×10^{-5} y 8.16×10^{-5}, corregidas por masa en unidades SI. Los datos correspondientes a la intensidad de magnetización remanente dan de 1.08 a 3.84 A/m. Tres muestras presentan temperaturas de Curie mayores que 450 °C a 575 ° C, y dos muestras presentan amplio rango de temperaturas de Curie bajas.

López-Loera y Urrutia-Fucugauchi (1999) reportan las propiedades magnéticas de 50 muestras colectadas a lo largo del transecto entre Atenquique y El Playón. Esta es una sección con una dirección general este (Atenquique)-oeste y alcanza la porción central del Volcán de Colima (El Playón). Las propiedades magnéticas de los fragmentos volcánicos en los escombros volcánicos del Nevado de Colima y del Volcán de Colima presentan un gran rango de variación. Las susceptibilidades magnéticas de las avalanchas del Nevado de Colima varían entre 3.66×10^{-5} y 10.64×10^{-5} SI, con una media de 7.23×10^{-5} SI. Las intensidades de magnetización remanentes varían de 0.55 a 1.86 A/m. Muestras de roca provenientes de las avalanchas más recientes del Volcán de Colima muestran rangos para la susceptibilidad magnética e intensidad de remanencia de 1.28×10^{-5} a 8.36×10^{-5} SI (media: 5.35×10^{-5} SI) y 0.73–3.69 A/m (media: 2.52 A/m), respectivamente.

Las lavas andesíticas del Nevado de Colima tienen rangos de susceptibilidad e intensidad de remanencia de 2.5×10^{-5}–10×10^{-5} SI (media: 6.2×10^{-5} SI) y 0.37–7.33 A/m

EN PRENSA

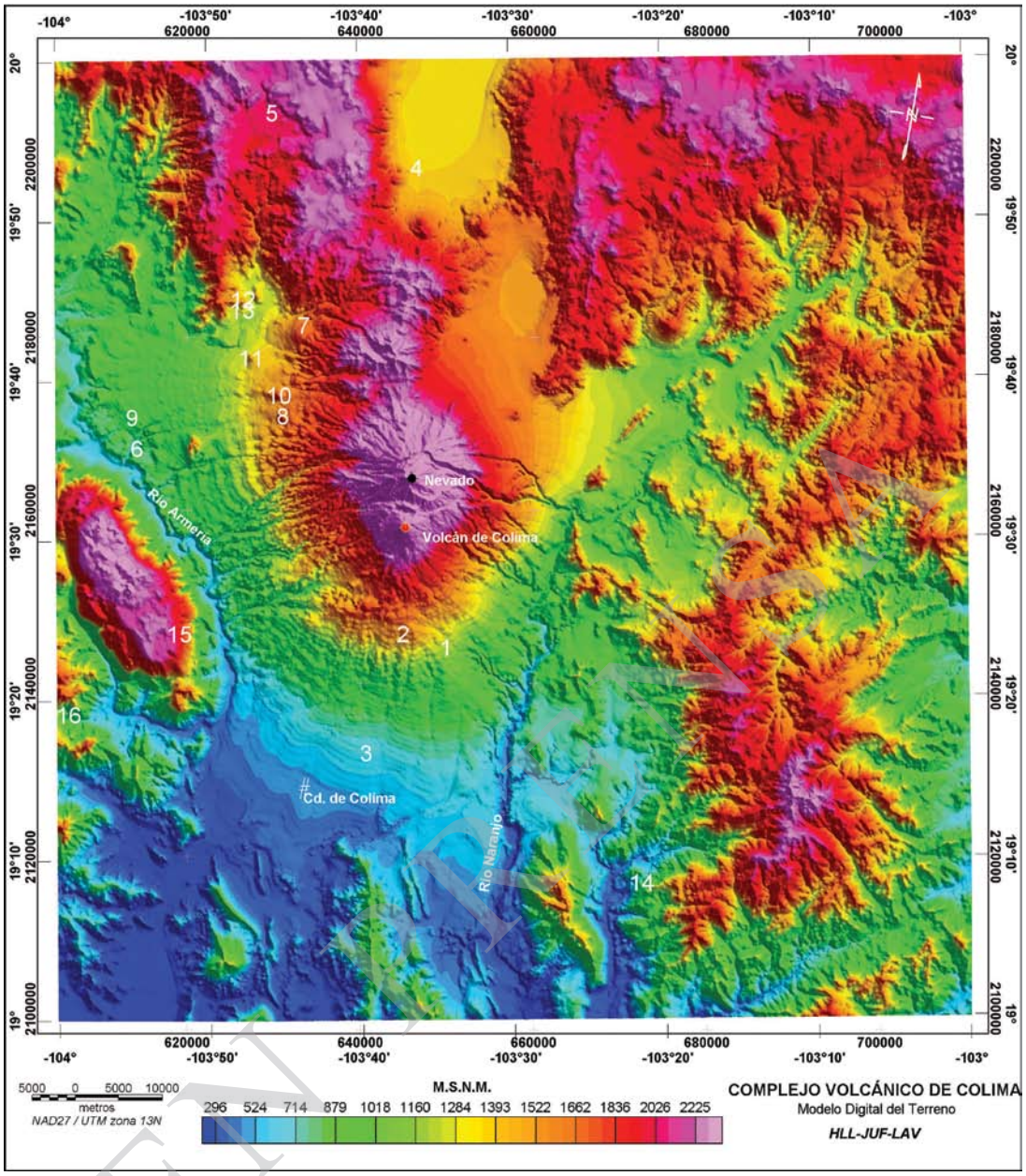


Figura 3. Modelo digital del terreno con el sistema denominado Geomodelos de Elevación (GEMA), en donde se observan al centro-oeste, el volcán de Colima y el volcán Nevado y hacia el este y oeste los límites del graben de Colima representados por los ríos Tuxpán-Naranjo y Armería, respectivamente. Se identifican con: 1) Quesería; 2) Montitlán; 3) El Trapiche; 4) Sayula; 5) Tapalpa; 6) Valle de Tolimán; 7) Volcán Carpintero Norte; 8) Volcán San Isidro; 9) Volcán Cuauhtémoc; 10) Volcán La Erita; 11) Volcán Telecampana; 12) Volcán Comal Grande; 13) Volcán Comal Chico; 14) Mina El Encino; 15) Sierra de Manantlán, Cerro Grande; 16) Sierra de Perote.

(media: 0.56 A/m), respectivamente. Muestras de lavas históricas de la pared este de la caldera del Volcán de Colima muestran rangos de susceptibilidad e intensidad de remanencia de 4.2×10^{-5}–9.8×10^{-5} (media: 5.8×10^{-5} SI) y 0.8–1.0 A/m (media: 0.88 A/m), respectivamente.

La polaridad magnética de todas las unidades es normal, de acuerdo con la edad del complejo volcánico de Colima. La dirección de magnetización remanente permanece constante, cercana al valor dipolar con una inclinación de 45 grados y declinación hacia el norte.

RESULTADOS

Anomalías aeromagnéticas

En el análisis de la información aeromagnética se definen los sectores o dominios aeromagnéticos (DAM) para identificar zonas dentro de la configuración magnética que presentan características de longitud de onda y amplitud similares, es decir, que tienen fuentes generadoras de anomalías que se caracterizan por tener susceptibilidades

magnéticas similares. Estos sectores aeromagnéticos pueden estar constituidos por una o varias unidades geológicas o bien, varias unidades geológicas pueden constituir un solo dominio o sector aeromagnético.

La zona del complejo volcánico de Colima se caracteriza por anomalías magnéticas de distintas amplitudes y longitudes de onda. Para el análisis de la magnetometría aérea se dividió la superficie en DAM, identificándose un total de 24 (Figura 4). Las principales características de cada uno de los DAM se pueden observar en forma resumida en la Tabla 1.

La definición de los DAM tiene como base una simple relación matemática que se deriva de la Ley de Coulomb y que es la más importante en la prospección magnética ($I = kH$), que nos indica que la intensidad de magnetización (I) es directamente proporcional a la fuerza del campo magnético (H), y esa constante de proporcionalidad es la susceptibilidad magnética (k), que es característica de cada tipo de roca, así que si partimos de que la H es prácticamente la misma para una misma zona, la I varía de valor es porque la k es diferente y de ahí que se puedan agrupar y diferenciar zonas con k similares, que se definen como Dominios Aeromagnéticos (DAM).

Algunas de las asociaciones geológicas de los DAM fueron tomadas de los trabajos de Luhr y Carmichael (1990) y de Cortés-Cortés *et al.*(2005), aunque las definiciones de estos autores está basada sólo en la geología superficial (el área que cubren es sólo una porción del estudio aeromagnético) y la definición de los DAM tiene como base los valores de contraste de susceptibilidad magnética que muestran las rocas en la zona. Por ejemplo, en los mapas geológicos de dichos autores, el anticlinal de Cerro Grande, en la Sierra de Manantlán al oeste del Volcán de Colima se marca como calcáreo, porque es la roca que aflora, más sin embargo la aeromagnetometría, refleja la existencia de anomalías magnéticas que se asocian con rocas intrusivas y extrusivas. En estos casos, que son varios en la zona estudiada, la definición que se utiliza en las interpretaciones es la de los DAM.

DAM I. Este dominio aeromagnético se caracteriza por contener al volcán de Colima y al volcán Nevado (Figura 4). El Volcán de Colima está asociado con una gran anomalía magnética dipolar normal que cubre una superficie mayor a los 40 km^2 con una amplitud de más de 750 nT y una distancia dipolar de 2.5 km aproximadamente. El lóbulo positivo representa la mayor parte de la superficie, con un área mayor a los 35 km^2 y tiene una forma alargada hacia el SSE, donde decae el potencial magnético. El polo negativo tiene una superficie mayor de 4 km^2, posee una forma alargada en la dirección E-W, que sugiere una asociación con una zona de falla que limita al Volcán de Colima con el Nevado. El volcán Nevado de Colima muestra una anomalía dipolar normal con un bajo magnético muy discreto. La anomalía cubre una superficie aproximada de 20 km^2, presenta una intensidad del campo geomagnético de 240 nT y una distancia dipolar de 2.5 km. El alto magnético representa la mayor parte de la superficie de esta anomalía con 18 km^2 y tiene una forma alargada en la dirección E-W. El bajo magnético de esta anomalía es muy tenue, cubriendo una superficie aproximada de 2 km^2 (Figura 4). En la carta magnética del campo residual con modelo digital de elevación se interpretan zonas de debilidad asociadas con fracturas y/o fallas en dirección N-S, E-W, NE-SW y en forma circular. Se puede observar que la cima del volcán está asociada con las direcciones N-S y NE-SW (Figura 4).

De acuerdo a la geología reportada por Cortés-Cortés *et al.*(2005), las unidades geológicas de este DAM están asociadas superficialmente con lavas, domos, flujos piroclásticos y materiales de caída aérea de una edad del Pleistoceno (Cuaternario) del complejo volcánico del Nevado (CVN) y por lavas, flujos piroclásticos y material de caída del complejo volcánico paleo-Fuego (CVP) así como por avalanchas de escombros volcánicos con edades por ^{14} Cdesde 7,040 AP a 3,600 AP en el sector SW.

DAM II. Este dominio se ubica en la parte centro sur de la zona estudiada y se localiza principalmente al sur del CVC. La principal característica es la presencia limitada de anomalías magnéticas. La zona está asociada con respuestas magnéticas caracterizadas por longitudes de onda grandes (> 5km) y amplitudes medias (~ 80 nT). Geológicamente todo el DAM se asocia principalmente a depósitos de avalancha de escombros volcánicos con zonas de gran espesor (López-Loera y Gutiérrez-Pineda, 1977). De acuerdo con edades reportadas por Cortés-Cortés *et al.*(2005), la avalancha tiene una edad por ^{14}C de 7,040 AP. Este DAM presenta dos anomalías magnéticas positivas aisladas, del orden de las 90 nT cada una, la primera situada entre la población de Quesería y de Montitlán, a una distancia de 13.6 km al sur del cráter de Volcán de Colima, y la otra localizada al este de la población del Trapiche, ubicada aproximadamente a 11.5 km al NE de la ciudad de Colima y a 27 km al sur del Volcán de Colima. Por sus características, estos altos magnéticos se pueden asociar a apófisis de intrusivo a profundidad. Las anomalías magnéticas se alinean norte-sur en la dirección del CVC (Figura 4). El DAM está limitado por las fallas asociadas a los cauces de los ríos Armería al W y Tuxpan-El Naranjo al E, asimismo presenta zonas de debilidad en las direcciones NNE, NW-SE y NE-SW (Figura 5).

DAM III. Este DAM se ubica en la parte centro-norte de la zona estudiada y se localiza al norte del volcán Nevado de Colima. El rasgo principal es la asociación con bajos magnéticos. La zona está relacionada con respuestas magnéticas caracterizadas por frecuencias y amplitudes medias (~50 nT; Figura 4). Este DAM presenta dos alineamientos asociados con bajos magnéticos con intensidades de -120 nT a -420 nT con dirección NE-SW, asociados posiblemente con zonas de fracturas y/o fallas (Figura 5). Geológicamente, de acuerdo a Luhr y Carmichael (1990), el dominio I se relaciona a lavas y brechas andesíticas pre-caldera (I) del Nevado de Colima cubiertas por capas más jóvenes de ceniza y escoria de caída. Cortés-Cortés *et al.*(2005) reportan esta zona como lavas, flujos piroclásticos

EN PRENSA

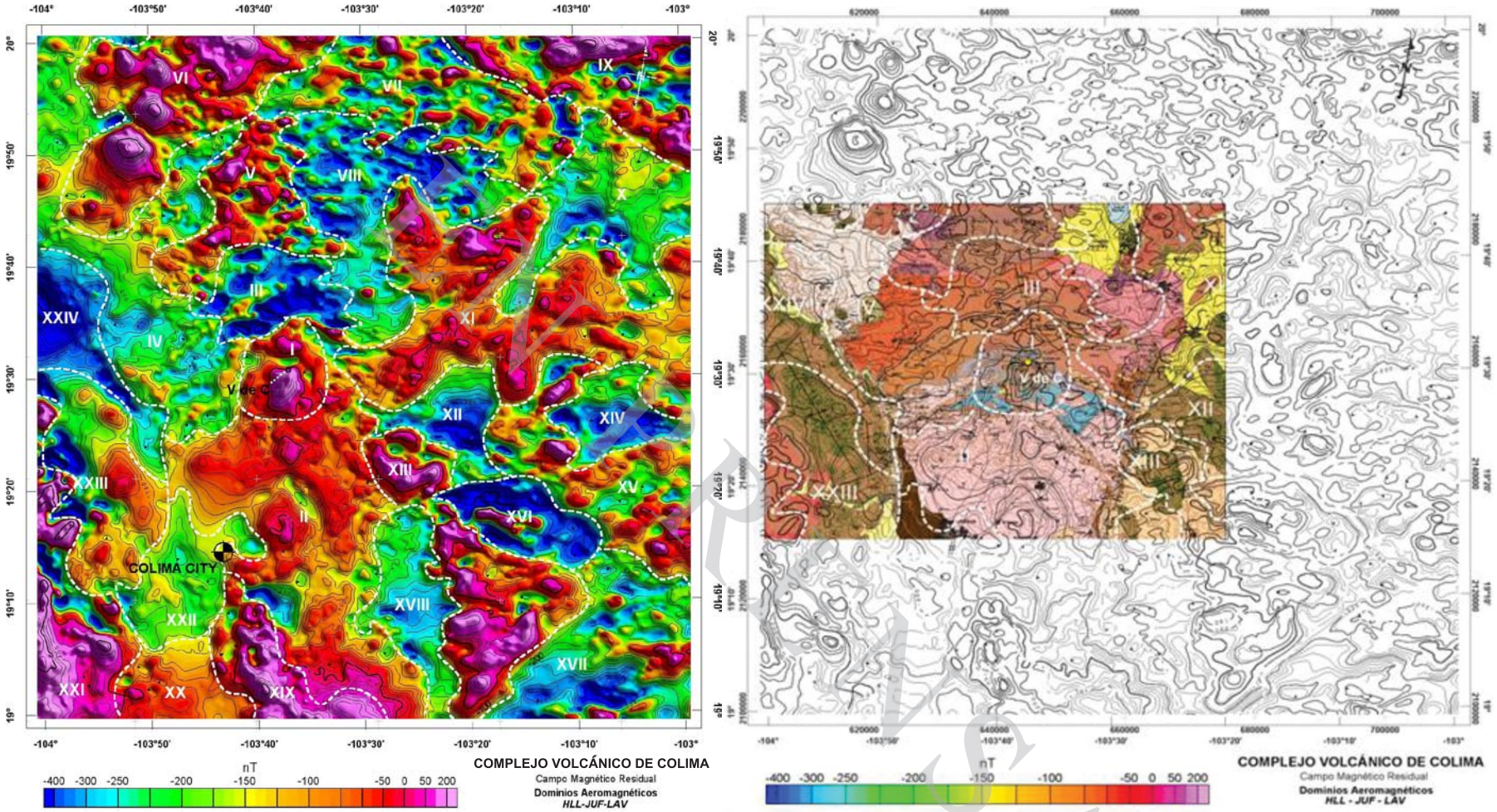


Figura 4. a: Mapa del campo magnético residual que muestra la configuración y ubicación de cada uno de los dominios aeromagnéticos (DAM) identificados en función de la susceptibilidad magnética que presentan. El DAM I y V se han asociado con estructuras volcánicas; los DAM II, III, IV y XXII se correlacionan con productos volcánicos como avalanchas de escombros volcánicos; los DAM VI, XIII, XIX, XXI y XXIII se interpretan con zonas de intrusivos; los DAM VII, VIII, IX, X, XI, XV, XVII y XX están asociados con rocas volcánicas y/o volcanosedimentarias y los DAM XII, XIV, XVI, XVIII y XXIV con rocas sedimentarias. Algunos DAM tienen superficialmente otra asociación geológica, como por ejemplo el DAM XXIII que es asociado tanto por Luhr y Carmichael (1990) como por Cortés-Cortés *et al.* (2005) con rocas sedimentarias calcáreas del Cerro Grande, mientras que la aeromagnetometría refleja claramente a través de una anomalía de características monopolares la existencia de rocas intrusivas bajo la secuencia calcárea. El intervalo entre las líneas de isovalores es de 20 nT. b: Mapa geológico generado por Cortés-Cortés *et al.* (2005), en el que se ha sobrepuesto la configuración del CMR y los DAM. Se puede apreciar que existen algunas coincidencias, como por ejemplo en el DAM I, relacionado con los volcanes de Colima y Nevado de Colima, y el DAM II, asociado a las avalanchas de escombros volcánicos del volcán paleo-Fuego. Las diferencias mayores se deben a que el mapa geológico sólo registra la litología superficial, mientras que el magnetismo "ve" el subsuelo. Por ejemplo, el DAM XXIII, geológicamente se correlaciona con rocas calcáreas del Cerro Grande de la Sierra de Manantlán, ubicada al W del CVC, mientras que el magnetismo nos muestra claramente la existencia de una roca que genera una anomalía de características monopolares que se puede interpretar como un cuerpo intrusivo. Las rocas calcáreas magnéticamente son del tipo diamagnético, o sea que su susceptibilidad es <1 y en ocasiones hasta negativa, por lo que no se puede decir que la anomalía magnética está ocasionada por las calizas.

y material de caída del volcán El Cántaro (1.52 Ma), así como flujos piroclásticos, lavas y material de caída (0.53 Ma) del complejo volcánico del Nevado.

DAM IV. Este DAM se localiza al NW del volcán de Colima y tiene una forma alargada en dirección NW-SE (Figuras 4 y 5). Está caracterizado por presentar respuestas magnéticas normales, es decir, el campo magnético residual en la mayor parte del DAM no presenta distorsiones que generen la existencia de anomalías aeromagnéticas. Este tipo de respuesta magnética en esta zona se asocia con la formación Atenquique (Luhr y Carmichael, 1990) compuesta principalmente por gravas y arenas volcánicas, así como por depósitos piroclásticos derivados del volcán de Colima y del volcán Nevado. El DAM contiene tres pequeñas anomalías positivas asociadas geológicamente a conos cineríticos que emitieron lavas y escorias de composición basanítica (Luhr y Carmichael, 1990). De acuerdo con lo reportado por Cortés-Cortés *et al.*(2005), este dominio está constituido por lavas, flujos piroclásticos y material de caída del paleo-Fuego, así como por avalanchas de escombros volcánicos en el sector SW con una edad por ^{14}C de 3,600 AP. Estos autores también reportan que existen flujos piroclásticos,

Tabla 1. Características principales de los dominios aeromagnéticos (DAM) del complejo volcánico de Colima. a: A partir del cráter del volcán de Colima; b: aproximada; c: valor mayor.

DAM	Asociación		Ubicación/ distancia (km)[a]	Área (km²)[b]/nt[c]
	Geofísica	Geológica		
I	Anomalías dipolares	Volcanes de Colima y Nevado	Centro/ 0	231 / 540
II	Altos magnéticos	Avalanchas de escombros volcánicos	Sur / 39	>756 / 180
III	Bajos magnéticos	Parcialmente Volcán Cántaro	Norte/ 13	250 /-500
IV	Campo magnético normal	Formación Atenquique	W y NW / 29	>780 / 100
V	Altos magnéticos (“bolerío”)	Productos del volcán Cántaro	NNW / 30	344 / 120
VI	Altos magnéticos	Intrusivos	NW / 50	>716 / 960
VII	Altos magnéticos (“bolerío”)	Rocas volcánicas	NNE / 51	519 / 220
VIII	Bajos magnéticos	Rocas volcánicas intermedias	NE / 31	509 / -200
IX	Altos magnéticos	Intrusivos	NE / 73	236 / 460
X	Valores normales a bajos	Rocas sedimentarias, tobas y brechas andesíticas	NE / 60	439 /-100 a- 180
XI	Altos magnéticos	Rocas sedimentarias e intrusivos granodioríticos	ENE / 42	>771 / 40 a 200
XII	Bajo magnético	Tobas, rocas volcano-sedimentarias y calizas	ESE / 28	189 / -300
XIII	Altos magnéticos	Intrusivos, depósitos de mineral de hierro	SE / 49	754 / 340
XIV	Bajos magnéticos	Ígneas extrusivas,volcano-sedimentarias y calizas.	ESE / 54	131 / -200
XV	Anomalías dipolares	Intrusivo granodioritico, lavas tobas y brechas andesíticas	SE / 59	462 / 220
XVI	Alto y bajos magnéticos	Intrusivo y rocas vocano-sedimentarias con mineral de hierro diseminado.	SE /45	211 / 140 a -200
XVII	Anomalías dipolares	Intrusivo granodiorí-tico, rocas ígneas extrusivas, tobas ácidas, rocas volcano-sedimentarias y calizas	SE / 72	> 452 / 360
XVIII	Valores normales a bajos	Tobas ácidas, rocas volcano-sedimentarias y calizas	SE / 46	270 / 60 a -120
XIX	Altos magnéticos uniformes	Intrusivo granodiorítico, andesitas, rocas volcanosedi-mentarías, metavolcánicas y calcáreas	S /54	340 / 500
XX	Altos magnéticos uniformes	Metavolcánicas y calcáreas	SSW/ 55	>185 / 60
XXI	Altos magnéticos	Intrusivo granodiorítico, andesitas y depósitos de mineral de hierro	SW / 51	>270 /> 520
XXII	Campo magnético normal	Avalanchas escombros, volcánicos de tipo lahar	SW /38	232 / 40
XXIII	Anomalía monopolar	Cuerpo ígneo intrusionando calizas	SW / 36	380 / 180
XXIV	Bajo magnético	Rocas calcáreas Sierra Manantlán	WNW / 39	>217 / -340

EN PRENSA

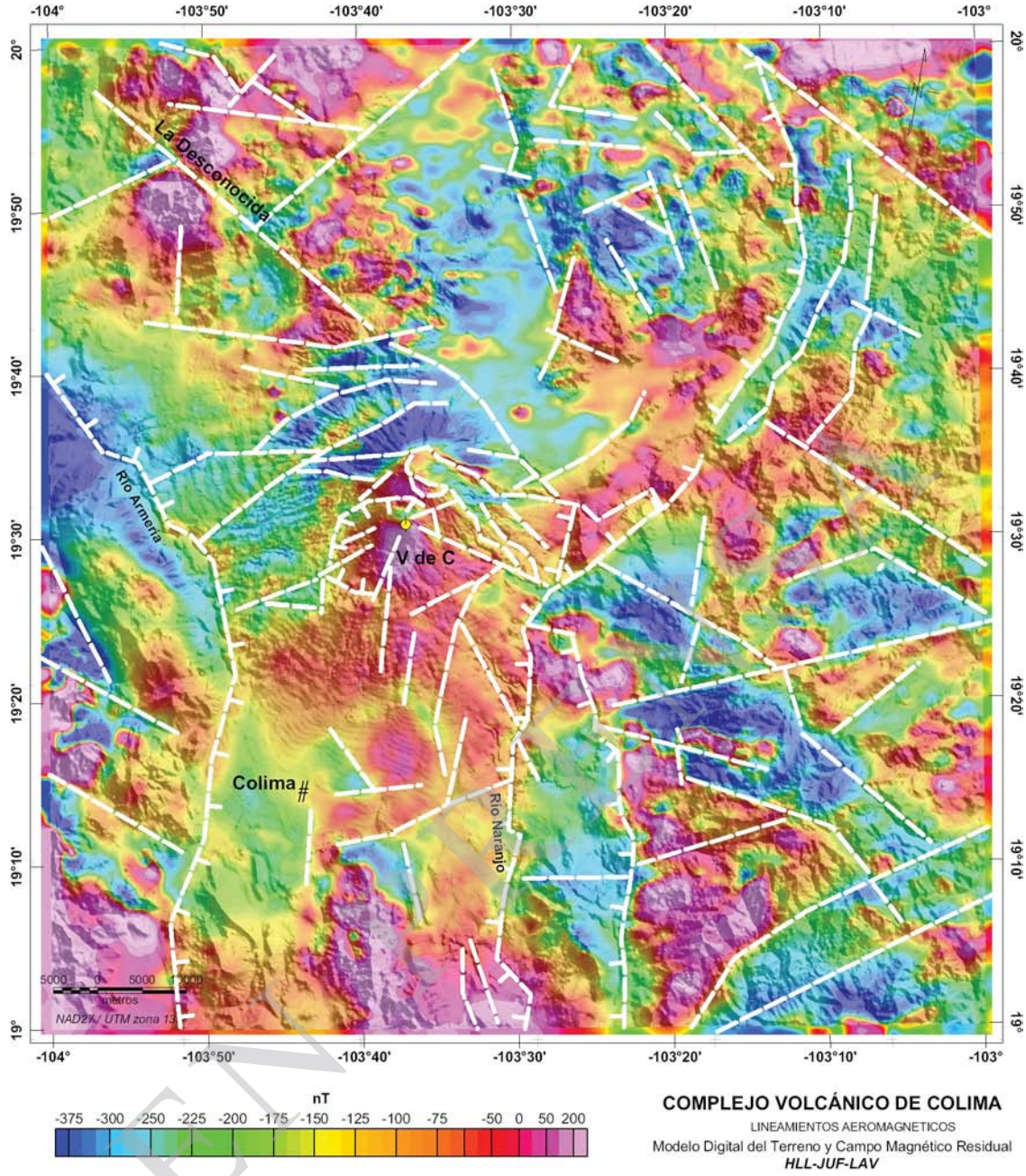


Figura 5. Mapa que muestra en conjunto el campo magnético residual y un modelo digital de elevación (GEMA). Se han marcado los lineamientos aeromagnéticos que existen. Obsérvese los lineamientos asociados con los cauce-falla de los ríos Armería y Naranjo, así como los correlacionados con el Volcán de Colima. Al este de la traza de la falla del Río Tuxpan-Naranjo se interpreta la existencia de un lineamiento con dirección N-S, indicado por el gradiente magnético que existe entre los valores altos y bajos de intensidad magnética. Así mismo, la inferencia de la existencia de la falla denominada "La Desconocida" se basa en el gradiente que muestra el lineamiento que cruza por completo el rift de Colima con dirección NW-SE.

lavas y material de caída del Nevado con una edad de 0.53 Ma y materiales lacustres y fluviales del valle de Tolimán. Este sector magnético está limitado por zonas de debilidad asociadas a fallas al SW (cauce del Río Armería) y SE.

DAM V. Este dominio aeromagnético se localiza al norte de los volcanes de Colima y se caracteriza por presentar señales magnéticas con longitudes de onda pequeñas a medianas (1.5 km a 3 km) y anomalías magnéticas asociadas a amplitudes medias (100 nT). El norte y centro del DAM se asocia superficialmente con depósitos de playa en la vecindad del poblado de Sayula. La mayor parte de este DAM se debe asociar a depósitos de rocas volcánicas en forma de flujos, brechas, domos y depósitos piroclásticos, ya que la anomalía aeromagnética así lo sugiere, con una morfología magnética en forma de "bolerío", característica de este tipo de rocas volcánicas (Figura 4). Cortés-Cortés *et al.* (2005) asocian esta zona con lavas, flujos piroclásticos y material de caída del volcán El Cántaro (1.52 Ma) y del complejo

volcánico del Nevado, asimismo reportan la presencia y edades de basanitas y minetas en los volcanes Carpintero Norte y San Isidro de 240 y 215 ka respectivamente y en el volcán Cuauhtémoc (473 ka)

La anomalía aeromagnética asociada con el volcán El Cántaro no está bien definida, probablemente debido a la erosión (Luhr y Carmichael, 1990). El área del volcán El Cántaro presenta una serie de altos magnéticos, uno de ellos que rodeado por bajos magnéticos y que se asocia con la posible fuente del volcán. Se localiza en la porción SW del DAM y presenta una intensidad de magnetización del orden de 381 nT y una distancia dipolar de 1539 m. Al parecer dos zonas de falla limitan este volcán, una representada por un lineamiento en dirección NE-SW, asociado a bajos magnéticos y otra correlacionada con un lineamiento en dirección NW-SE, también asociada a la presencia de bajos magnéticos (Figuras 4 y 5). La zona correlacionada con el alto magnético del volcán El Cántaro tiene una superficie aproximada de 3.7 km^2. El bajo magnético tiene una forma alargada en la dirección NW-SE; el alto magnético es de forma elipsoidal alargada hacia el SSW. Otra de las características de este DAM es presentar algunas anomalías magnéticas invertidas, debido probablemente a secuencias de rocas volcánicas de diferentes épocas y polaridad magnética inversa de la componente de remanencia (Urrutia-Fucugauchi, 1977).

DAM VI. Este DAM se localiza a una distancia media de 50 km al NW de los volcanes Nevado y de Colima y al W y SW de la población de Tapalpa. Se caracteriza por presentar señales magnéticas de longitud de ondas grandes (6–8 km) y amplitudes de anomalías magnéticas altas (Figura 4). El DAM contiene al menos cuatro anomalías positivas con amplitudes de hasta 570 nT a las 960 nT, que se asocian a intrusivos granodioríticos correspondientes y probablemente a cuatro apófisis de un gran intrusivo a profundidad. El DAM geológicamente se asocia a intrusivos, tobas y brechas volcánicas de composición intermedia, rocas ígneas extrusivas básicas al norte de la zona. Este dominio está limitado por zonas de debilidad asociadas a fallas y/o fracturas con dirección NW-SE y NE-SW. La zona de debilidad con dirección NW-SE se asocia a lo que se ha interpretado como una falla de características regionales que cruza prácticamente toda la zona de estudio y que se ha denominado como falla "La Desconocida" (Figura 5). La interpretación de esta zona de falla se fundamenta en que, cuando llueve, el agua superficial se percola en el subsuelo y entra en contacto con fracturas y planos de falla, oxidando los minerales ferromagnesianos, y reduciendo su susceptibilidad e intensidad magnética, con lo que se crea una apariencia de bajos magnéticos alineados con las tendencias de las fallas (Ozima y Kinoshita, 1964; Henkel y Guzmán, 1977; López-Loera y Urrutia–Fucugauchi, 1999). El DAM está indefinido hacia el norte.

DAM VII. El DAM se ubica al NNE de los volcanes Nevado y de Colima a una distancia media de 49 km. Está caracterizado por tener respuestas magnéticas asociadas a longitudes de onda corta (1.6 km) a media (4 km) y amplitudes medias (348 nT), en un ambiente magnético de frecuencias medias a altas (Figura 4). En general, el DAM se asocia superficialmente a depósitos de playa y a profundidad a rocas volcánicas dado el tipo de configuración que presenta, el cual está asociado a una morfología magnética en forma de "bolerío", característico de rocas volcánicas (Figura 4). Cortés-Cortés *et al.*(2005) reportan para esta zona flujos piroclásticos y materiales de caída aérea del complejo volcánico del Nevado, así como basanitas y minetas en los volcanes La Erita, Telecampana, Comal Grande y Comal Chico de 172, 140 y 137 ka respectivamente. Este DAM está limitado al NW por una zona de falla con dirección NE-SW (Figura 5).

DAM VIII. Este DAM se localiza a una distancia media de 26 km al NE de los volcanes Nevado y de Colima (Figura 4). Presenta señales magnéticas caracterizadas por longitudes de ondas medias (2 km – 3km) y amplitudes de campo geomagnético que van de 64 hasta 38 nT. El DAM está representado principalmente por una serie de bajos magnéticos que tienden a alinearse principalmente en dirección NW-SE. Geológicamente este DAM se asocia a rocas volcánicas extrusivas de composición intermedia, flujos de lava y tobas principalmente (Figura 4).

DAM IX. Este DAM se localiza a una distancia media de 73 km al NE de los volcanes Nevado y de Colima (Figura 4). Este DAM se encuentra indefinido tanto al norte como al este. Se caracteriza por una anomalía magnética alargada en dirección casi E-W con una longitud mayor que 15 km y muestra la existencia de tres altos magnéticos con anomalías de 450 nT a 585 nT. Se correlaciona con depósitos de aluvión, rocas sedimentarias, tobas y brechas andesíticas (Figura 4). Se interpreta a profundidad la existencia de un intrusivo del tipo granodioritico. El DAM muestra lineamientos magnéticos asociados con zonas de debilidad como falla y/o fracturas y/o contactos en dirección E-W y NW–SE (Figura 5).

DAM X. Este DAM se localiza a una distancia media de 60 km al NE de los volcanes Nevado y de Colima (Figura 4). Se caracteriza por estar asociado a respuestas magnéticas bajas, identificadas con longitudes de onda cortas a medias (1.6–4 km) y amplitudes bajas a medias de campo magnético (100 nT a 200 nT). Cortés-Cortés *et al.*(2005) reportan para esta zona rocas ígneas extrusivas no diferenciadas (10 ka), basaltos, flujos piroclásticos y materiales de caída aérea, así como la presencia de la Formación Atenquique (lahares, depósitos fluviales y fluvio-lacustres en alternancia con flujos piroclásticos) y Formación Tepames (calizas masivas). El DAM muestra la presencia de lineamientos magnéticos principalmente en las direcciones NW-SE y NE-SW (Figura 5).

DAM XI. Este DAM se identifica hacia la porción E media del área estudiada, inicia en las inmediaciones de los volcanes Nevado y de Colima y se extiende hasta distancias mayores que 66 km y está indefinido hacia el E. Tiene una forma principalmente alargada en dirección E-W (Figura

EN PRENSA

4). Se caracteriza por mostrar valores asociados con altos magnéticos que varían de 50 nT a 300 nT Se relaciona a respuestas magnéticas con longitudes de onda que varían de 2.8 km a 5 km. Geológicamente este dominio se correlaciona con rocas ígneas extrusivas de composición intermedia a básica, lavas, tobas, brechas andesíticas, flujos piroclásticos y materiales de caída (Cortés-Cortés *et al.*, 2005). Hacia la porción oriental se correlaciona con rocas sedimentarias (Formación Tepames) y depósitos de aluvión y hacia el norte se correlaciona con intrusivos de tipo granodioríticos. Presenta lineamientos principalmente en la dirección NE-SW y muy escasamente en dirección NW-SE (Figura 5).

DAM XII. Este DAM se localiza a una distancia media de 28 km al SE de los volcanes Nevado y de Colima y se caracteriza principalmente por estar constituido por una anomalía representada por un bajo magnético de -538 nT (Figura 4). Este bajo tiene una superficie mayor que 64 km^2, está cortado por una zona de debilidad de características regionales que tiene una dirección NW-SE y que se ha interpretado como la continuación de la falla "La Desconocida" (Figura 5). Superficialmente se asocia principalmente a tobas de composición ácida, rocas volcano-sedimentarias (arenas y conglomerados) y calizas. Cortés-Cortés *et al.*(2005) asocian esta zona a la Formación Tepames, que son calizas masivas del Cenomaniano. Este DAM está delimitado al E y SW por lineamientos magnéticos asociados a zonas de debilidad, como fallas y/o fracturas y/o contactos.

DAM XIII. Este DAM se localiza al SE del Volcán de Colima a distancias que van desde 18 km hasta 65 km, tiene una forma alargada en la dirección NW-SE y se caracteriza por señales magnéticas con longitudes de onda medianas (4.5 km) a grandes (>10 km) y anomalías que varían de -433 nT hasta 283 nT (Figura 4). Presenta una serie de anomalías magnéticas bien conformadas y asociadas a depósitos de mineral de hierro, como la mina de El Encino que presenta una anomalía dipolar normal con una intensidad de campo magnético del orden de las 700 nT y una distancia dipolar de 2 km.

Al NW del DAM se distingue una anomalía magnética distorsionada y alargada en la dirección casi E-W y constituida por tres altos magnéticos que en sus extremos forman anomalías dipolares y que probablemente estén asociadas a rocas ígneas extrusivas de composición intermedia a básica. La amplitud de las anomalías es mayor de 400 nT y su distancia dipolar del orden de 2 km. El DAM presenta asimismo anomalías positivas de gran extensión asociadas a rocas ígneas intrusivas. Está representado geológicamente por rocas ígneas intrusivas (diorita) y extrusivas (andesitas), meta-ígneas, volcano- sedimentarias, calcáreas y al NW por avalanchas de escombros. Este sector o dominio magnético está limitado al W y SE por zonas de fallas y/o fracturas, caracterizadas por fuertes contrastes magnéticos. Asimismo está limitado al N por fallas y/o fracturas con dirección NW-SE. El lineamiento magnético se ha interpretado como el límite E de un semigraben que es paralelo al graben de Colima (Figura 5).

DAM XIV. Este DAM se identifica al ESE del Volcán de Colima a una distancia media de 57 km. Este se caracteriza por una zona de bajos magnéticos de grandes dimensiones (114 km^2). La zona de bajos magnéticos muestra valores que oscilan entre -405 nT y -460 nT y tienen una forma alargada en la dirección E-W (Figura 4). El DAM geológicamente se asocia principalmente a rocas ígneas extrusivas y tobas ácidas, rocas volcano-sedimentarias (arenas y conglomerados) y calizas. Este dominio está limitado por lineamientos con direcciones NW-SE y NE-SW (Figura 5).

DAM XV. Este sector magnético se ubica hacia el SE del Volcán de Colima a una distancia media de 65 km, se caracteriza principalmente por tener una serie de anomalías representadas por altos magnéticos que muestran longitudes de onda que varían de 1.8 km a 3.2 km (Figura 4). Presenta una serie de alineamientos magnéticos en dirección NE-SW con anomalías representadas por altos magnéticos en forma alargada siguiendo la misma dirección del lineamiento, las amplitudes varían de 116 nT hasta 327 nT (Figura 5). Geológicamente se correlaciona principalmente con rocas ígneas intrusivas tipo granodioríticas, lavas, tobas y brechas andesiticas.

DAM XVI. Este DAM se localiza aproximadamente a 45 km al SE del volcán de Colima y del orden de 50 km al E de la ciudad de Colima (Figura 4). Se caracteriza por estar constituido en su parte central por una anomalía positiva alargada con una longitud de 10 km en dirección NW-SE y rodeada por una serie de bajos magnéticos. La anomalía tiene valores de intensidad del campo magnético residual del orden de los 800 nT y una distancia dipolar de 2 km. Esta anomalía alargada se asocia a una zona de contacto entre rocas intrusivas y volcano-sedimentarias con mineral de hierro diseminado. En general este dominio se correlaciona con un intrusivo granítico, rocas extrusivas andesiticas y rocas volcano-sedimentarias Al centro de este DAM se presenta una anomalía magnética dipolar normal de forma alargada, muy simétrica en cuanto a dimensiones del alto y bajo magnético, con intensidades del campo magnético mayores a 600 nT y distancias dipolares medias de 1.5 km, asociada a una zona de contacto entre rocas intrusivas y volcano-sedimentarias con mineral de hierro diseminado. Al sur presenta una anomalía asociada a un bajo magnético que se correlaciona con un intrusivo ácido. En general el DAM se correlaciona con la presencia de intrusivos graníticos, rocas ígneas extrusivas (andesitas) y volcano-sedimentarias.

DAM XVII. Se identifica al SE del Volcán de Colima a una distancia media de 75 km; se caracteriza por presentar señales magnéticas con longitudes de onda que van de 1.6 km hasta 6 km y amplitudes de hasta 370 nT (Figura 4). En el dominio existen algunas anomalías dipolares con valores de intensidad del orden de 310 nT y distancias polares de 1.6 que se pueden correlacionar con fuentes magnéticas asociadas a mineral de hierro diseminado. El DAM se correlaciona geológicamente con la presencia de intrusivos granodioriticos, rocas ígneas extrusivas y tobas ácidas y

EN PRENSA

rocas volcano-sedimentarias (arenas y conglomerados) y calizas. El dominio presenta lineamientos aeromagnéticos en dirección NE-SW que se asocian a zonas de contacto y/o fallas (Figura 5). El DAM está indefinido hacia el sur y este

DAM XVIII. Ubicado a una distancia media de 46 km al SE del Volcán de Colima, este dominio aeromagnético se distingue por presentar en la mayor parte de su área señales magnéticas con longitudes de onda largas (de 6 km a 9 km) y con anomalías muy uniformes (-218 nT a -160 nT). El DAM tiene una forma alargada en dirección casi N-S con una longitud aproximada de 35 km y una superficie del orden de 280 km^2. Está indefinido hacia el sur (Figura 4). Muestra en la mayor parte de su extensión valores de campo normal, "calmo", con la presencia de una zona de bajos magnéticos en su parte central que pareciera están asociados a zonas de falla. Este DAM está limitado tanto al este como al oeste por lineamientos magnéticos de dirección casi N-S asociados a fuertes contrastes de susceptibilidad magnética (Figura 5). Geológicamente se correlaciona con tobas ácidas, rocas volcano-sedimentarias (arenas y conglomerados) y calizas de la Formación Tepames (Cortés-Cortés *et al.*, 2005). Hacia el extremo sur el DAM en el límite oeste, muestra la existencia de una anomalía dipolar con amplitud de 288 nT y una distancia dipolar de 2.2 km que puede estar correlacionada con la presencia de mineral de hierro diseminado (Figura 4).

DAM XIX. El DAM se localiza a una distancia de 50 km al sur del volcán de Colima y a 23 km al SSE de la ciudad de Colima. Se identifica por señales magnéticas con longitudes de onda medias (~ 3 km) y presenta amplitudes de campo magnético de medias a altas (262 nT a 615 nT). Tiene una forma alargada con una dirección NNW-SSE (Figura 4). Está caracterizado por anomalías magnéticas asociadas con altos valores positivos (>600 nT) en la mayor parte de su extensión, la cual queda indefinida hacia el sur. En general este DAM se asocia a rocas ígneas intrusivas (granodioritas) y extrusivas (andesitas), volcano-sedimentarias (arenas y conglomerados), metavolcánicas y calcáreas (Figura 4).

DAM XX. Se puede identificar este DAM al sur de la ciudad de Colima a una distancia media de 25 km. Se caracteriza por presentar en prácticamente toda su extensión un gradiente aeromagnético que varía de sur a norte con anomalías de -54 nT a -125 nT en una distancia de 12.5 km (Figura 4). Este DAM superficialmente se correlaciona con depósitos de aluvión, procedentes del Río Armería, cuyo cauce delimita en el oeste al dominio. Bajo la cubierta aluvial y en función de los valores de susceptibilidad que muestra en el subsuelo, geológicamente se debe de asociar a rocas ígneas extrusivas ácidas y rocas calcáreas.

DAM XXI. Este DAM se localiza a una distancia de ~43 km al SW del volcán de Colima y a 20 km al W, SW y NW de la ciudad de Colima. Se caracteriza por señales magnéticas de grandes longitudes de onda (6 km a 8 km), y amplitudes grandes (>500 nT). Tiene una forma alargada en dirección N-S y está indefinido hacia el occidente (Figura 4). Geológicamente se asocia a la Sierra de Perote la cual está conformada por rocas ígneas, meta-ígneas y sedimentarias clásticas. El DAM presenta algunas anomalías dipolares normales con altas intensidades . Algunas de estas anomalías están asociadas con cuerpos intrusivos granodioríticos, rocas ígneas extrusivas (andesitas) y depósitos de mineral de hierro. Este DAM esta limitado al este por el cauce falla del Río Armería, presentando asimismo lineamientos aeromagnéticos en dirección NW-SE asociados con zonas de debilidad como fallas y/o fracturas y/o contactos (Figura 5).

DAM XXII. Ubicado a una distancia de ~38 km al SW del Volcán de Colima y localizándose la ciudad de Colima en el límite oriente, este DAM se caracteriza por mostrar un campo magnético que contiene anomalías discretas del orden de 50 nT dentro de un medio que presenta entre -162 nT y -170 nT (Figura 4). Geológicamente se correlaciona con depósitos de avalancha de escombros volcánicos de los volcanes del CVC, siendo estos principalmente del tipo lahares y fluvio-lahares (Cortés-Cortés *et al.*, 2005), debido a su correlación con la señal magnética que identifica este dominio. Está limitado al oeste por el cauce falla del Río Armería y al este por un lineamiento con dirección casi N-S que se puede correlacionar con un contacto y/o una zona afallada. La Ciudad de Colima se localiza sobre este último lineamiento (Figura 5).

DAM XXIII. Este DAM se localiza a una distancia media de 33 km al W y SW de los volcanes Nevado y de Colima y tiene como límite este al río Armería. Se caracteriza por una serie de anomalías positivas que generan señales magnéticas asociadas a longitudes de onda medias (5 – 6 km) a grandes (8 – 10 km) y amplitudes bajas en mayor parte de su extensión (<100 nT). Geológicamente se asocia con la Sierra de Manantlán (Cerro Grande), la cual está constituida por rocas calcáreas (Figura 4). Este DAM presenta en la porción central una anomalía positiva de baja intensidad (105 nT) que puede deberse a la presencia de un cuerpo ígneo intrusionando a la secuencia calcárea. Asimismo presenta en su parte central una anomalía dipolar normal con amplitud del orden de 388 nT y una distancia dipolar de 2.5 km con en forma alargada en dirección NW-SE que puede estar asociada a mineral de hierro diseminado. El DAM está limitado por fallas y/o fracturas; al N, E y SE por la falla cauce del Río Armería y al W y SW por una falla en dirección NW-SE. Presenta zonas de debilidad asociadas con fracturas y/o fallas con dirección NW-SE y NE-SW (Figura 5).

DAM XXIV. Se localiza al WNW de los volcanes Nevado y de Colima y a una distancia de 39 km. Este dominio se caracteriza por estar constituido por una anomalía representada por un bajo magnético (384 km^2) de forma alargada en dirección NW-SE (Figura 4). La zona de bajo magnético muestra un gradiente negativo de sur a norte que varía de -204 nT a -551 nT respectivamente en una distancia de 32 km. Geológicamente se correlaciona con las rocas calcáreas de la Sierra de Manantlán (Formación Tepames, Cortés-Cortés *et al.*, 2005). Este DAM se ve limitado por

EJEMPLAR REVISTA

lineamientos en dirección NW-SE, que se asocian al cauce-falla del Río Armería y otro a una zona de falla y/o contacto geológico (Figura 5).

En general los DAM se correlacionan con las diferentes unidades geológicas que existen en el área, algunos de ellos se asocian a las estructuras volcánicas (I, V) y/o a sus productos como avalanchas de escombros volcánicos (II, III, IV, XXII). Otros DAM se identifican con zonas de intrusivos (VI, XIII, XIX, XXI, XXIII) y con rocas volcánicas o volcanosedimentarias (VII, VIII, IX, X, XI, XV, XVII, XX) y otros más con rocas sedimentarias (XII, XIV, XVI, XVIII, XXIV) (Figura 4).

En la Figura 4, se han conjuntado los mapas del CMR, con los DAM y la geología reportada por Cortés-Cortés *et al.*(2005). Lo primero que se aprecia es que el mapa geológico sólo cubre un área del orden de una tercera parte el estudio aeromagnético. En los mapas se pueden apreciar algunas coincidenciasbentre las unidades litológicas y algunos DAM, como por ejemplo, el DAM I que se correlaciona con los edificios volcánicos del Volcán de Colima y el Nevado, y el DAM II que se asocia a depósitos de avalancha de escombros volcánicos del volcán paleo-Fuego. Se puede observar en los mapas que algunos de los límites de las unidades litológicas no coinciden con las fronteras de los DAM, y la razón es que el magnetismo no sólo registra la geología superficial, sino que penetra en el subsuelo y puede definir las diferencias en las susceptibilidades magnéticas que definen los DAM.

LINEAMIENTOS AEROMAGNÉTICOS

Para delimitar y caracterizar los lineamientos aeromagnéticos generamos un mapa resultante de dos matrices ("grids") de datos, una con la topografía y otra con los valores del Campo Magnético Residual (CMR) (Figura 5).

En el mapa es posible observar claramente los cauces de falla de los ríos Armería y El Naranjo que constituyen los limites oeste y este respectivamente del graben de Colima. En una dirección casi paralela al cauce del Río Naranjo en su porción sur y hacia el este a una distancia media de 12 km, se observa la existencia de un lineamiento casi N-S que se interpreta como un semi-graben Esta estructura tiende a cerrarse hacia el norte donde su ancho medio es de 5 km mientras que en el sur tiene un ancho de hasta 14 km.

En la configuración del CMR con la topografía también se puede observar un lineamiento de características regionales (127 km de longitud), con una dirección NW-SE que se ha interpretado y asociado a una zona de debilidad (falla) que no se conocía en el área y a la que se le asignó con el nombre de "La Desconocida". Esta falla está afectada por otras fallas de dirección principalmente NE-SW.

El mapa también muestra lineamientos circulares en las inmediaciones de los volcanes Nevado y de Colima, así como otros rectilíneos que parecen asociados con el cráter del Volcán de Colima. En general, la zona estudiada muestra lineamientos aeromagnéticos principalmente en las direcciones NW-SE y NE-SW (Figura 5).

MODELO AEROMAGNÉTICO

Para definir la geometría y la profundidad de los cuerpos fuente asociados con los volcanes Nevado y de Colima, realizamos un modelo 2 ¾ D de una sección con dirección NNE-SSW de la anomalía de campo magnético reducido al polo, en la que están incluidos el Volcán de Colima y volcán Nevado de Colima (Figuras 6 y 7).

La geometría, profundidad y propiedades magnéticas de las fuentes propuestas para ajustar la anomalía observada, son los parámetros iniciales para este proceso de modelado usando el programa GM-SYS™, el cual utiliza una rutina de inversión, basada en el algoritmo de inversión de Marquardt (1963), para linealizar e invertir los cálculos). GM-SYS™ utiliza una aplicación de este algoritmo para datos magnéticos, proceso desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en el software SAKI (Webring, 1985). La anomalía es modelada por cuerpos poligonales con diferentes magnetizaciones. Estudios magnéticos de diferentes unidades litológicas como flujos y brechas andesíticas, depósitos piroclásticos y avalanchas de escombros volcánicos reportan valores de susceptibilidades e intensidad de magnetización remanente (Connor *et al.*, 1993; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1997; López-Loera y Urrutia-Fucugauchi, 1999; López-Loera *et al.*, 2010). Una limitación importante en el análisis es la falta de información relacionada con la variación de las propiedades magnéticas a profundidad.

DISCUSIÓN

La distribución de los dominios aeromagnéticos interpretada con base en la configuración del campo magnético residual correlaciona y cartografía las diferentes unidades geológicas que existen en la zona y se relacionan a la susceptibilidad magnética, dirección e intensidad de remanencia, parámetros que están en función del contenido de minerales ferromagnéticos. De esta manera se pudieron identificar zonas correlacionadas con rocas ígneas intrusivas, extrusivas, volcano-sedimentarias y calcáreas.

El análisis de los lineamientos aeromagnéticos nos ha permitido inferir algunos aspectos de la estructura del subsuelo del complejo volcánico de Colima que no se habían reportado anteriormente, como la existencia de una zona de semi-graben hacia la parte sureste del Graben de Colima y la existencia de fallas de características regionales (falla "La Desconocida").

Para el modelo magnético 2¾ D del perfil de la configuración del campo magnético reducido al polo, se consideró la información sísmica obtenida de la Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima (RESCO)

EN PRENSA

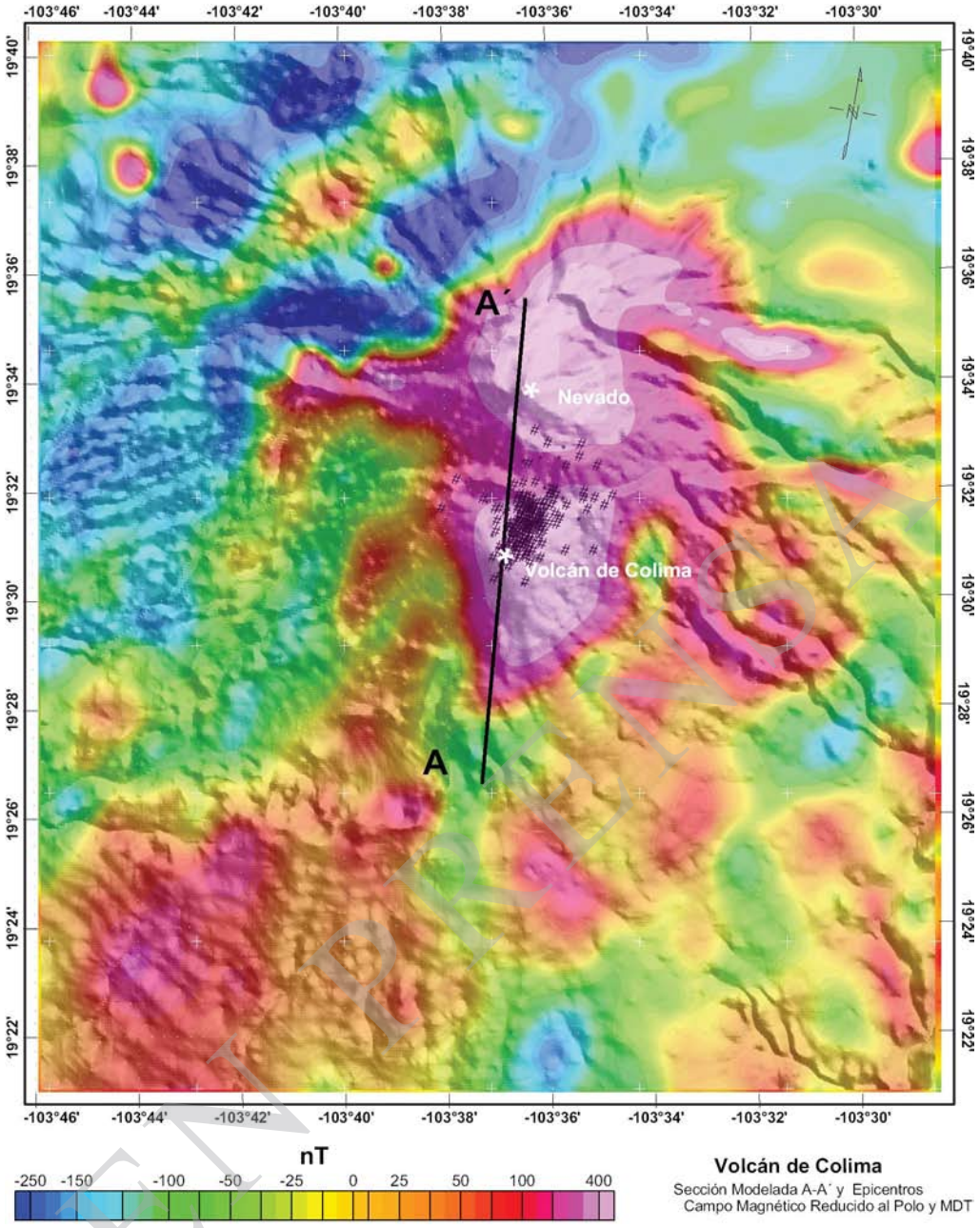


Figura 6. Mapa del campo magnético reducido al polo y el modelo digital del terreno (GEMA) de la zona de los volcanes Nevado y de Colima, mostrando la ubicación de la sección magnética modelada A-A´. En puntos negros se observa la ubicación de todos los epicentros registrados (RESCO) durante la crisis volcánica de 1997-1998 del Volcán de Colima. Nótese que la gran mayoría de epicentros se localiza hacia el NE del cráter del Volcán de Colima. Estos epicentros son la proyección vertical de los hipocentros que se observan en la sección modelada con datos magnéticos.

para el periodo de actividad 1997-1998 para constreñir el modelo. Se puede observar en la Figura 6 que la mayoría de los epicentros están desplazados hacia el NNE del cráter del Volcán de Colima y que coinciden hacia la zona del gradiente magnético que existe al N de la anomalía magnética. En la Figura 7 se presentan la ubicación de los hipocentros, que en su mayoría se ubican entre 0 y 4.4 km bajo la superficie, según se desprende de la ubicación de los focos sísmicos, los cuales generalmente se encuentran desplazados hacia el N del cráter del Volcán de Colima. Otras informaciones que se consideraron para la generación del modelo magnético fue la información y modelo gravimétrico que presentan Medina-Martínez *et al.* (1996), quienes modelan la cámara magmática con un cuerpo de forma rectangular que tiene más de 2 km de ancho, 5 km de longitud y se ubica cerca de 1.5 km bajo el nivel del mar. Para limitar el modelo también se consideró el modelo viscoelástico de Maeda, realizado para la erupción del Volcán de Colima entre 1988-1999 por Cabrera-Gutiérrez y Espíndola (2010), en el cual se establece, con base en los datos observados del

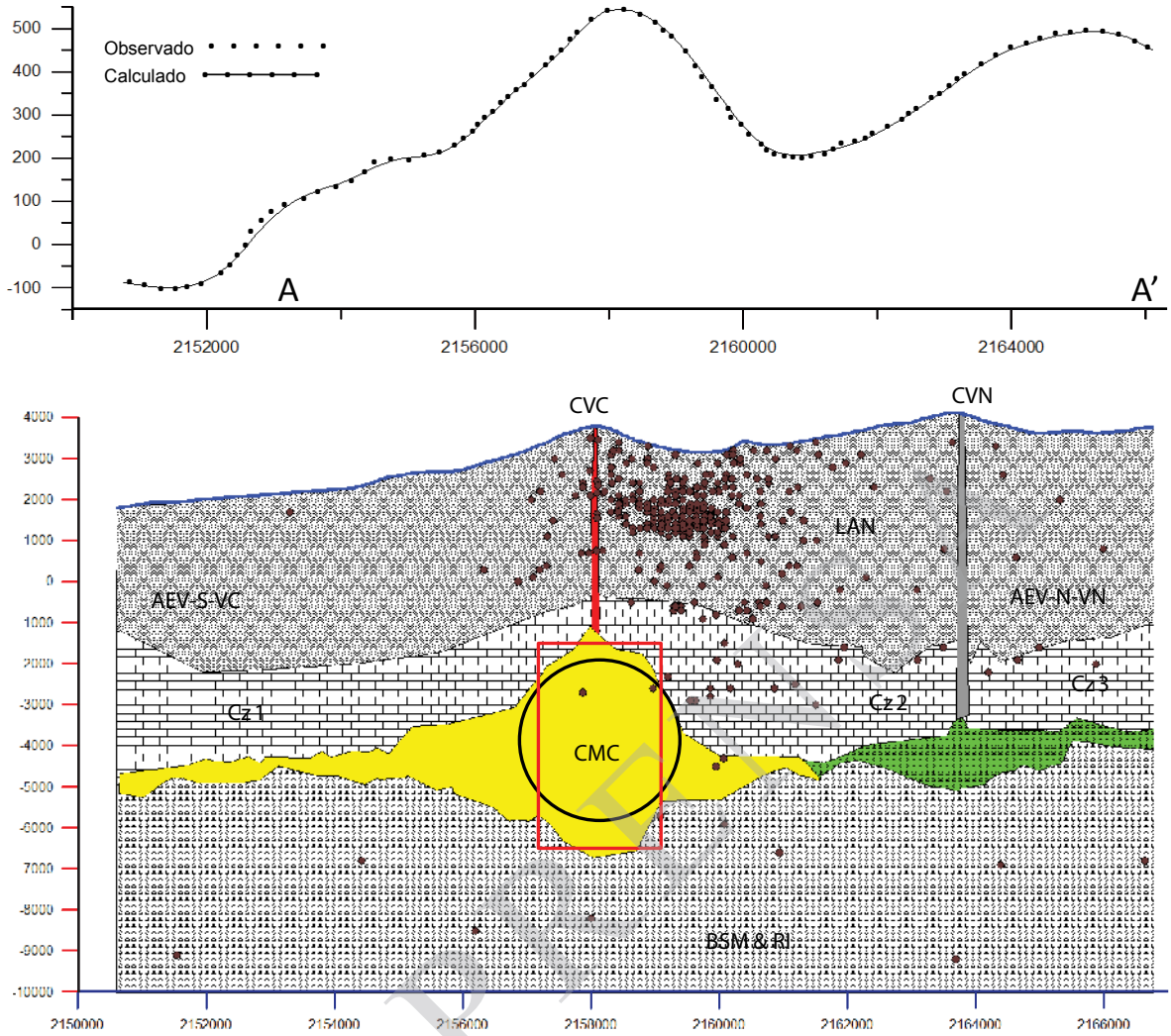


Figura 7. Sección aeromagnética modelada en 2 ¾ D. El modelo tiene un error menor al 10% entre la anomalía medida y la calculada. AEV-S-VC: Avalancha de escombros volcánicos al sur del Volcán de Colima; CVC: conducto volcánico del Colima; CMC: cámara magmática del volcán de Colima; LAN: lavas andesíticas del Nevado; CVN: cuello volcánico del Nevado; AEV-N-VN: avalanchas de escombros volcánicos al norte del volcán Nevado; BSM: basamento sedimentario marino.

volumen emitido, una cámara magmática de 1.93 km de radio aproximado y centrado a ~1.7 km bajo el nivel del mar, ~5.6 km bajo el cráter.

Tomando en consideración los puntos anteriormente citados, el modelo magnético 2¾D que ajusta el perfil magnético del campo magnético reducido al polo de la porción sur del CVC muestra anomalías de los volcanes que se asocian con un cuerpo de forma alargada, con longitud mayor de 6.8 km en dirección N-S, espesor máximo de 5.5 km y que bajo el Volcán de Colima se localiza a una profundidad de 4.8 km. El modelo magnético muestra que la cámara magmática se extiende unos 5.6 km hacia el sur del CVC con un espesor de 0.54 km. La anomalía sobre el Nevado de Colima se ajusta considerando una cámara magmática colapsada alargada con una dirección N-S mayor a 5.6 km, con un espesor máximo de 1.2 km y ubicada a una profundidad de 5.2 km bajo el remanente del cráter del Nevado. (Figuras 7).

Los valores utilizados en el modelado magnético para las diferentes unidades litológicas fueron obtenidos de López-Loera *et al.* (2010) y se muestran en la Tabla 2. En el estudio desarrollado por Murray (1993) sobre la deformación del suelo en el Volcán de Colima durante 1982 a 1991, aplicando modelos elásticos simples a los datos de nivelación reporta que son consistentes con la deflación de una fuente sepultada a 2–4 km de profundidad. Mientras que Nuñez-Cornú *et al.*(1994), en el estudio de la actividad sísmica relacionada con la erupción de 1991 del Volcán de Colima, reportan que la mayoría de los focos de los temblores se localizan al N del cráter y que algunos de ellos son relativamente profundos entre 7 y 11 km bajo el cráter y que registran una región de quietud sísmica entre los 4 y 7 km bajo el nivel del cráter. Zobin *et al.*(2002) analizaron la distribución de epicentros de temblores localizados durante

la crisis sísmica de 1997-1998 y concluyen que la zona libre de temblores puede estar asociada a la posible zona donde el magma se almacena a una profundidad del orden de los 3.3 km, de acuerdo con las gráficas que muestran, y tienden a darle una forma triangular subyaciendo al Volcán de Colima.

En el modelado magnético de la estructura interna del Volcán de Colima se consideraron las propiedades magnéticas de las unidades geológicas presentes, principalmente las que afloran. La zona de contacto entre la cámara magmática y las rocas encajonantes se vuelve muy susceptible a cualquier pequeño cambio en su configuración, debiendo realizarse con cuidado extremo para lograr un ajuste aceptable, generando cambios contrastantes entre la anomalía observada y la calculada. Aunado a lo anterior el desconocimiento de las propiedades magnéticas a profundidad, principalmente de la unidad geológica subyacente, dificultan el proceso de modelar, principalmente la configuración de los contactos cámara-roca encajonante.

El análisis de la señal analítica (Nabighian, 1972, 1984; Roest *et al.*, 1992) del campo magnético reducido al polo y continuado ascendentemente por 5 km (Figura 8), nos muestra para los volcanes Nevado y de Colima una anomalía aeromagnética alargada en dirección N-S, en donde el alto magnético está relacionado con la cima del cráter. La anomalía esta circundada por bajos magnéticos en todas las direcciones, estos bajos se pueden asociar a zonas de debilidad de la corteza terrestre en esta área. Asimismo en la configuración de la señal analítica se puede observar una serie de anomalías positivas asociadas a cuerpos intrusivos distribuidos alrededor de la anomalía de los volcanes Nevado y de Colima (Figura 8).

En el estudio de López-Loera *et al.*(2010), relacionado con magnetismo terrestre en el Volcán de Colima, se reportan algunas fallas que en el presente estudio aeromagnético no se mencionan, por no presentar una expresión clara, en especial la reportada como Falla La Escondida. El principio físico del magnetismo es la Ley de Coulomb, la cual establece que la distancia de la fuente del magnetismo es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo que significa que a medida que uno se aleja de la fuente, la intensidad de la anomalía magnética decae exponencialmente; esa es la razón por la cual algunas fallas, fracturas o cuerpos detectados con magnetismo terrestre, con magnetismo aéreo pasen desapercibidas, más si consideramos que las alturas de vuelo en zonas volcánicas, aunque el SGM reporta que el estudio en general se realizó a 300 m de altura, es claro que con una nave aérea como con la que se realizó el vuelo (avión), la altura real sobre la zona de los volcanes debió ser mucho mayor que la reportada.

CONCLUSIONES

El método aeromagnético permitió identificar estructuras geológicas en el CVC que están cubiertas y enmascaradas debido a los productos volcánicos como flujos de lava, cenizas, escoria, avalanchas de escombros volcánicos y depósitos piroclásticos.

Los estudios aeromagnéticos ofrecen varias ventajas para estudiar estructuras volcánicas sobre topografía abrupta y en fases eruptivas activas, que presentan riesgos altos de acceso y observación. El método permitió identificar y definir características estructurales ocultas en el complejo volcánico de Colima (p. ej., fallas y fracturas), así como la distribución y extensión de sus productos. También permiteió identificar cuerpos intrusivos o volcánicos que no afloran, asociados a los contrastes magnéticos con las rocas encajonantes.

En la zona del graben se identifican 24 dominios aeromagnéticos en un área ~11,500 km^2, teniendo como centro a los volcanes Nevado y de Colima. La distribución de las anomalías magnéticas delinean dominios característicos de amplitudes y número de onda, que mapean y/o sugieren la distribución de derrames de lava, cenizas, escorias, depósitos piroclásticos y avalanchas de escombros volcánicos. Las susceptibilidades magnéticas de los diferentes materiales son contrastantes entre sí, generando anomalías de diferente amplitud y morfología, lo que permite su identificación en las configuraciones del campo magnético. Los análisis defi-

EN PRENSA

Tabla 2. Valores de propiedades magnéticas utilizadas en la sección modelada de la configuración del Campo Magnético Reducido al Polo. AEV-S-VC: Avalanchas de escombros volcánicos al sur del Volcán de Colima; CVC: conducto del Volcán de Colima; LAN: lavas andesíticas del Nevado de Colima; CVN: cuello volcánico de Nevado; AEV-N-VN: avalanchas de escombros volcánicos al norte del volcán Nevado; CM: cámara magmática; BSM: basamento sedimentario marino.

Tipo de Roca	Magnetismo	Remanencia			Bloque Principal (km)	
	Susceptibilidad (SI)	Mag (A/m)	Inc	Dec	Y+ Bloque	Y- Bloque
AEV-S-VC	0.000013	10	90	20	11	-16
CVC	0.000075	1.86	46	9	0.2	-0.2
LAN	0.000503	9.85	90	26	11	-16
CVN	0.000038	3.86	46	26	.4	-.5
AEV-N-VN	0.000013	10	90	20	38	-33
CM	0	0	0	0	4.8	-6.4
BSM	0	10	90	20	100	-100

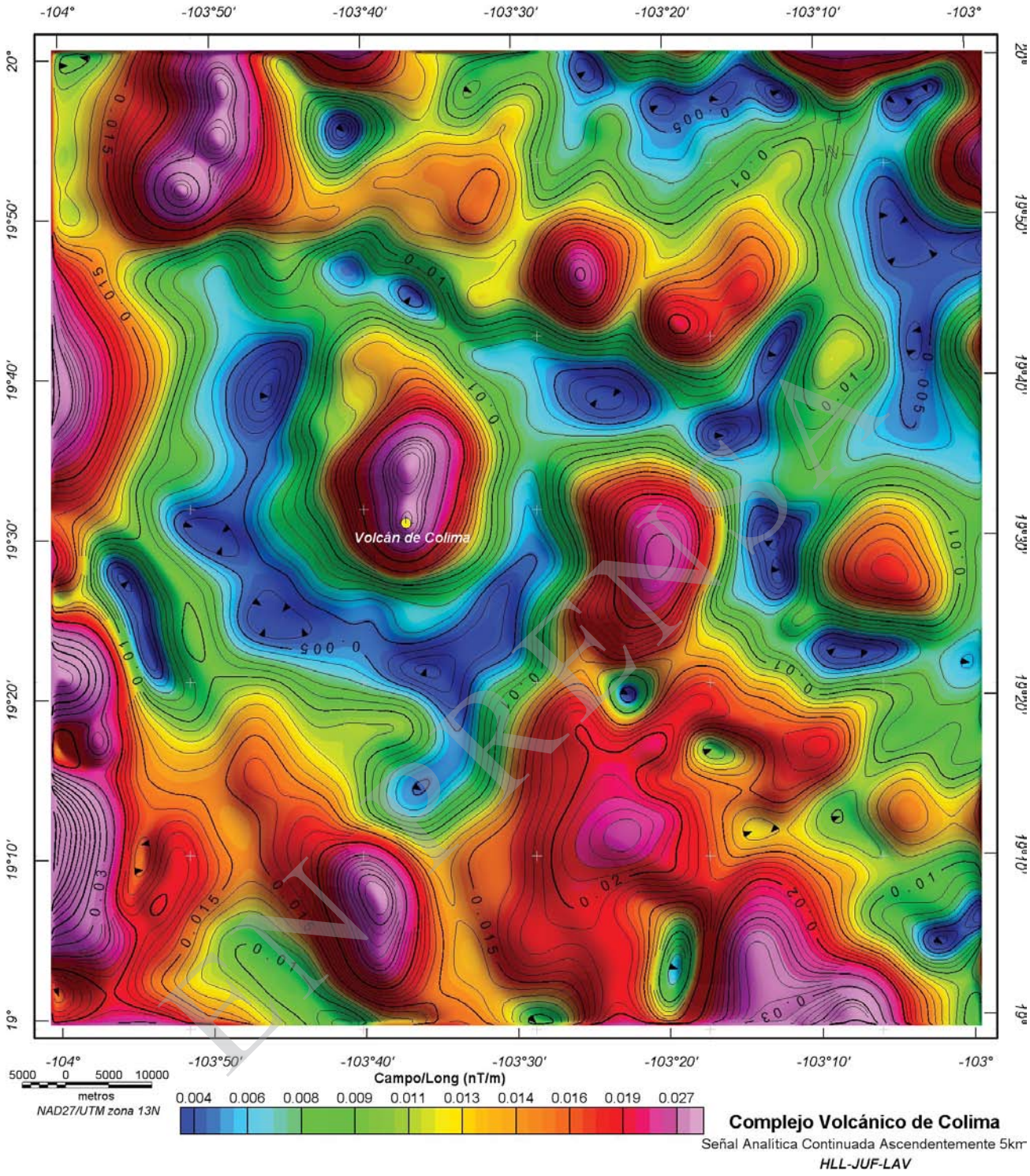


Figura 8. Mapa de la configuración de la señal analítica del campo magnético reducido al polo y continuado ascendentemente 5 km. Las grandes estructuras volcánicas se ven representadas por anomalías bien definidas. Nótese los límites del graben de Colima asociados a la zonas de gradiente tanto para el Río Naranjo como para el Río Armería. La porción central del lineamiento interpretado como falla "La Desconocida", con dirección NW-SE y que pasa al N del volcám Nevado, se ve representada por una serie de anomalías asociadas con valores bajos alineados en la dirección de la falla.

nen zonas de debilidad y fallas, límites de calderas, cuerpos intrusivos no aflorantes y contactos geológicos en el CVC. Para la documentación de las estructuras y lineamientos se cuantificaron los efectos regionales con los filtros regional-residual y efectos de magnetización remanente por medio de la reducción al polo.

El análisis aeromagnético del CVC muestra zonas de falla no reportadas en anteriores estudios. El análisis mues-

tra hacia el S y SE, lineamientos asociados con gradientes magnéticos que se relacionan con límite E de la estructura sur del graben de Colima. Asimismo, hacia el SE de la zona de estudio, al oriente del Río Tuxpán-Naranjo y con la misma dirección se observa un lineamiento magnético asociado a la traza de una zona de falla, que constituiría un semi-graben en esa área.

En el CVC se identifican dos anomalías aeromagnéticas interpretadas como apófisis de intrusivo que están enmascarados por depósitos de avalancha de escombros volcánicos, ubicados, uno al oeste del poblado de Quesería a 13 km al sur del Volcán de Colima y el segundo al este del poblado del Trapiche a 10 km al ENE de la ciudad de Colima, ambos alineados en una dirección norte-sur, continuando con el lineamiento general del CVC. Lo anterior sugiere que la migración del magmatismo de norte a sur del CVC no está limitada por las estructuras dómicas "Los Hijos del Volcán" (Luhr y Carmichael, 1990; Rodríguez-Elizarrarás, 1992), sino que continuó al menos por una distancia de 25 km al sur del Volcán de Colima.

El modelo en 2 ¾ dimensiones realizado sobre la estructura del Volcán de Colima y Nevado de Colima sugiere la existencia de una posible cámara magmática de forma alargada en dirección N-S, mostrando indicios de migración de la actividad magmática hacia el sur.

AGRADECIMIENTOS

El estudio forma parte de los proyectos de colaboración entre el IPICYT y la UNAM sobre Investigaciones Geofísicas de Volcanes Activos en el Centro de México. Agradecemos los comentarios del Dr. Gianluca Norini y de otro revisor anónimo y del editor asociado de la revista. Agradecemos a RESCO y en especial al Dr. Tonatiuh Domínguez su gentileza en proporcionarnos los datos sísmicos de los eventos sísmicos de 1997-1998 y la asistencia del Tec. Ing. David E. Torres Gaytán (IPICYT) en la elaboración de algunas figuras.

REFERENCIAS

Abrams, M., Glaze L., Sheridan, M., 1991, Monitoring Colima volcano, Mexico, using satellite data: Bulletin of Volcanology, 53. 571-574.

Allan, J.F., 1985, Sediment depth in northern Colima graben from 3-D interpretation of gravity: Geofísica Internacional, 24, 21-30.

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, 97, 473-485.

Allan, J.F., Carmichael, I.S.E., 1984, Lamprophyric lavas in the Colima Graben SW, Mexico: Contributions Mineralogy and Petrology 88, 203-216.

Álvarez, R., Bonifaz, R., Martín del Pozzo, A.L., 1993, Volcanic hazard evaluation through remote sensing in Colima volcano México: Pasadena, California, USA, Environmental Research Institute of Michigan (ERIM), Proceedings of the Ninth Conference on Geologic Remote Sensing, 903-913.

Álvarez, R., López-Loera, H., Arzate, J., 2010, Modeling the marine magnetic field of Bahía de Banderas, Mexico, confirms the half-graben structure of the bay: Tectonophysics, 489, 14-28.

Aubert, M., Lima, E., 1986, Hydrothermal activity detected by self potential measurements at the N-S volcanic axis between the volcanoes Nevado de Colima and Volcan de Colima (Mexico): Geofísica Internacional, 25, 3075-3078.

Bandy, W., Mortera-Gutiérrez, C., Urrutia-Fucugauchi, J. 1993, Gravity field in the southern Colima graben. Mexico: Geofísica Internacional, 32, 561-567.

Bandy, W., Mortera-Gutiérrez, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Hilde, T.W.C., 1995, The subducted Rivera-Cocos plate boundary- where is it, what is it and what is it its relationship to the Colima rift?: Geophysical Research Letters 22, 3075-3078.

Baranov, V., Naudy, H., 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole: Geophysics, 29, 67-79.

Blakely, R.J., Wells, R.E., Weaver, C.S., Johnson, S.Y., 2002, Location, structure, and sismicicity of the Seattle fault zone, Washington: Evidence from aeromagnetic anomalies, geological mapping, and seismic-reflection data: Geological Society of America Bulletin, 114, 169-177.

Blakely, R.J., 1995, Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications: Cambridge University Press, 441 pp.

Breton, G.M., Ramírez, J.J., Navarro, C., 2002, Summary of the historical eruptive activity of Volcán de Colima, Mexico 1519-2000: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 21-46.

Cabrera-Gutiérrez, R., Espíndola, J. M., 2010. The 1998-1999 eruption of Volcán de Colima, Mexico: an application of Maeda´s viscoelastic model: Geofísca Internacional, 49(2), 83-96.

Capra, P.L., 2000, Colapso de edificios volcánicos: transformación de avalanchas de escombros en flujos de escombros cohesivos: Los casos del Monte Santa Elena (EE.UU.), Nevado de Toluca y Nevado de Colima (México): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Tesis Doctoral, 120 pp.

Capra, L., Macías, J.L., 2002, The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km^3): A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (México): Journal of Volcanology and Geothermal Research 117, 213-235.

Clement, B.M., Connor C.B., Graper, G., 1993, Paleomagnetic estimate of the emplacement temperature of the long-runout Nevado de Colima volcanis debris avalanche deposit, Mexico: Earth and Planetary Science Letters, 120, 499-510.

Connor, C.B., Lane S.B., Clement, B.M., 1993, Structure and thermal characteristics of the summit dome, March, 1990-March, 1991: Volcan Colima, Mexico: Geofísica Internacional, 32, 643-657.

Cortés, A., Garduño-Monroy, V.H., Navarro-Ochoa, C., Komorowski, J.C., Saucedo, R., Macías, J.L., Gavilanes, J.C., 2005, Carta Geológica del Complejo Volcánico de Colima, con Geología del Complejo Volcánico de Colima: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras 10, escala 1:10,000, 1 mapa con texto explicativo, 37 pp.

De la Cruz Reyna, S., 1993, Random patterns of occurrence of explosive eruptions Colima Volcano, México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 55, 51-58.

Fedi, M., Florio, G., Rapolla, A., 1998, 2.5D modelling of Somma-Vesuvius structure by aeromagnetic data: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 82, 239-247.

Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcanica Transmexicana durante la ultima decada: Boletin de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 84-92.

Ferrari, L., Vaggelli, G., Petrone, C.M., Manetti, P., Conticelli, S., 2000, Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: Tectonophysics, 318, 161-185.

Finn, C., Williams, D.L., 1987, An aeromagnetic study of Mount St. Helens: Journal of Geophysical Research, 92, 10,194-206.

Finn C.A., Morgan, L.A., 2002, High-resolution aeromagnetic mapping of volcanic terrain, Yellowstone National Park, 2002: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 115, 207-231.

EN REVISIÓN

Flanagan, G., Williams, D.L., 1982, A magnetic investigation of Mount Hood, Oregon: Journal of Geophysical Research B, 87, 4, 2804-2814.

Galindo, I., Dominguez, T., 2002, Near real-time satellite monitoring during the 1997-2000 activity of Volcan de Colima (Mexico) and its relationship with seismic monitoring: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 91-104.

Gibson, R.I., Milligan, P.S. (eds.), 1998, Geologic Applications of Gravity and Magnetics: Case Histories: Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Reference Series, 8, 162 pp.

Hagiwara, Y., 1965. Analysis of the results of the aeromagnetic surveys over volcanoes in Japan (I): Bulletin of the Earthquake Research Institut, 43, 529-547.

Henderson, R.G., 1970, On the validity of the use of the upward continuation integral for total magnetic intensity data: Geophysics, 35, 916-919.

Henderson, R. G., Zietz, I., 1949, The upward continuation of anomalies in total magnetic magnetic intensity fields: Geophysics, 14, 517-534.

Henkel, H., Guzman, M., 1977, Magnetic features of fracture zones: Geoexploration, 15, 173-181.

Heiland, C.A., 1963. Geophysical mapping from air: Its possibilities and advantages: Enginniering and Minning Journal, 136, 609-610.

Hildenbrand, T.G., Rosenbaum, J.J., Kauahikaua, P., 1993, Aeromagnetic study of the island of Hawaii. Journal of Geophysical Research, 98, 4099-4119.

Honkura Y., 1991. A magnetic anomaly map in the Japanese region with special reference to tectonic implications: Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 43, 71-83.

Komorowski, J.C., Cortés, A., Navarro,C., Gavilanes, J.C., Siebe, C., Rodríguez, S., 1996, Edifice collapse and debris avalanches deposits at Colima volcanoes, México –a review with new variations on a recurrent theme (resumen extenso en formato electrónico): Colima, México, Universidad de Colima, 5ª Reunión Internacional "Volcán de Colima".

Lermo, J., Cuenca, J., Monfret, T., Hernández, F. J., Nava, E., 1993, Algunas características espectrales de la sismicidad asociada a la actividad del Volcán de Colima: Geofísica Internacional, 32,4, 683-697,

López-Loera, H., Gutiérrez-Pineda, C., 1977, Pseudosecciones geo-eléctricas e implicaciones geohidrológicas en el valle de Colima: Geofisica Internacional, 17,2, 127-150.

López-Loera, H., Urrutia-Fucugauchi, J., 1996, Geophysical study of faulting associated with the Colima Volcanic Complex: Colima, México, Universidad de Colima, 5a Reunión Internacional "Volcán de Colima".

López-Loera, H., Urrutia-Fucugauchi, J., 1999. Spatial and temporal magnetic anomalies of Colima volcano, western México: Geofisica Internacional, 39, 3-16.

López-Loera, H., Aranda-Gómez, J.J., Arzate, J.A., Molina-Garza, R.S., 2008, Geophysical surveys of the Joya Honda mar (México) and surroundings; volcanic implications: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 170, 135-152.

López-Loera, H., J., Urrutia-Fucugauchi, J., Alva-Valdivia, L.M., 2010, Magnetic characteristics of fracture zones and constraints on the subsurface structure of the Colima Volcanic Complex, western Mexico: Geosphere 6,1,35-46.

Lugo-Hubp, J., Martín del Pozzo, A. L., Vázquez-Selem, L., 1993, Estudio geomorfológico del Complejo Volcánico de Colima: Geofísica Internacional, 32, 4, 633-641.

Luhr, J.F., 1981, Colima: History and cyclicity of eruptions: Volcano News, 7, 1-3.

Luhr, J.F., 2002, Petrology and geochemistry of the 1991 and 1998-1999 lava flow from Volcán de Colima, México: Implications for the end of the current eruptive cycle: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117,1-2,169-194.

Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1980, The Colima Volcanic Complex, Mexico. Part I, Post-caldera andesites from Volcan Colima: Contributions to Mineralogy and Petrology, 71, 343-372.

Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1981, The Colima Volcanic Complex, Mexico. Part II, Late Late Quaternary cinder cones: Contributions to Mineralogy and Petrology, 76, 127-147.

Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1982. The Colima Volcanic Complex, Mexico. Part III. Ash and scoria-fall deposits from the upper slopes of Volcan Colima: Contributions to Mineralogy and Petrology, 80, 262-275.

Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1990, Geology of Volcan de Colima. Bol. Inst.Geol:, UNAM, 107, 101p.

Luhr, J. F., Prestegaard, K.L., 1988. Caldera formation at Volcan Colima, Mexico, by a large Holocene volcanic debris avalanche: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 35, 335-348.

Luhr, J.F., Nelson, S., Allan, J., Carmichael, I.S.E., 1985. Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump: Geology, 13, 54-57.

Macías, J.L., Capaccioni, B., Conticelli, S., Giannini, L., Martín, M., Rodríguez, S., 1993, Volatile elements in alkaline and calc-alkaline rocks from the Colima graben, México; Constrains on their genesis and evolution: Geofísica Internacional, 32, 575-590

Manea, M, Manea, V.C., 2008, On the origin of El Chichón volcano and subduction of Tehuantepec Ridge: A geodynamical perspective: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 175, 459-471.

Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters: SIAM Journal on Applied Mathematics, 11, 431-441.

Medina-Martínez, F., 1983, Analysis of the eruptive history of the Volcan de Colima, México (1560-1980): Geofisica Internacional, 22, 157-178.

Medina-Martínez, F., Espíndola, J.M., De la Fuente, M., Mena, M., 1996, A gravity model model of the Colima. México region: Geofisica Internacional, 35, 4. 409-414.

Meridee J.C., 1995, Structural controls of Holocene reactivation of the Meer fault, Southwestern Oklahoma, from magnetic studies: Geological Society of America Bulletin, 107(1), 98-112.

Mora, J.C., Macías, J.L., Saucedo, R., Orlando, A., Manetti ,C., Basille, O., 2002, Petrology of the 1998-2000 products of Volcán de Colima, México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 195-212.

Mooser, F., 1961. Los Volcanes de Colima: Universidad Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geología, 61, 49-71.

Murray, J.B., 1993, Ground deformation at Colima Volcano, Mexico, 1982 to 1991: Geofisísica Internacional, 32, 659-669.

Murray, J.B., Wooller, L.K., 2002, Persistent summit subsidence at Volcán de Colima, México, 1982-1999: strong evidence against Mogi deflation: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 69-78.

Nabighian, M.N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation: Geophysics. 37, 507-517.

Nabighian, M.N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations: Geophysics, 49, 780-786.

Nakatsuka, T., Utsugi, M., Okuma, S., Tanaka, Y., Hashimoto, T., 2009, Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activity: An application of the generalized mis-tie control method: Tectonophysics, 478, 3 -18.

Navarro-Ochoa, C., Gavilanes-Ruíz, J.C., Cortés-Cortés, A., 2002, Movement and emplacement of lava flow at Volcán de Colima, México: November 1998 – February 1999: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 155-167.

Nixon, T., 1982. The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of the subducted ocean lithospere: Geological Society of America Bulletin, 93, 514-523.

Nuñez-Cornú, F., Nava, F.A., De la Cruz-Reyna, S., Jiménez, Z., Valencia, C., García-Arthur, R., 1994, Seismic activity related to the 1991 eruption of Colima Volcano, Mexico: Bulletin of Volcanology, 56, 228-237.

Norini, G., Capra, L., Groppelli, G., Agliardi, F., Pola, A., Cortés, A., 2010,

EN PRENSA

Structural architecture of the Colima Volcanic Complex: Journal of Geophysical Research, 115 , B12209, 1-20.

Okuma, S., Stotter, C., Supper, R., Nakatsuka, T., Furukawa, R., Motschka, K., 2009, Aeromagnetic constrains on the subsurface structure of Stromboli Volcano, Aeolian Islans, Italy: Tectonophysics, 478, 19-33.

Ozima, M., Kinoshita, H., 1964, Magnetic anisotropy of andesites in a fault zone: Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 16, 194-200.

Pascacio-Toledo, R., 2001. Texto Guía Carta Magnética "Colima" E13-3 escala 1:250,000: México, Consejo de Recursos Minerales, 13 pp.

Ramírez-Ruiz, J.J., Santiago-Jiménez, H., Alatorre-Chávez, E., Bretón-González, M., 2002, EDM deformation monitoring of 1997-2000 activity at Volcán de Colima: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 61-67.

Rebolledo-Vieyra, M., J. Urrutia-Fucugauchi y H. López-Loera, 2010. Aeromagnetic anomalies and structural model of the Chicxulub multiring impact cráter, Yucatan, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 27, 1, 185-195.

Reyes, G., Jiménez, Z.,1996, Catálogo de temblores en la región de Colima, México de 1989 a 1996. Datos inéditos: Universidad de Colima, Centro Universitario de Estudios e Investigaciones Vulcanológicas, Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima (RESCO).

Robin, C., Mossand, P., Camus, G., Cantagrel, J.M., Vicent, P., 1987,Eruptive history of the Colima volcanic complex (Mexico): Journal of Volcanology and Geothermal Research, 31, 99-113.

Robin, C., Komorowsi, J.C., Boudal, C., Mossand, P., 1990, Mixed magma pyroclastic surge deposits associated with debris avalanche deposits at Colima Volcanoes, Mexico: Bulletin of Vulcanology, 52, 391-403.

Robin, C., Camus, G., Gourgaund, A., 1991, Eruptive and magmatic cycles at Fuego de Colima (Mexico): Journal of Volcanology and Geothermal Research, 45, 209-225.

Rodríguez-Elizarrarás S., 1992, Geología del Volcán de Colima, estados de Jalisco y Colima: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis de maestría, 110 pp.

Roest, W. R., Arkani-Hamed, J., Verhoef, J., 1992, The seafloor spreading rate dependence of the anomalous skewness of marine magnetic anomalies: Geophysical Journal International, 109, 653-669

Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño, V.H, Urrutia Fucugauchi, J., 1996, The continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Neogene kinematics of western Mexico: Geology, 24(10), 921-924.

Saucedo, R., Macías, J.L., Bursik, M., Mora, J.C., Gavilanes, J.C., Cortés, A., 2002, Emplacement of pyroclastic flows during the 1998-1999 eruption of Volcán de Colima, México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 129-153.

Serpa, L., Katz, C., Skidmore, C., 1989. The southeastern boundary of the Jalisco block in west-central Mexico: EOS Transactions, 70, 1319.

Serpa, L., Smith, S., Skidimore, C., Sloan, R., Pavlis, T., 1992, A geophysical investigation of the southern Jalisco block in the state of Colima: Geofísica Internacional, 31, 475-492.

Stoopes, G., Sheridan, M.F., 1992. Giant debris avalanches from the Colima volcanic complex, Mexico –implications for long-runout landslides (>100 km) and hazard assessment: Geology, 20, 299-302.

Taran, Y., Gavilanes, J.C., Cortés, A., 2002, Chemical and isotopic composition of fumarolic gases and the SO_2 flux from Volcán de Colima, México, between the 1994 and 1998 eruptions: Journal of Volcanology and Geothermal Research 117, 105-119.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A., 1976, Applied Geophysics: Cambridge University Press, 860 pp.

Thorpe, R.S., Gibson, I.L., Vizcaino, J.S., 1977, Andesitic pyrocalyic flows from Colima volcano: Nature, 265,724-725.

Urrutia-Fucugauchi, J., 1977, Importancia del magnetismo remanente en la interpretación de anomalías magnéticas: Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, 18(4), 83-116

Urrutia-Fucugauchi, J., Del Castillo, L., 1977, Un modelo del Eje Neovolcánico Mexicano: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 38, 18-28.

Urrutia-Fucugauchi, J., Molina-Garza, R.S., 1992, Gravity modeling of regional crustal and upper mantle structure of Guerrero terrane, 1, Colima graben and southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Geofísica Internacional, 31, 493-507.

Urrutia-Fucugauchi, J., Martín del Pozzo, A.L., Alva-Valdivia, L., López-Loera, H., Ponce, R., 1997, Paleomagnetic estimates of emplacement temperatures of pyroclastic deposits from the Colima volcanic complex: IAVCEI General Assembly, January 1997, Puerto Vallarta, Mexico, Abstracts, p.12.

Urrutia Fucugauchi, J., Flores Ruiz, J.H., Bandy, W.L., Mortera-Gutiérrez, C., 1999, Crustal structure of the Colima rift, western Mexico: Gravity models revisited: Geofísica Internacional, 38(4), 205-216

Urrutia-Fucugauchi, J., Martínez-Pepin, N., Hernández, I., Arciniega, A., López-Loera, H., Flores-Ruiz, J.H., Anaya, C., 2002, Aeromagnetic anomalies and structure of the Iztaccíhuatl-Popocatépetl volcanic región in Central Mexico: Geofísica Internacional, 41(2), 121-131.

Waitz, P., 1906, Le Volcán de Colima: Mexico, D.F., Congreso Geológico Internacional, 10, Excursión 13, 27 pp.

Waitz, P., 1932, Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima: Memoria de la Sociedad Científica Antonio Alzate (México), 53, 349-384.

Webring, M., 1985, SAKI: a FORTRAN program for generalized inversion of gravity and magnetic profiles: United States Geological Survey, Open File Report 85-122, 29 pp.

Williams, D.L., Finn, C., 1987, Evidence for shallow pluton beneath the Goat Rocks Wilderness, Washington, from gravity and magnetic data: Journal of Geophysical Research, 92, 4867-4880.

Zobin, V.M., Luhr, J.F., Taran, Y.A., Breton, M., Cortés, A., De la Cruz-Reyna, S., Dominguez, T., Galindo, I., Gavilanes, J.C., Muñiz, J., Navarro, J.C., Ramírez, J.J., Reyes, G.A., Ursua, M., Velasco, J., Alatorre, E., Santiago, H., 2002, Overview of the 1997-2000 activity of Volcán de Colima, México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 1-19.

Manuscrito recibido: Octubre 5, 2010
Manuscrito corregido recibido: Abril 7, 2011
Manuscrito aceptado: Mayo 4, 2011

EN PRENSA