

GEOMORFOLOGÍA DE LA SIERRA DE GUADALUPE (AL NORTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO) Y SU RELACIÓN CON PELIGROS NATURALES

José Lugo-Hubp* y
Araceli Salinas-Montes*

RESUMEN

La sierra de Guadalupe es una unidad volcánica neogénica, que consiste en domos volcánicos y volcanes compuestos que constituyen una estructura circular de 17 km de diámetro, con una altura de 800 m respecto a la planicie lacustre que la delimita. Se hizo un estudio geomorfológico cuyos resultados son sintetizados en tres mapas principales: morfogenético, morfotectónico y de peligros naturales. En el primero, se reconoce 18 elementos distintos que muestran la transformación del relieve volcánico y tectónico neogénico por la erosión, principalmente del Cuaternario. En el segundo mapa se aprecia las estructuras geológicas (domos volcánicos, fracturas, fallas) con una clara expresión en el relieve, ya que la erosión los ha expuesto con claridad y no se ha pasado a una etapa en que desaparezcan los rasgos originales. El tercer mapa señala los frecuentes riesgos naturales (inundaciones y caída de rocas) que causan daños a casas habitación construidas en lugares peligrosos. Un crecimiento urbano acelerado se produjo a partir de los años setenta, mismo que actualmente avanza sobre las laderas.

Palabras clave: Cuenca de México, geomorfología, peligros naturales.

ABSTRACT

The sierra de Guadalupe is a volcanic neogenic unit consisting of domes and strato-volcanoes, having a circular arrangement with a diameter of 17 km and a height of 800 m above the surrounding lacustrine plain. The results of a geomorphological study are synthesized in three main maps: morphogenetics, morphotectonics and natural hazards. In the first one, 18 different elements are recognized which show the transformation of the volcanic and tectonic neogenic landforms due to erosion, taking place mainly during the Quaternary. In the second map the geological structures (domes, fractures, faults) are clearly expressed since erosion has not erased the original forms. The third map points out the distribution of common natural hazards such as floods and rockfalls which can cause damage to housing constructed in risky zones. The accelerated urban growth that has taken place since the 70's is responsible for the invasion of unsuitable areas on slopes.

Key words: Basin of Mexico, geomorphology, natural hazards.

INTRODUCCIÓN

La sierra de Guadalupe, con una altitud máxima de 3,000 m s.n.m.m., se localiza en el extremo septentrional del Distrito Federal y porciones contiguas del Estado de México (Figura 1). Es un pequeño conjunto de elevaciones volcánicas independientes y sobrepuestas (Figura 2), formado a partir del Mioceno (Mooser *et al.*, 1992). Vista en planta, es de forma casi circular, con un diámetro aproximado de 17 km.

Son pocos los trabajos sobre esta zona de la cuenca de México, entre ellos dos tesis profesionales, una con orientación petrológica, de Campa-Uranga (1965), y un estudio geológico general de Lozano-Barraza (1968). Otros autores se han ocupado de la zona, comprendida en un marco geológico amplio: Mooser (1956a, 1956b, 1961, 1975) reconoció tipos de rocas, volcanes y estructuras disyuntivas y propuso edades; de Cserna y colaboradores (1988) contribuyeron principalmente con el reconocimiento de fallas nuevas y Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) realizaron un análisis muy completo sobre la estratigrafía y geología estructural de la cuenca de México. Una publicación reciente de Mooser y colaboradores (1992) incluye un mapa geológico (Figura 3) novedoso de la sierra de

Guadalupe. Enciso de la Vega (1992) hizo un análisis sobre los diversos modelos estratigráficos de la cuenca de México y propuso modificaciones sustanciales. Entre las publicaciones antiguas, debe destacarse la de Ordóñez (1895).

Este estudio es parte de un proyecto de investigación con orientación geomorfológica, sobre la cuenca de México, del cual resultó la tesis profesional de Salinas-Montes (1994). El objetivo principal es un estudio del relieve con enfoques morfogenético y morfotectónico, lo que se aplica a los peligros naturales que amenazan a algunos asentamientos humanos, debido a un crecimiento explosivo de la población.

Hace 25 años, la sierra de Guadalupe estaba separada de la Ciudad de México por llanos amplios. Poblaciones pequeñas, como Ecatepec, Ixhuatepec, Zacatenco, Cuauhtepc, Tenayuca, Coacalco y otras, fundadas en la época prehispánica, eran reconocidas en la periferia de lo que fue la ribera lacustre (Figura 2). Actualmente se pierden en la inmensa mancha urbana que rodea y asciende las laderas montañosas. El estudio se realizó con base en la interpretación de fotografías aéreas (ICA, 1991) y con mapas topográficos (SIGSA, 1986a-d). Lo anterior se complementó con trabajo de campo.

Los resultados principales del estudio de la sierra de Guadalupe, hecho en gabinete y campo, son sintetizados en tres mapas principales: morfogenético, morfotectónico y de peligros naturales.

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

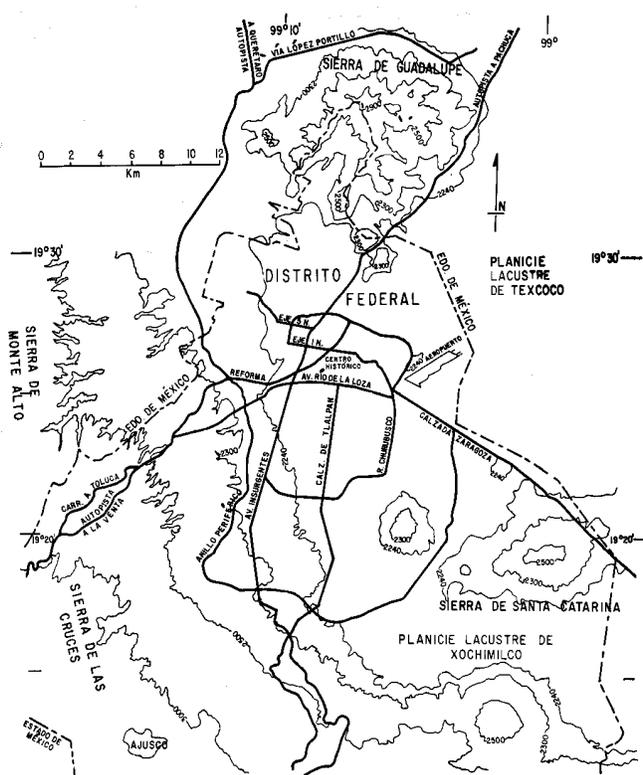


Figura 1. Localización de la sierra de Guadalupe al norte de la Ciudad de México. Fuentes: INEGI (1984, 1985), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1994).

El mapa morfogenético se elaboró con base en las recomendaciones de diversos autores (Demek, 1972; Bashenina *et al.*, 1968; Tricart, 1972; Demek y Embleton, 1978), mismas que consisten en clasificar la superficie terrestre, independientemente de la escala aplicada, en porciones distintas de las contiguas por su aspecto externo y origen, lo que se obtuvo con la interpretación de fotografías aéreas, mapas topográficos y geológicos y con las observaciones hechas en el terreno. El mapa morfotectónico es una síntesis del anterior, pero se diferencia de aquél porque su objetivo es mostrar la relación entre el relieve y la estructura geológica; la metodología es tratada también por Bashenina (1975). El estudio geomorfológico de la sierra de Guadalupe se aplica al problema de los peligros por fenómenos naturales, por lo que son tomados algunos elementos de los dos mapas anteriores para la realización de éste.

GEOLOGÍA

La sierra de Guadalupe se une al occidente con la sierra Las Cruces-Monte Alto a través de algunas elevaciones (Figura 2). Entre éstas, hay diferencias petrológicas señaladas por Ordóñez (1895, p. 13), quien definió la sierra Las Cruces-Monte Alto constituida de andesitas y traquiandesitas hasta los límites con la sierra de Guadalupe, en la zona de Barrientos, donde predominan las andesitas de hornblenda; mientras que

más al oriente, en lo que es propiamente la sierra de Guadalupe, son dacitas (Ordóñez, 1895).

Los volcanes principales de la sierra de Guadalupe son de tipo compuesto, originados por poderosas erupciones explosivas, que culminaron con actividad extrusiva y efusiva. Ejemplo de ello son los volcanes Guerrero, Zacatenco, Jaral, María Auxiliadora, Los Díaz, Tres Padres y Moctezuma; otras elevaciones menores se formaron casi exclusivamente por actividad extrusiva, y es el caso de los domos volcánicos que están en la periferia de la sierra: Gordo, Chiquihuite, Tenayo, Tepeyac y otros.

Los tipos de roca de la zona estudiada fueron descritos por algunos autores, y se trata de andesita con alto contenido de sílice (dacita), frecuentemente con feldespato (Ordóñez, *op. cit.*). El estudio de Campa-Uranga (1965) indica que las rocas que constituyen la sierra de Guadalupe son principalmente andesita, y en cantidades menores, riolita y dacita. Lozano-Barrera (1968) considera que predominan las andesitas, lo que incluye brechas, pórfidos y vitrófidos.

En la mayor parte de la superficie de la sierra de Guadalupe, predominan los derrames de lava, lo que se explica por la actividad dómica que le dio origen y por la erosión que ha removido los materiales menos resistentes, del tipo de los materiales piroclásticos. Durante el trabajo de campo, se observó varios cortes naturales y artificiales, que permitieron reconocer 11 tipos distintos de material no consolidado, que consisten en los de origen lahárico, de derrame piroclástico (Figura 4), detritos de lava alterada, ceniza, arena, pómez, brecha, arena y ceniza, pómez con arena y ceniza, conglomerado y depósitos de ladera.

Las observaciones de campo permitieron reconocer que los derrames de lava (no diferenciados por su composición) representan, en general, la culminación de la actividad volcánica. En cambio, los materiales como pómez y ceniza y arena volcánica, corresponden a las etapas iniciales de las erupciones (Figura 5). Se observa los grosores mayores de estos depósitos en canteras grandes.

La parte más elevada, a 2,800-3,000 m s.n.m., que de manera convencional llamaremos *el núcleo de la sierra*, está constituida por un grupo de domos volcánicos y un volcán compuesto—Moctezuma—que en apariencia representa la zona donde se produjo la actividad volcánica mayor.

La sierra de Guadalupe se formó esencialmente por dos tipos de actividad volcánica. Una en que los procesos explosivos fueron de gran intensidad y representan las etapas iniciales de los edificios mayores, los cuales culminaron con procesos extrusivos. El otro tipo fue de derrames de lava (procesos efusivos), escasos y de corta extensión.

Los primeros intentos por definir la estratigrafía de la sierra de Guadalupe son de Mooser (1956a), con un mapa de una excursión geológica que incluye la porción meridional de esta zona, que entonces se consideró oligocénica. En 1968, Lozano reportó los fechamientos de dos rocas de la sierra, en Barrientos y en la fosa de Cuauhtepac (Figura 2), del orden de

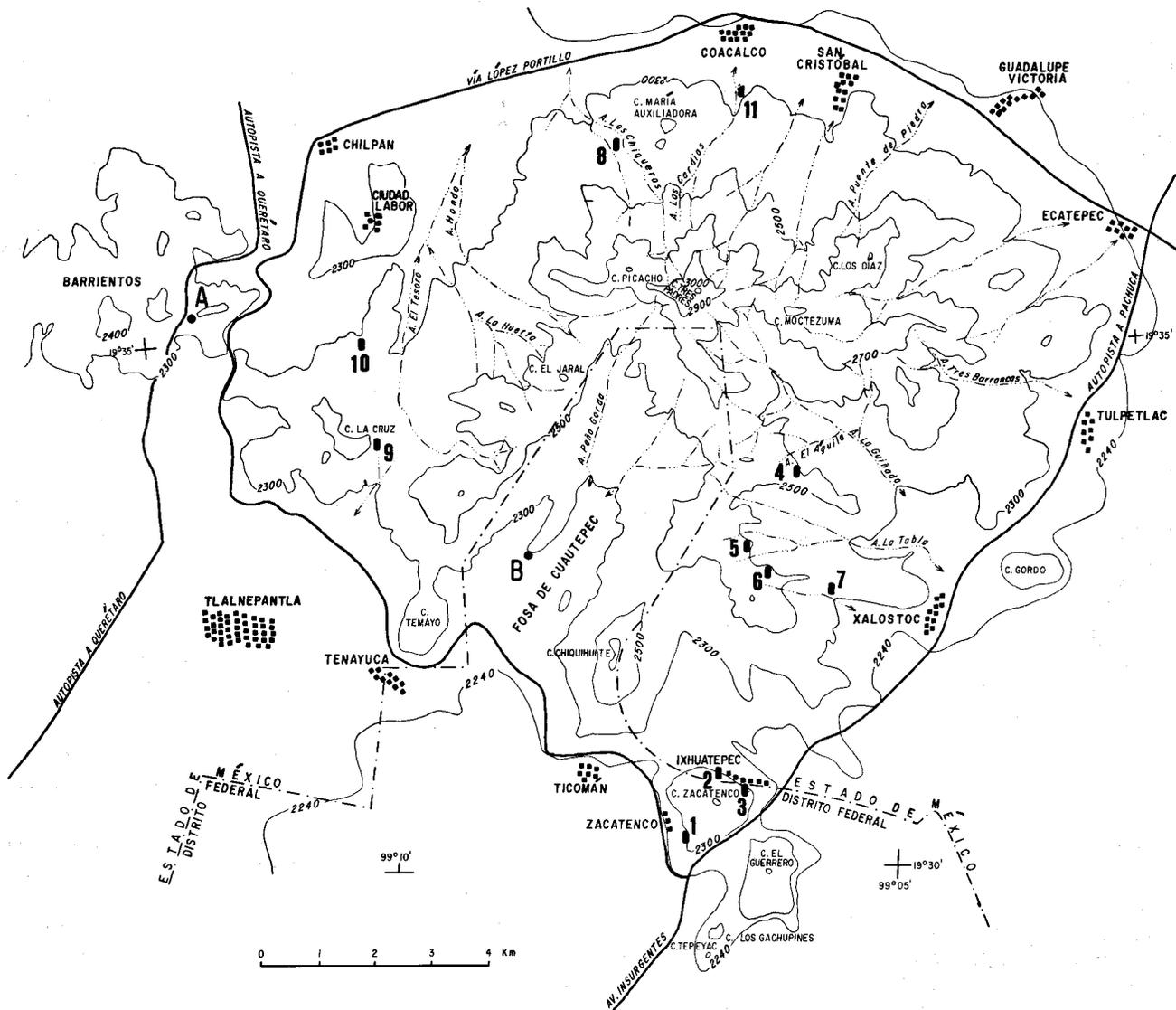


Figura 2. Esquema general de la sierra (con base en SIGSA, 1986a-d). Los números representan las localidades donde fueron elaboradas columnas litológicas; A y B son las localidades donde Lozano-Barraza (1968) recolectó muestras para fechamiento.

14-15 Ma (Mioceno), determinados por K-Ar. En el mapa geológico de la cuenca de México, Mooser (1975) atribuye una edad a la sierra principalmente del Mioceno temprano, y en 1992, Mooser y colaboradores, con base en un conocimiento mejor del subsuelo de la cuenca, la consideran del Plioceno en su mayor parte. Asimismo, propusieron una nueva secuencia evolutiva.

Mooser y colaboradores (*op. cit.*) señalan una edad oligocénico-miocénica para Barrientos, y pliocénica al oriente de ésta.

La actividad volcánica debe haber iniciado inmediatamente al occidente de la zona estudiada, con la formación de la fosa de Barrientos, donde están las elevaciones más erosionadas y las que Mooser y colaboradores (*op. cit.*) consideraron del Mioceno tardío. De acuerdo con los mismos autores, siguió la formación de la caldera de Cuauhtépec (Plioceno temprano) y, posteriormente, la fosa del mismo nombre, y asociados a ésta, los volcanes compuestos y domos volcánicos de la peri-

feria meridional: Tepeyac, Guerrero, Chiquihuite y otros. Siguió el *núcleo*, lo que es evidente por la morfología y las estructuras geológicas cubiertas por esta unidad, como fue señalado por Lozano-Barraza (1968) y Mooser y colaboradores (1992). Finalmente, fueron emplazados los domos del noroeste de la sierra.

En el *núcleo* de la sierra, se aprecia un grado mayor de fractura, intemperismo avanzado, hidrotermalismo, presencia de diques con orientación casi E-W, escarpes de falla, una mayor concentración de corrientes fluviales y anomalías morfométricas (Salinas-Montes, 1994).

El volcanismo de la sierra de Guadalupe tuvo una erupción aparentemente final en el Pleistoceno tardío, con un cono de escoria, único en la zona, en el poblado Guadalupe Victoria. Lo describen Campa-Uranga (1965) y Lozano-Barraza (1968), pero, convertido en banco de material, ha desaparecido del paisaje y sólo permanecen bloques de roca del tipo del basalto y escoria roja.

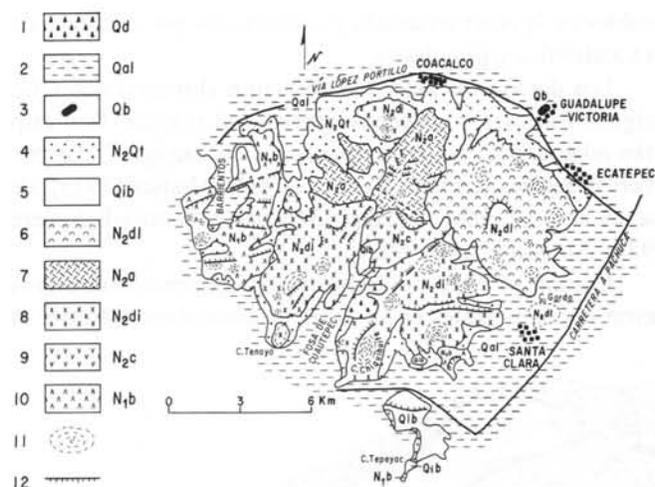


Figura 3. Mapa geológico de la sierra de Guadalupe (Mooser *et al.*, 1992). Cuaternario (Q): 1, depósitos de derrumbes (Qd); 2, aluvión (Qal); 3, basaltos (Qb). Plioceno (N₂) al Cuaternario: 4, depósitos Tarango (N₂Qt); 5, basaltos del Cuaternario inferior (Qib). Plioceno: 6, domos finales (N₂dl); 7, volcán del Águila (N₂a); 8, domos iniciales (N₂di); 9, caldera de Cuauatepec (N₂c). Mioceno (N₁): 10, sierra de Barrientos. Símbolos: 11, domos; 12, fallas normales. El mapa es un fragmento del original y se modificó la simbología.

GEOMORFOLOGÍA

RASGOS GENERALES

El relieve se eleva de la cota 2,240 a los 2,800-3,000 m s.n.m.m. que alcanza en el núcleo de la sierra. Entre puntos extremos, de la cima del Tres Padres a Coacalco, el gradiente es de 0.19. La disección se manifiesta por barrancos, circos de erosión y valles, algunos considerablemente anchos, en forma de herradura, como la fosa de Cuauatepec con una dirección al NE, y el valle del río La Guiñada al NW, ambas orientadas hacia el Pico Tres Padres.

El límite de la planicie lacustre se localiza entre los 2,240 y 2,250 m s.n.m.m. (más alto en la vertiente septentrional) y de ahí hasta la base de las laderas volcánicas se extiende una planicie inclinada de 1 a 6°, en toda la margen de la sierra—el piedemon-



Figura 4. Depósito de derrame piroclástico (columna 5 de la figura siguiente).

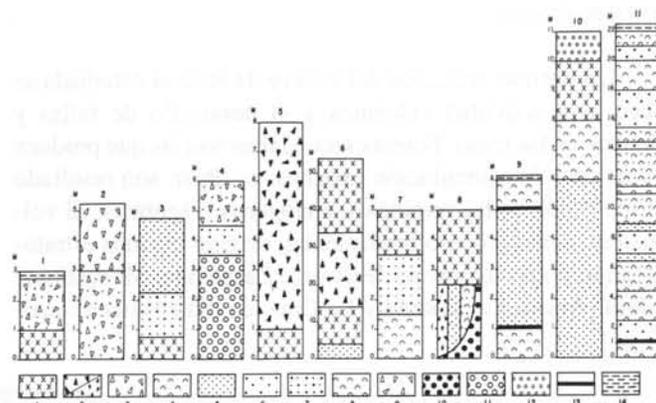


Figura 5. Columnas litológicas. 1, Derrames de lava (andesita y dacita); 2, depósito de derrame piroclástico; 3, detritos de andesita alterada; 4, pómez; 5, piroclastos finos (tipo ceniza); 6, piroclastos tipo arena; 7, arena y ceniza; 8, toba pumítica, con arena y ceniza; 9, piroclastos con bloques; 10, depósito de lahar; 11, depósito de derrame de lodo; 12, conglomerado; 13, caliche; 14, suelo. Se indica las localidades correspondientes a cada columna en la Figura 2.

te—generalmente hasta los 2,400 m s.n.m.m. y tiene una anchura que varía de algunos cientos de metros a dos kilómetros.

La red fluvial está controlada esencialmente por las grietas de las rocas, fenómeno favorecido por la casi total ausencia de una capa superficial gruesa de material no consolidado.

Salinas-Montes (1994) obtuvo diversos valores numéricos sobre el relieve (morfometría): densidad de disección (longitud, en km, de cauces fluviales, por km²) es de 0.5 en la base y aumenta gradualmente desde 5.5 hasta 7 km/km² en el núcleo. La clasificación de las corrientes fluviales en órdenes, de acuerdo con el método de Strahler (1952), proporciona un valor máximo de órdenes quinto y algunos de cuarto y tercero; los de primero y segundo son numerosos (Figura 6). La profundidad máxima vertical por erosión fluvial es superior a los 200 m y se reconoce en la vertiente oriental.

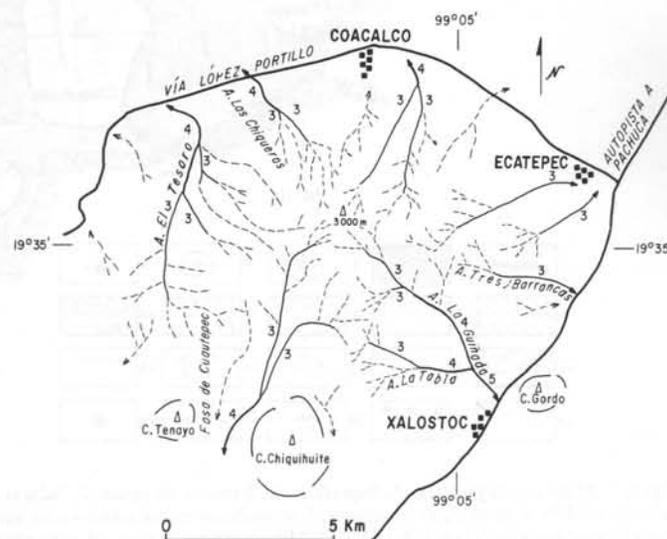


Figura 6. Mapa de órdenes de corrientes (elaborado con el método de Strahler, 1952). Las líneas interrumpidas representan corrientes de primero y segundo órdenes; las de tercero a quinto son señaladas con número.

MORFOGÉNESIS

Las formas primarias del relieve de la zona estudiada se deben a la actividad volcánica y al desarrollo de fallas y fracturas en las rocas. Formas secundarias son las que produce la erosión y la acumulación exógena, es decir, son resultado del modelado de las originales, endógenas (Figura 7). El volcanismo, como proceso fundamental, originó algunos estratovolcanes, como los cerros Guerrero, Zacatenco, Moctezuma, El Jaral, María Auxiliadora y La Cruz, de dimensiones consi-

derables en la zona estudiada y constituidos por derrames de lava andesítica y piroclastos.

Los domos volcánicos se formaron alineados sobre las antiguas fracturas por las que ascendió el magma. Con esto están relacionadas las fallas que han sido cartografiadas por diversos autores (Lozano-Barraza [1968]; Mooser [1975], de Cserna *et al.* [1988]; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera [1989]; Mooser *et al.* [1992]).

Durante el Plioceno, los procesos volcánicos extrusivos fueron los dominantes en la sierra de Guadalupe (Mooser *et*

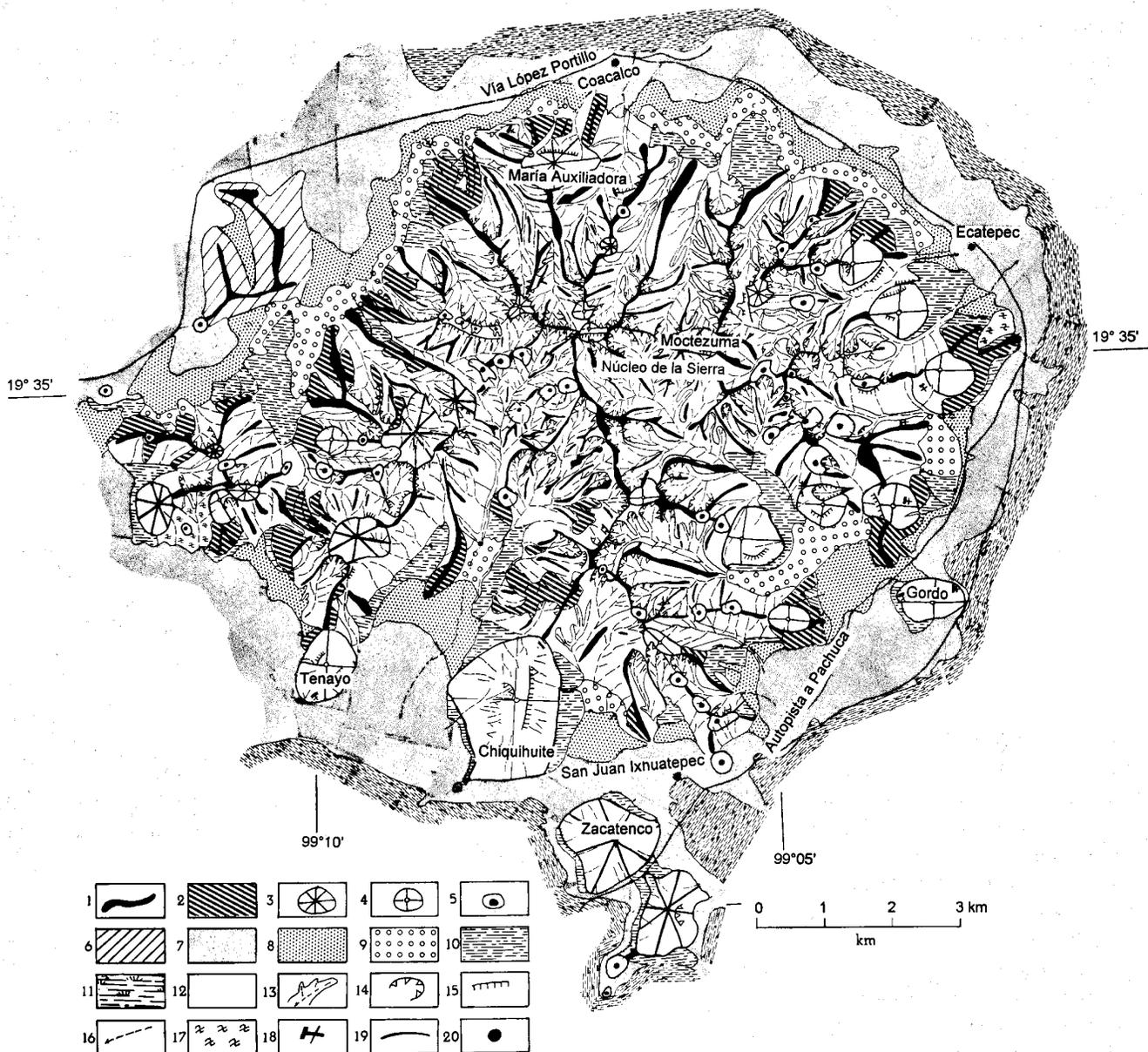


Figura 7. Mapa morfo-genético. 1, Superficie de divisoria de aguas; 2, laderas convexas, de lava, poco modificadas por la erosión; 3, estratovolcanes; domos volcánicos (4-5): 4, principales o mayores; 5, secundarios (subordinados a los anteriores); 6, mesa de lava; piedemonte (7-10): 7, planicie de acumulación lacustre, fluvial y volcánica, inclinada 0.5-1.5°, de 2,240 a 2,260 m s.n.m.m.; 8, con inclinación de 1.5-3°, de 2,260-2,280 m s.n.m.m., de origen esencialmente volcánico; 9, de origen esencialmente volcánico, con inclinación de 3-6°; 10, superficie de erosión formada por retroceso de las laderas de lava, con pendiente de 1.5-6° y a más de 2,260 m s.n.m.m.; 11, planicie lacustre (nivel base), limitada de manera convencional a 2,240 m s.n.m.m.; formas de disección (12-17): 12, laderas cóncavas y rectas; 13, valles erosivos; 14, circos erosivos; 15, escarpes; 16, cauces fluviales; relieve antrópico (17-18): 17, terrazas; 18, canteras; 19, vías de comunicación; 20, poblaciones.

al., 1992). Se produjeron a lo largo de fracturas orientadas al NNE, NW y aproximadamente E-W. Los *domos principales* representan la actividad volcánica de tipo central que fue dominante y con éstos se alínean *domos menores*, parte del mismo proceso, pero de menor intensidad. Ambos tipos de domos están, en su mayoría, unidos por crestas de lava que constituyen las divisorias de aguas. En una cantera se pudo observar la forma local de una cresta, que consiste en domos pequeños (Figura 8), de algunas decenas de metros y fusionados, lo que podría ser la constitución general de estas formas del relieve.



Figura 8. Fotografía de domo volcánico menor.

Las laderas convexas son las mejor conservadas y bien expuestas en la periferia de la sierra. Los domos volcánicos, por su forma y constitución homogénea de lavas muy compactas, son muy resistentes a la erosión y, a diferencia de otras estructuras geológicas, pueden permanecer algunos millones de años (Milanovsky, 1974). La parte superior de estas crestas se ha delimitado como divisoria de aguas, franjas de 100 a 300 m de anchura. Las laderas convexas corresponden principalmente con las crestas de lava y se puede apreciar que en los domos la disección es de poca magnitud.

Una mesa de lava se localiza en la porción occidental de la sierra, considerada por Mooser y colaboradores (1992) como parte de las rocas más antiguas—Mioceno.

Las laderas cóncavas son las formas dominantes en la sierra de Guadalupe, y representan la modificación de las convexas por una prolongada etapa de intemperismo, y erosión por procesos de ladera y fluviales, que han removido un volumen considerable de material rocoso, pero no lo suficiente para modificar las estructuras originales. En cambio, ya que la erosión se produce de manera selectiva, a lo largo de las fracturas principales y en los contactos litológicos, la relación relieve-estructura geológica tiene una expresión clara. La erosión se infiere como posterior a la formación del núcleo de la sierra, del Cuaternario, cuando culmina la actividad volcánica.

El piedemonte es la superficie de inclinación menor que 8°, que constituye la base de la sierra casi en su totalidad de material volcánico, lo que es común para estratovolcanes y grupos volcánicos como el que se trata en este artículo. Se formó por derrames de lava y materiales de caída, como pómez

y piroclastos. En menor proporción, hay depósitos exógenos: de ladera, fluviales e incluso lacustres en su porción inferior. Las delimitaciones hechas en el mapa morfogenético están basadas en las alturas sobre el nivel del mar, cambios de pendiente del terreno y afloramientos observados.

En algunas localidades, la parte superior del piedemonte se considera erosiva, originada por el retroceso de las laderas montañosas, al pie de las cuales se forma un manto de acumulación de material de caída por gravedad, posteriormente removido por agua. La interpretación se basa en la morfología.

Los valles erosivos son de fondo estrecho y perfil transversal en "V", con profundidad vertical de 10 a 200 m. Los de mayor extensión presentan alineamientos semejantes a las superficies de divisoria y están alimentados por arroyos numerosos de valles menores. A pesar de la fuerte disección del relieve visto en planta, los procesos erosivos no son de una actividad sustancial, lo que se puede reconocer por los tipos y volúmenes de depósito en su cauce. Los circos de erosión no han modificado la configuración de las divisorias principales o la destrucción de algún edificio volcánico. La erosión en la sierra de Guadalupe ha sido fundamentalmente vertical y es más intensa a lo largo de fracturas, fallas y contactos litológicos, lo que fundamentalmente se aprecia en la fosa de Cuauhtepac y el valle La Guinada, y en general en los de orden mayor (Figura 6).

Otra observación sobre los circos de erosión es que su desarrollo es lento. En sus paredes escarpadas los desprendimientos son esporádicos, ya que predomina la roca dura y compacta; tampoco se aprecia grandes volúmenes de detritos en la zona del circo.

Los cauces fluviales son mayoritariamente estrechos, con depósitos temporales de aluvión de clasificación regular, donde son comunes los cantos grandes de más de 10 cm. Un predominio de la erosión vertical y arrastre del aluvión hasta las desembocaduras, ha evitado la formación de terrazas, aunque se reconoció una en el valle La Guinada, donde se une con El Águila: una capa de cantos semirredondeados, con clasificación regular y tamaños de 3-10, 15-60 cm y con una altura respecto al cauce de 6 y 2 m de grosor. Lo anterior se interpreta como un proceso de erosión más avanzado, con ensanchamiento del valle y un descenso brusco del nivel base de erosión.

Los escarpes, en cambio, muestran una mayor actividad; están constituidos principalmente por derrames de lava con numerosas grietas verticales, y en algunas localidades se ha producido un intemperismo que favorece el desprendimiento de rocas. En general, corresponden con fracturas descritas por otros autores, como de Cserna y colaboradores (1988).

MAPA MORFOTECTÓNICO

Éste expresa la relación de las estructuras geológicas con el relieve (Figura 9); aunque normalmente se realiza en escalas medianas a pequeñas (1:200,000 a 1:5'000,000 y menores incluso), como un caso excepcional fue posible en la escala

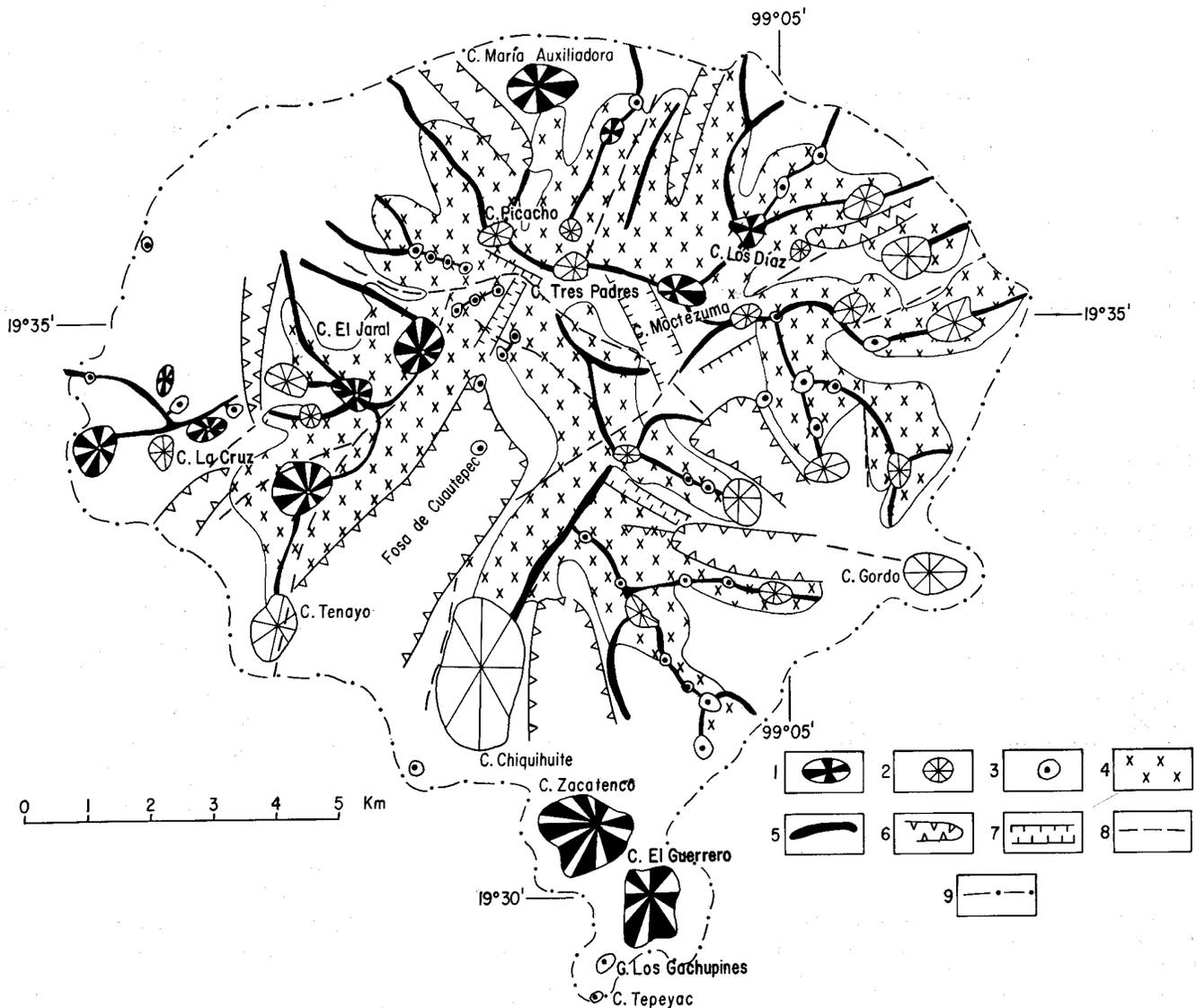


Figura 9. Mapa morfoestructural. Formas estructurales pliocénicas. 1, Estratovolcanes; 2, domos volcánicos principales; 3, domos volcánicos secundarios; 4, crestas de lava; 5, superficie de divisoria (corresponde con las fracturas que favorecieron el ascenso magmático); 6, depresiones tipo fosa; 7, depresiones estrechas controladas por fracturas; 8, fracturas; 9, límite de la zona cartografiada.

1:20,000 (reducido para su publicación), favorable por dos razones: se trata de una unidad geológico-geomorfológica completa y con una expresión clara de estructuras geológicas antiguas (precuaternarias) en el relieve. Este mapa es una síntesis del morfogénico y muestra las estructuras volcánicas y disyuntivas. A diferencia de aquél, hay un número menor de elementos cartografiados y se agrega algunos como las depresiones tectónicas modeladas por la erosión, así como las fallas. Se puede apreciar la repetición de las alineaciones dominantes al NE, NW y E-W en la posición de los volcanes, las fosas y las fallas. En una cantera del cerro María Auxiliadora, se reconoció un espejo de falla normal, con brecha "jabonosa" y estrías; el rumbo es aproximadamente E-W y el bloque hundido se encuentra al norte. También se observó fallas normales en una cantera del cerro Gordo, orientada E-W, con caída al norte, y una tercera, la ladera meridional del cerro Picacho, con

la misma orientación y caída al sur, aunque ésta se define sólo por morfología.

INFLUENCIA ANTRÓPICA

Desde la época prehispánica, el hombre ha influido en la modificación del relieve y, consecuentemente, del ambiente de la sierra de Guadalupe. Los arqueólogos consideran que la deforestación se remonta a la época prehispánica, y fue intensa en el siglo II a.C. (Mooser, 1956c, p. 141). El efecto fue la erosión del suelo, la fuerte remoción de material en las laderas, la formación de barrancos y el incremento general de la erosión fluvial. Es la primera etapa de transformación del relieve por actividad humana en la zona estudiada. La erosión del suelo trajo consigo un mayor escurrimiento superficial en un terreno de muy baja permeabilidad, lo que ha incrementado la disec-

ción, tanto en valles antiguos, como en la formación de barrancos afluentes. Resulta una menor retención del agua de lluvia por la vegetación y un mayor escurrimiento hacia la base de la sierra.

La segunda etapa de transformación tiene lugar durante la década de los años setenta de este siglo. Hasta la mitad del siglo veinte, había sólo pequeños poblados y para la década siguiente, los asentamientos irregulares avanzaron por la periferia y el piedemonte meridionales. Este crecimiento se aceleró en los años setenta y en 1990 había sido urbanizado casi todo el piedemonte y parte de las laderas de los cerros (Figura 10).

Hay dos obras que son parte de la historia reciente de la sierra; la primera es el acueducto construido entre 1743 y 1751, de 10 km de longitud en la periferia meridional. Llevaba agua

del río Tlalnepantla a la Villa de Guadalupe y actualmente permanecen residuos del mismo. La otra obra es una barda (Figura 11) en la vertiente meridional, cerca de la cota 2,400 m s.n.m.m., de 2.40 m de altura, más un alambrado de 1.50 m; tenía 8 km de longitud en 1993 y el proyecto es de 33 km, bordeando la sierra (A. Enciso, *La Jornada*, 8 de marzo de 1993, p. 37). Tiene como finalidad fijar el límite permitido para las construcciones y parece ser la única solución.

Otras modificaciones por la mano del hombre son las canteras, donde se extrae materiales poco consolidados (pómez y otros) y la roca compacta (derrames de lava), y el panteón Jardines del Recuerdo, que representa una superficie amplia sustancialmente transformada.

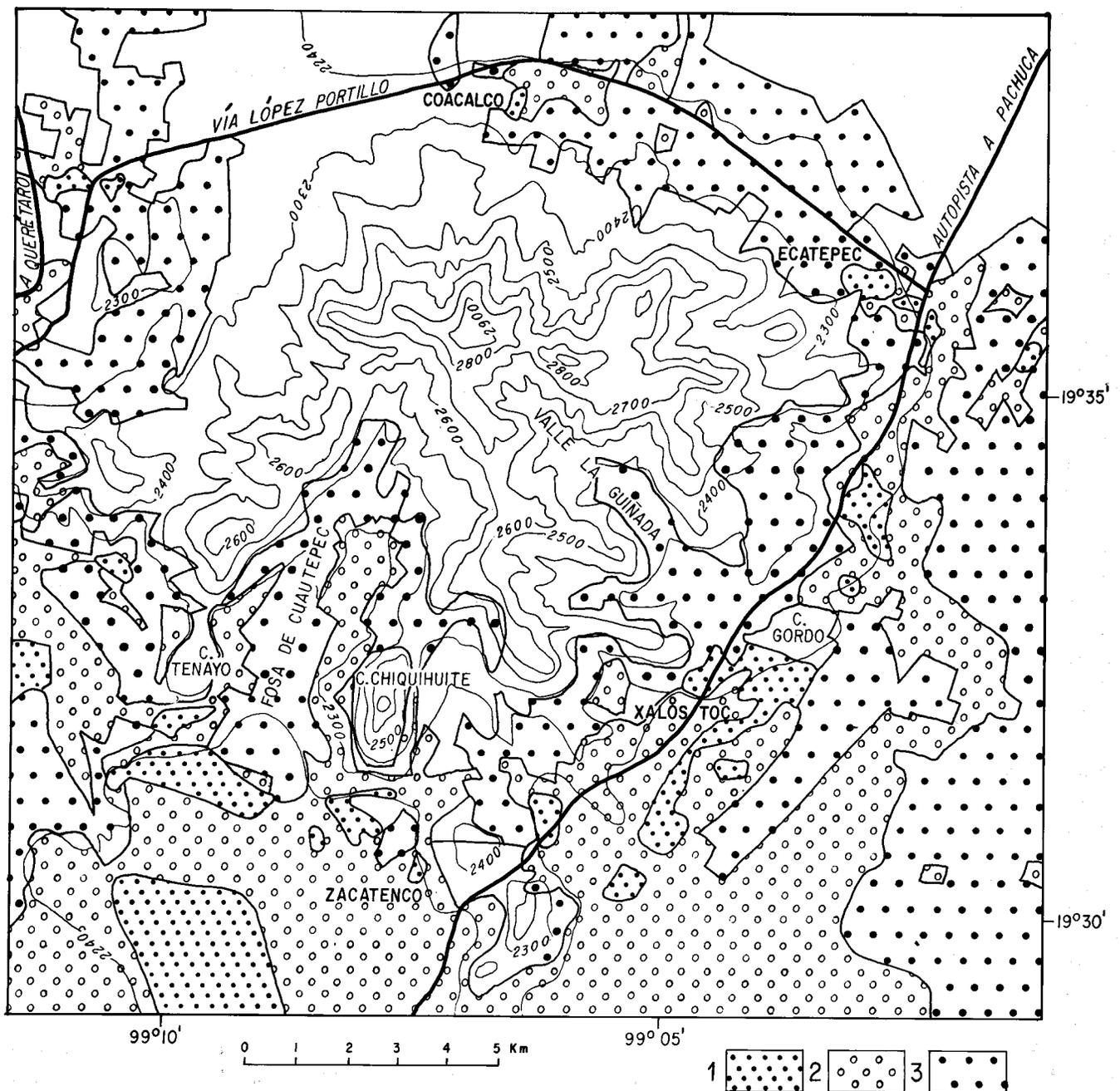


Figura 10. Mapa de crecimiento urbano. 1, En 1950; 2, 1970; 3, 1993.



Figura 11. Barda de la sierra de Guadalupe. Al fondo el Reclusorio Norte.

En el arroyo El Águila (Figura 2), se construyó recientemente una serie de gaviones; el más bajo tiene 14 m de longitud y una altura de 3.31 m en la pared que mira aguas arriba; mientras que en la opuesta, 5.14 m, de lo que resulta una acumulación de 1.83 m en menos de 14 años. Es la única localidad donde se observó obras para reducir la erosión fluvial, favorecer la acumulación y el desarrollo del suelo.

El mapa de desarrollo urbano permite apreciar que la segunda etapa de poblamiento cubrió la planicie contigua a la sierra y parte del piedemonte, y en la tercera se produjo el crecimiento explosivo por todo el piedemonte y laderas de cerros. El crecimiento más intenso surge del Distrito Federal hacia el norte, avanzando por la fosa de Cuauhtepac, donde llega a 2,500 m s.n.m.m., y a menor altura en el valle La Guiñada. Estas dos depresiones urbanizadas y sus desembocaduras son peligrosas, porque se trata de cuencas fluviales amplias, donde la concentración del agua es mayor.

PELIGROS

En la zona estudiada, las inundaciones y caída de rocas sucedieron hace más de 30 años, procesos naturales que no representaron un riesgo o peligro para la población, pero, actualmente, las inundaciones y caída de rocas (deslaves) afectan con frecuencia a casas habitación por construcciones en zonas peligrosas, como lechos y desembocaduras de arroyos, laderas inestables de barrancos, pie y borde de escarpes activos (en retroceso); además, la urbanización incrementa las posibilidades de inundación al evitar el desagüe natural, reducir la infiltración y canalizar los escurrimientos por las calles pavimentadas. Es obvio que este problema se reduce por las obras de drenaje, aun cuando éstas no logran evitar frecuentes encharcamientos e inundaciones de incluso 0.5-1 m de altura, sobre todo en la planicie lacustre al norte de la sierra (Figura 12).

El mapa morfogenético (Figura 7) se transformó en otro aplicado a señalar las zonas de riesgo en la sierra de Guadalupe (Figura 12), mismas que han sido definidas con base en los principios teóricos de la geomorfología y en las observaciones en el campo. Esto se apoya con información periodística recopilada de 1987 a 1995.

La caída de rocas o de tierra y rocas se produce en los escarpes activos, principalmente en la época de lluvias, por bloques que normalmente se depositan a decenas o algunos cientos de metros de distancia.

Las cabeceras activas, correspondientes a caída de rocas (Figura 12), son las porciones más peligrosas del relieve donde, además de deslaves, tienen lugar fuertes escurrimientos, incluso del tipo de corrientes de lodo de poca magnitud, pero peligrosos en la localidad.

Las inundaciones han sido clasificadas en cuatro tipos:

1. Las que se presentan en los cauces de los arroyos durante lluvias fuertes o prolongadas, peligro muy obvio que muchas veces se ignora, porque la mayor parte del año los arroyos permanecen secos y son hechas construcciones en ellos, con obras rudimentarias de protección.

2. Las que están presentes en las márgenes de los cauces fluviales, en la llanura de inundación o laderas inferiores de barrancos. Las crecidas anuales son homogéneas, pero deben ser consideradas las extraordinarias que ocurren una vez en 10, 20 ó 30 años, mismas que afectan una superficie más amplia y con fuerza considerable. Las casas son amenazadas de destrucción o invasión por el agua, problemas que se presentan en el piedemonte, donde los barrancos ensanchan su lecho.

3. Por desembocaduras de corrientes fluviales, un proceso peligroso, ya que se trata de la zona donde puede formarse una corriente de lodo, lo que con mayor probabilidad ocurre en los cauces de orden mayor (Figura 6), como la fosa de Cuauhtepac y los arroyos La Guiñada y Los Chiqueros. Sin embargo, el peligro se reduce por las obras de drenaje.

4. Finalmente, están las inundaciones que ocurren en la planicie lacustre urbanizada, donde el agua al estancarse alcanza incluso más de 50 cm. En ocasiones penetra a las casas.

Estos problemas de deslaves e inundaciones en la sierra de Guadalupe han causado daños con mayor frecuencia desde hace 20 años, y es muy difícil que se reduzcan en un corto plazo, porque los asentamientos humanos siguen avanzando sobre las superficies despobladas de la sierra, a pesar de los intentos de las autoridades del Distrito Federal y Estado de México por contenerlos. La construcción de la barda, como un intento por evitarlos con un alto costo, es una demostración de que las invasiones de terrenos, en los suburbios de la ciudad, son prácticamente incontrolables.

Otro factor importante que debe ser considerado es la deforestación. La vegetación, escasa en la mayor parte de la sierra, no contribuye a retener el agua de lluvia, misma que provoca escurrimientos, infiltración en una capa de suelo incipiente, en general de menos de 60 cm de grosor. En algunas localidades, hay intentos de reforestación, en lucha contra los

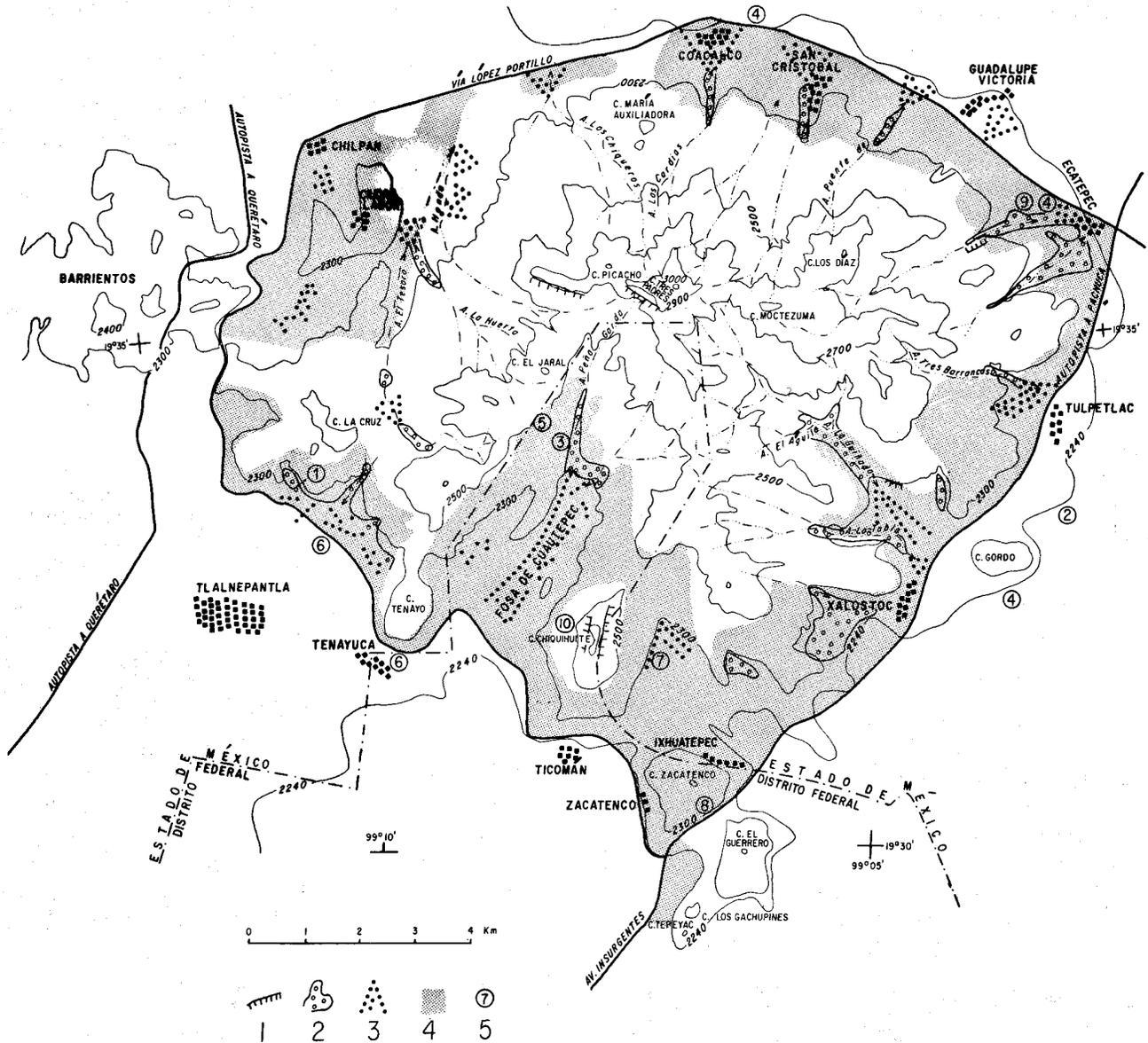


Figura 12. Mapa de peligros. (1) Caída de rocas (deslaves). (2) Inundación por crecidas de los arroyos. (3) Inundación en la desembocadura de las corrientes fluviales (conos de eyecciones). (4) Límite de la mancha urbana. (5) Localidades donde ha habido daños en los últimos cinco años: 1, Deslaves en material de relleno en el panteón Jardines del Recuerdo; 2, grietas transversales a la Vía Morelos, con hundimiento de un lado, de 27 cm (en julio de 1993); 3, inundación en la fosa de Cuauhtepac en las calles Lucha Reyes y Jorge Negrete (12 de septiembre de 1992); 4, inundaciones en la Vía Morelos, con altura del agua de hasta un metro (27 de junio de 1991) y otras semejantes en la Vía López Portillo y en Ecatepec; 5, deslaves en Cuauhtepac Barrio Bajo (21 de junio de 1990); 6, inundaciones en Santa Cecilia y Tenayuca (22 de septiembre de 1987); 7, inundación en la colonia La Presa (29 de mayo de 1987); 8, deslaves en la ladera oriental del cerro Zacatenco (donde cruza la carretera a Pachuca), en varias ocasiones, en 1992, 1993, 1994; 9, inundaciones de 30-50 cm de altura en Ecatepec y Coacalco (3 de agosto de 1993); 10, caída de rocas en la ladera occidental del Chiquihuite, hacia la colonia La Pastora (3 de junio de 1995).

avances de la mancha urbana. Una zona de la sierra, propiedad privada o concesionada, donde existen grandes antenas para la transmisión televisiva, que se extiende desde la cima del Pico Tres Padres (3,000 m s.n.m.) hasta el arroyo La Guiñada, cerca de la cota 2,600 m, ha sido objeto de protección, y el bosque está en proceso de regenerarse.

La deforestación ha contribuido considerablemente al desarrollo de procesos erosivos e inundaciones. Por esto, la reforestación es un elemento indispensable que debe acompañar a otros, como parte de la política para la protección del ambiente y la reducción de fenómenos peligrosos.

CONCLUSIONES

Los depósitos de pómez en grandes volúmenes son testigo de las erupciones poderosas relacionadas principalmente con la formación del núcleo de la sierra de Guadalupe. La actividad explosiva se reconoce también en la presencia de ceniza y arena volcánica y en depósitos de derrame piroclástico. En estudios anteriores de otros autores, estas unidades reciben poca atención, en comparación con los derrames de lava, y es porque sólo en los últimos años han quedado expuestas en grandes canteras.

El relieve de la zona estudiada tiene una relación estrecha con la estructura geológica. Los volcanes y domos volcánicos están bien conservados respecto a la erosión, en gran parte unidos por crestas de lava que se formaron por procesos extrusivos, de tal manera que las principales divisorias de aguas corresponden con las fracturas por las que se produjo el ascenso de magma. Asimismo, los valles de mayor orden (de acuerdo con el método de Strahler [1952]), están controlados por fracturas y fallas, zonas de debilidad donde la erosión se produce con mayor intensidad.

Los procesos exógenos actuales son principalmente de erosión fluvial y remoción en masa. Éstos originan, con frecuencia, daños a asentamientos humanos por inundaciones y caída de rocas (deslaves), fenómenos en aumento por el avance anárquico de las construcciones sobre las laderas de la sierra. El mapa de peligros naturales muestra las zonas habitacionales donde puede existir algún peligro por inundación o deslaves, y aquéllas en las que, por la misma causa, no es recomendable construir.

La actividad humana ha influido en la modificación del relieve de la sierra desde tiempos anteriores a la Conquista, cuando inició la deforestación, pero la transformación de mayor magnitud es la que tiene lugar a partir de la década de los años setenta, cuando el crecimiento urbano se acelera.

RECONOCIMIENTOS

Federico Mooser y José Juan Zamorano-Orozco hicieron valiosos comentarios, tanto directamente en el campo, como en la discusión del texto. En el trabajo de campo se contó con la colaboración de Lorenzo Vázquez-Selem, María Teresa García-Arizaga, Óscar Salas-García, Gabriel Legorreta-Paulín y Maricarmen Cordero-Estrada. Ángel Nieto-Samaniego y otro árbitro anónimo hicieron varias recomendaciones que fueron tomadas en cuenta por los autores. El dibujo se debe a Armando Sánchez-Enríquez y sus colaboradores: Juan Carlos del Olmo-Martínez, Arturo Reséndiz-Cruz y Javier Orta-Hernández. En la redacción colaboraron Bárbara Martiny-Kramer y José Luis Palacio-Prieto. La empresa Televisa permitió el acceso a la zona de la cima. El estudio se realizó en 1993-1994 con apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, a través del proyecto IN103891.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bashenina, Nina, ed., 1975, Cartografía geomorfológica en escala grande: Moscú, Universidad Estatal de Moscú, 264 p. (en ruso).
- Bashenina, Nina; Gellert, Johannes; Joly, Fernand; Klimaszewski, Mieczyslaw; y Scholz, F., 1968, The unified key to detailed geomorphological map of the world 1:25,000-1:50,000: Polska Akademia Nauk, Cracovia, Folia Geographica, Series Geographica Physica II, p. 7-40.
- Campa-Uranga, M.F., 1965, Breve análisis petrográfico de la sierra de Guadalupe: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 61 p. (inédita).
- Cserna, Zoltan de; de la Fuente-Duch, Mauricio; Palacios-Nieto, Miguel; Triay, Leonardo; Mitre-Salazar, L.M.; y Mota-Palomino, Reynaldo, 1987 (1988), Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 104, 71 p.
- Demek, Jaromir, ed., 1972, Manual of detailed geomorphological mapping: Checoslovaquia, Praga, Academia, Praga.
- Demek, Jaromir, y Embleton, Clifford, eds., 1978, Guide to medium scale geomorphological mapping: International Geographical Union, Commission on Geomorphological Survey and Mapping, E. Schwizerbartische Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 348 p.
- Enciso de la Vega, Salvador, 1992, Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 10, núm. 1, p. 26-36.
- ICA, 1991, Fotografías aéreas: México, D.F., Compañía Ingenieros Civiles Asociados, fotografías aéreas, escala 1:15,000.
- INEGI, 1984, [Hoja] Cuautitlán (E14-A29), Edo. de México: México, D.F., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta topográfica, escala 1:50,000, 4ª reimpresión.
- 1985, [Hoja] Ciudad de México (E14-A39): México, D.F., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta topográfica, escala 1:50,000, 3ª edición.
- Lozano-Barraza, Luis, 1968, Geología de la sierra de Guadalupe, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 39 p. (inédita).
- Milanovsky, Evgueny, 1974, Condiciones de yacimiento de las rocas volcánicas, in Belousov, V.V., Geología Estructural: Moscú, Editorial Mir, p. 128-164.
- Mooser, Federico, 1956a (1957), Bosquejo geológico del extremo sur de la cuenca de México: México, D.F., Congreso Geológico Internacional, 20, Libroto Guía de la Excursión C-9, p. 9-16.
- 1956b, Los ciclos del vulcanismo que formaron la cuenca de México: México, D.F., Congreso Geológico Internacional, 20, Simposio sobre Vulcanología del Cenozoico, v. 2, p. 337-348.
- 1956c (1962), Descripciones detalladas de algunas paradas de la Excursión C-9: México, D.F., Congreso Geológico Internacional, 20, Libro-guía de la Excursión C-9, p. 135-153.
- 1961, Informe sobre la geología de la cuenca del Valle de México: México, D.F., Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Hidrológica de la cuenca del Valle de México, 99 p.
- 1975, Historia geológica de la cuenca de México, in Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, t. 1, p. 7-38 y mapa geológico.
- Mooser, Federico; Montiel-Rosado, Arturo; y Zúñiga-Arista, Ángel, 1992, El suroeste de la cuenca de México en el nuevo mapa geológico, in Sánchez-Mora, Ismael, ed., Experiencias geotécnicas en la zona poniente del Valle de México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, p. 5-16.
- Ordóñez, Ezequiel, 1895, Las rocas eruptivas del suroeste de la cuenca de México: Instituto Geológico de México, Boletín 2, 46 p.
- Salinas-Montes, Araceli, 1994, Geomorfología de la sierra de Guadalupe y riesgos naturales: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis profesional, 102 p. (inédita).
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1994, Distrito Federal, mapa turístico de comunicaciones y transportes: México, D.F., Editorial Planeta, escala 1:50,000.
- SIGSA, 1986a, [Hoja] Azcapotzalco: México, D.F., Sistema de Información Geográfica, carta urbana, escala 1:20,000.
- 1986b, [Hoja] Politécnico: México, D.F., Sistema de Información Geográfica, carta urbana, escala 1:20,000.
- 1986c, [Hoja] Villa de las Flores: México, D.F., Sistema de Información Geográfica, carta urbana, escala 1:20,000.
- 1986d, [Hoja] Villa Nicolás Romero: México, D.F., Sistema de Información Geográfica, carta urbana, escala 1:20,000.
- Strahler, Arthur, 1952, Hypsometric (area-altitude curve) analysis of erosional topography: Geological Society of America Bulletin, v. 63, p. 923-938.
- Tricart, Jean, 1972, Cartographie géomorphologique: París, Francia, Editions du France, Centre de la Recherche et Documentation Cartographiques et Géographiques Scientifique, Mémoires et documents, travaux de la R.C.P., v. 77, 105 p.

Vázquez-Sánchez, Eliseo, y Jaimes-Palomera, R.L., 1989, Geología de la cuenca de México: *Geofísica Internacional* (México), v. 28, núm. 2, p. 133-190.

Manuscrito recibido: 13 de junio de 1995.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 12 de abril de 1996.

Manuscrito aceptado: 24 de mayo de 1996.