

Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuauhtepc: región sur de la Sierra de Guadalupe, en la Ciudad de México

Oscar Fraustro Martínez*

Recibido: abril, 20 de 1998

Aceptado en versión final: diciembre 17, 1998

Resumen. El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar los derrumbes, deslizamientos y la expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en las inmediaciones del graben de Cuauhtepc, región norte de la Ciudad de México. Asimismo, con base en criterios estratigráficos, topográficos, geomorfológicos (densidad y profundidad de la disección fluvial), cobertura superficial de los depósitos (suelo, diluviones, coluviones y vegetación) y eventos sísmicos históricos en el período 1455-1995, se presenta una secuencia evolutiva de los efectos secundarios, distinguiendo cinco generaciones de derrumbes y deslizamientos.

Palabras clave: Derrumbes, deslizamientos y licuefacción, Sierra de Guadalupe, peligro sísmico.

Abstract. The aim of this paper is the identification of the landslides derived from earthquake in the Cuauhtepc graben. Five generations of landslides are identified in this region. Relative ages are assigned based on: a) the topographic and geological position; b) degree of the stream dissection and the depth of the stream dissection; c) geomorphic expression of the exposed rupture surface and landslide deposit, and d) evidence of historic earthquakes (period 1455-1995).

Key words: Landslide, seismic risk and Sierra de Guadalupe.

INTRODUCCIÓN

Los derrumbes, deslizamientos y la expansión lateral del suelo son fenómenos gravitacionales (Krauter, 1998; Keefer, 1984; Terzaghi, 1950) y se les clasifica como procesos en masa (Ortiz, *et al.*, 1994; Goudie, 1990; Crozier, 1973; Carson y Kirkby, 1972). Este tipo de fenómenos son efectos secundarios provocados por una manifestación extraordinaria: sismos, erupciones volcánicas, nevadas o lluvias intensas (Davis, 1992; Yates *et al.*, 1996).

Las clasificaciones de los movimientos en masa de acuerdo con el agente que los provoca (agua, viento y gravedad) son múltiples (Terzaghi, 1950; Dalrymple, 1968; Varnes, 1978; Sharpe, 1983; Krauter, 1998), y consideran para la diferenciación de cada tipo los siguientes criterios: velocidad de emplazamiento, carácter del movimiento y material donde se desarrollan. Específicamente, las clasifi-

caciones de Terzaghi (1950), Crozier (1973), Varnes (1978) y Koukis (1997) consideran como agente desencadenador a los sismos, siendo un efecto secundario de éstos los movimientos en masa.

Los derrumbes y deslizamientos provocados por la sismicidad no son desconocidos, al contrario, existen eventos históricos ocurridos en este siglo, de los cuales destacan los siguientes: 9 de octubre de 1963 en Belluno, Italia: 3 700 muertos por un flujo de tierras; 18 de julio de 1964 en Nigata, Japón: 108 muertos y 50 mil damnificados; 19 de marzo de 1971 en Chungar, Perú: 600 muertos por un deslizamiento de rocas. En México, el terremoto del 29 de octubre de 1959 provocó derrumbes de rocas, deslizamientos y flujos de tierra en las localidades de Minatitlán, Oaxaca (800 muertos) y en Zacoalpan, Colima (1 000 muertos) (para una descripción detallada de estos eventos véanse Davis (1992) y Rojas *et al.* (1987).

* Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F. (becario de Posgrado).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Sierra de Guadalupe es un complejo vulcano-tectónico de edad Mioceno-Cuaternario, ubicada en el sector central de la cuenca de México (Figura 1). La sierra se encuentra seccionada por una serie de fallas normales, algunas de componente lateral

izquierdo (Mooser *et al.*, 1996), que forman estructuras de pilar y fosa, de las cuales destaca la de Cuauhtepec (Figura 2) formada en el Plioceno temprano (Salinas, 1994; Lugo *et al.*, 1996). Sumado a lo anterior, una secuencia fluvio-lacustre y volcánica se forma en la depresión de la misma cuenca, cuyos relictos lacustres son, hoy día, todavía visibles.



Figura 1. Ubicación del área en estudio (recuadro) en la Cuenca de México.

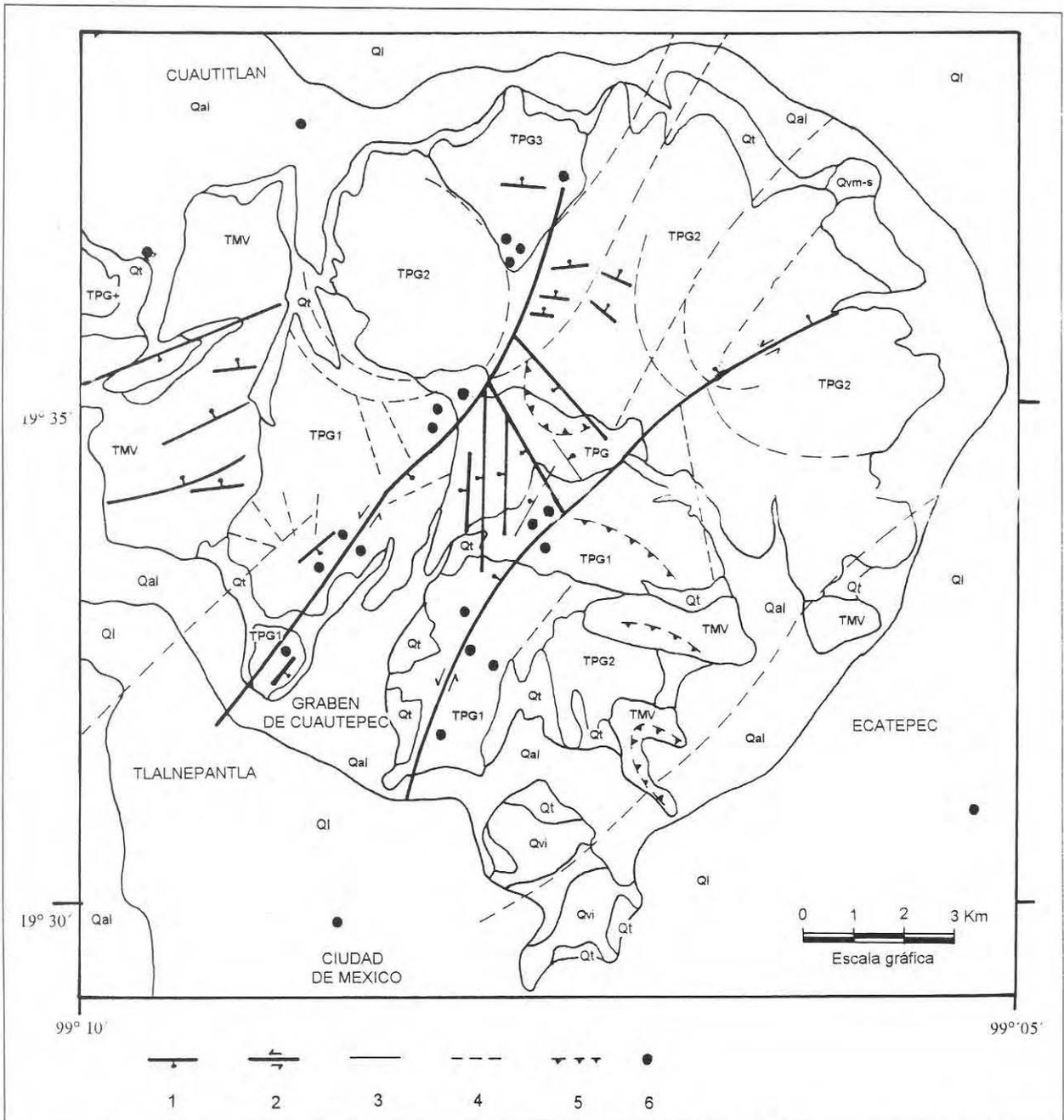


Figura 2. Mapa geológico-estructural del área en estudio: Unidades geológicas. TMV vulcanitas ácidas del Mioceno; TPG, basalto Cuautepéc del Mioceno; TPG+,3,2,1, andesitas, dacitas y riolitas del Plioceno; Qvi, vulcanitas intermedias y básicas del Cuaternario inferior; Qt, tobas y depósitos de flancos del Cuaternario; Qvm-s, vulcanitas básicas e intermedias del Cuaternario medio al Superior; Qal, depósitos aluviales del Cuaternario superior, y Ql, depósitos lacustres del Cuaternario superior. Símbolos estructurales y sísmicos: 1. Falla normal, mostrando la dirección del bloque hundido; 2. Falla transcurrente, mostrando la dirección relativa de desplazamiento; 3. Límite de las unidades geológicas; 4. Lineamientos inferidos; 5. Calderas; 6. Epicentros con magnitud Richter mayor a 3° .

Como resultado de la actividad sísmica regional de la Trinchera Mesoamericana, se han presentado en la región en estudio 40 sismos históricos de carácter catastrófico, el último de ellos el 19 de septiembre de 1985, que provocó, aparte de daños materiales, más de 20 000 muertos (Nava, 1987). La recurrencia de este fenómeno (de 30 a 70 años y periodos anómalos mayores a 100 años, han sido identificados por Sánchez y Singh, 1986) y la descripción existente de los mismos (Figueroa, 1971; Rojas *et al.*, *op. cit.*; Yates *et al.*, 1989 y Fraustro y Zamorano, 1997), ha permitido detectar una serie de procesos geomorfológicos superficiales como derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo directamente relacionados con la sismicidad, los mismos son la expresión más espectacular de los movimientos telúricos, provocando pérdidas materiales y humanas; de ahí su importancia.

Así, con base en lo anterior, se definieron los siguientes objetivos: a) identificar, tipificar y caracterizar los derrumbes, deslizamientos y la expansión lateral del suelo, y b) proponer una secuencia evolutiva con base en criterios estratigráficos, topográficos y geomorfológicos de los derrumbes, deslizamientos y la expansión lateral del suelo.

MÉTODO

Para el logro de los objetivos fue necesario:

a) Compilar y revisar información bibliográfica de la sismicidad, con objeto de identificar los efectos secundarios provocados por movimientos telúricos; se elaboró una base de datos históricos, dando por resultado una cronología de 40 eventos sísmicos catastróficos en el periodo 1455-1995 en el área en estudio. Asimismo, se construyó el mapa geológico-estructural de la zona, basado en la información de Mooser *et al.* (1996) y De Cserna y colab. (1988), enriquecido con la información sísmica de Mota (1988), Mota *et al.* (1992), Figueroa (1971) y del Servicio Sismológico Nacional (1995).

b) Interpretación de fotografías aéreas a diferentes escalas (1:50 000, 1:15 000 y 1:4 500) y fotografías convencionales con el fin de identificar elementos y formas del relieve que constituyen los derrumbes y

deslizamientos; a su vez, se elaboró el mapa geomorfológico, el cual muestra la clasificación del relieve con base en la génesis del mismo (Lugo, 1989); lo anterior permite caracterizar la magnitud, intensidad y frecuencia de los procesos.

c) Elaboración de mapas temáticos que permitieron el análisis de las unidades identificadas, a saber:

1. Pendientes del terreno, partiendo de la propuesta de Keefer (1984), se clasificó el relieve en rangos de pendiente ($< 1^\circ$, 1° a 3° , 3° - 12° , 12° a 18° , 18° a 30° , $> 30^\circ$) cada uno de los cuales está asociado a cierto tipo de procesos (licuefacción, deslizamiento de rocas y bloques de roca y suelo, caída de rocas y desplome de bloques de roca y suelo).

2. Con base en la consolidación del material (Varnes, 1978), se diferenció el tipo de basamento geológico en: material consolidado, roca (andesitas densamente fracturadas, basalto y brechas andesito-basálticas caolinizadas y densamente fracturadas; andesitas, riolitas y dacitas moderadamente fracturadas), material semi-consolidado (depósito de antiguos derrumbes) y material no consolidado, suelo (depósitos de ladera, fluviales y lacustres).

3. Densidad y profundidad de la disección, denominado por Crozier (1992) como "*índice de degradación de las formas*", lo cual permite, con base en el análisis comparativo de los valores de densidad y profundidad de la disección fluvial, proponer secuencias evolutivas de los derrumbes y deslizamientos, además de proporcionar información sobre la magnitud e intensidad de los mismos.

d) Trabajo de campo. Levantamiento de 38 secuencias estratigráficas y sedimentológicas con el fin de reconocer la estructura interna de los depósitos de derrumbe, deslizamiento y expansión lateral del suelo. La caracterización sedimentológica se fundamenta en la propuesta de Corrales *et al.* (1977), que consiste en determinar las propiedades internas de los depósitos (tamaño de los sedimentos, grado de redondez, forma, porcentaje de arenas, estructuras de carga y estructuras de inyección o intrusión), lo que permite definir su magnitud e intensidad. Además, se reconocieron estructuras internas del

suelo identificando cutanes, carbonatos, grietas, acumulación de arcilla y paleosuelos, las cuales, en un momento dado, permiten suponer secuencias evolutivas de los depósitos de derrumbe. Por otro lado, se compiló información referente a la cobertura superficial de los depósitos de derrumbe y deslizamiento (vegetación, aluviones y coluviones), con objeto de diferenciar, cualitativa y comparativamente, la edad de los depósitos.

e) Tipificación de los efectos secundarios. Con base en el trabajo de gabinete y campo, se procede a la diferenciación de los efectos secundarios identificados. Se parte de la propuesta de Keefer (1984) que consiste en la diferenciación y clasificación de los derrumbes, deslizamientos y la expansión lateral del suelo de acuerdo con el tipo de material donde se desarrollan (roca o suelo "material no consolidado"), carácter del movimiento, sea éste rotacional, en flujo, deslizamiento, desplome o "bamboleo" (lateral). Considera, asimismo, el grado de distribución interna de los materiales, existiendo disposición gradual o no gradual en el tamaño y forma de los mismos; la velocidad de emplazamiento se presenta en forma cualitativa, siguiendo para ello la propuesta de Varnes (1978), Crozier (*op. cit.*), y Yates *et al.* (*op. cit.*). Finalmente, la profundidad del depósito se determina con el análisis de los perfiles topográficos y la información sedimentológica y estratigráfica.

RESULTADOS

1. Identificación, tipificación y caracterización

Se identificaron 33 efectos secundarios de la sismicidad en la región norte de la ciudad de México (Figura 3). La identificación de unidades parte de la fotointerpretación, análisis visual de mapas temáticos, identificación en campo de las escarpas de desprendimiento y depósitos, además de la interpretación sedimentológica y estratigráfica de afloramientos geológicos. La tipificación de los efectos secundarios (Tabla 1) tiene en consideración el material en que se desarrolla el fenómeno, tipo de movimiento, distribución interna de los materiales, velocidad de emplazamiento, profundidad o espesor del depósito y magnitud (área del depósito o altura de la escarpa de desprendimiento).

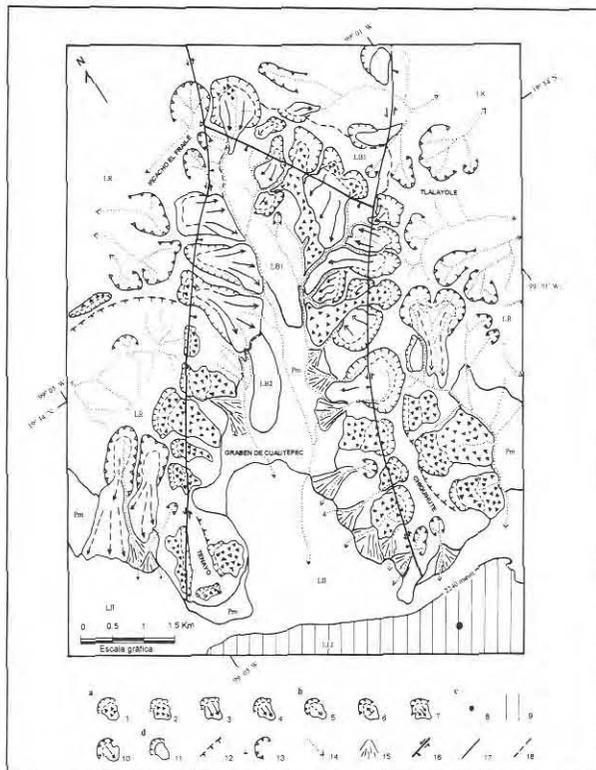


Figura 3. Mapa geomorfológico del área en estudio: LR. Laderas de montaña, riolíticas, densamente fracturadas y falladas; LB1. Laderas de montaña, basálticas (Basalto Cuautepec), densamente fracturadas y falladas, caolinizadas; LB2. Laderas de montaña, basálticas, moderadamente fracturadas; Pm. Piedemonte acumulativo; Lf1. Llanura fluvio-lacustre; LL1. Llanura lacustre (Nivel de base de la Cuenca de México). Efectos secundarios de la sismicidad: a) derrumbes y deslizamientos en material consolidado, 1. Caída de rocas, 2. Desplome de rocas, 3. Deslizamiento de rocas, y 4. Deslizamiento de bloques de roca; b) Derrumbes y deslizamientos en material no consolidado, 5. Caída de suelo, 6. Deslizamiento rotacional de suelo, 7. Deslizamiento de bloques de suelo; c) Expansión y flujos laterales de suelo, 8. Sitio donde se identificó la secuencia lacustre deformada por la expansión lateral del suelo (licuefacción), 9. Área posible o susceptible a ser deformada por licuefacción, 10. Flujos rápidos de suelo; d) Formas y elementos complementarios; 11. Derrumbes no diferenciados, 12. Escarpas, 13. Circos de erosión fluvial, 14. Corrientes fluviales intermitentes, 15. Cono de eyección, 16. Falla normal o transcurrente mostrando la dirección relativa de desplazamiento de los bloques, 17. Límite de las unidades geomorfológicas, y 18. Límite de los contactos geológicos.

Tabla 1. Tipología de los efectos secundarios provocados por los terremotos en la región norte de la Ciudad de México y áreas adyacentes

Nombre y frecuencia	Tipo de tratamiento	Distribución interna de los materiales	Velocidad	Profundidad (en metros)	Magnitud (área)
Derrumbes en roca <i>Caída y deslizamiento</i>					
Caída de rocas	Caída libre, arrastre o rodamiento	Alta a muy alta (se mezclan los materiales llegando a perder su estructura original)	Extremadamente rápida	Superficial, de metros a decenas de metros	Escarpas de hasta 200 m de desnivel y áreas de depósito de 27 000 m ²
Derrumbe o desplome de rocas	Desplome traslacional o sobre superficie de fricción basal (plano de falla, fractura o diaclasas)	Alta (mezcla de materiales llegando a perder su estructura original)	Rápido a extremadamente rápido	Superficial, de centímetros a metros	Escarpas de hasta 300 m y afloramientos rocosos de 37 000 m ² y depósitos de 150 000 m ²
<i>Deslizamientos cohesivos</i>					
Deslizamiento de rocas	Resbalamiento sobre planos predispuestos, algunos elementos de rotación	Baja a moderada. Se reconoce la estructura primaria de algunos elementos	Bajo a rápido	Profundo De metros a centena de metros	Afloramientos rocosos de 50 m ² y depósitos de 160 000 m ² a 200 000 m ²
Deslizamiento de bloques de roca	Resbalamiento sobre planos o superficies de fricción basal	Baja a moderada	Bajo a rápido	Profundo De metros a centena de metros	Afloramientos rocosos de 400 m ² y depósitos de 200 000 m ²
Derrumbes en suelo (material no consolidado) <i>Caída y deslizamiento</i>					
Caída de suelo	Caída libre, arrastre o rodamiento sobre una superficie	Baja a muy alta	Extremadamente muy rápido	Superficial de milímetros a metros	Escarpas de 5 m y depósitos de 36 000 m ²
Deslizamiento del suelo	Deslizamiento traslación sobre una superficie	Alta (se pierde la estructura primaria)	Moderado a rápido	Superficial de milímetros a metros	Escarpas de 20 m y depósitos de 300 000 m ²
<i>Deslizamientos cohesivos</i>					
Deslizamiento de rotación del suelo	Deslizamiento sobre una superficie rotacional	Baja a moderada, se reconoce la estructura primaria del suelo	Baja a muy rápida	Profunda de metros a centena de metros	Escarpas de 100 m y depósitos de 42 000 m ²
Deslizamiento de bloques de suelo	Deslizamiento sobre una superficie de resbalamiento, de carácter rotacional	Baja a moderada, se reconocen capas de suelo y estructuras primitivas	Baja a muy rápida	Superficial a moderada, de centímetros a decenas de metros	Escarpas de desprendimiento de 50 m, escalones de 3 a 5 m y depósitos de 20 000 m ²
<i>Expansión y flujos laterales del suelo</i>					
Expansión lateral del suelo	Traslación en una zona de licuefacción en gravas, arenas o sedimentos	Moderada a alta, se reconocen con dificultad las estructuras primarias de sedimentación	Muy rápida	Variable, de centímetros a metros, superficial	Deformación superficial del suelo en áreas de hasta 50 000 m ²
Flujos rápidos de suelo	Flujo	Muy alta, se pierde la estructura del suelo	Rápido a extremadamente rápido	Superficial, de centímetros a metros	Escarpas de 20 m, deformación superficial del suelo y depósitos de 200 000 m ²

La caracterización de cada efecto secundario de la sismicidad consiste en la definición del tipo de derrumbe, deslizamiento o expansión lateral del suelo; la morfología típica o común, destacando formas y elementos del relieve que permiten reconocer el tipo de fenómeno; finalmente, se hace mención a los casos identificados en el área en estudio y su frecuencia.

I. Derrumbe y deslizamiento de rocas (material consolidado):

- Derrumbe en roca

Caída de roca. Es un proceso rápido que se produce al desprenderse rocas de laderas abruptas, escarpas, cavidades o bóvedas. El movimiento es de caída libre, rodamiento o arrastre (García, 1995). Es el efecto secundario de mayor frecuencia. Se presenta en rocas andesíticas altamente fracturadas y falladas, se origina en pendientes mayores a 40° y laderas rectas. Las narraciones sobre los sismos de 1475, 1697, 1800 y 1991, reportan este fenómeno.

Desplome de rocas. Caída de materiales que se presenta en laderas abruptas y escarpas de pendientes superiores a 40°; es común en rocas densamente fracturadas y falladas (tobas y andesitas). El movimiento se registra sobre una superficie de fricción (plano de falla o fractura) o translacional. Su magnitud no supera los 200 m²; se reconoce por las cicatrices de desprendimiento (nichos) y por el depósito anguloso y heterométrico (bloques de hasta 6 m de eje mayor).

- Deslizamientos de roca

Deslizamiento de rocas. El material deslizado es roto en fragmentos y bloques (que oscila de 15 a 70 cm de eje mayor), se lleva a cabo sobre superficies de fracturamiento, presentándose en escarpas y pendientes superiores a 35° sobre rocas densamente fracturadas y falladas. En campo se han reconocido 9 unidades de este tipo.

Deslizamiento de bloques de roca. Se presenta sobre planos o superficies de fricción, los materia-

les se deslizan, generalmente, en un movimiento rápido a través de planos de fractura y falla. Se efectúa en rocas fracturadas, cuyo echado supera los 30° de inclinación. García (*op. cit.*) menciona que este tipo de movimientos se caracteriza por el desplazamiento de una masa de roca, ladera abajo, como una sola unidad o como un conjunto de subunidades o bloques basculados a contrapendiente. Se identificaron dos deslizamientos de este tipo.

II. Derrumbe y deslizamiento en suelo (material no consolidado)

- Caída de suelo

Caída de suelo. Es la caída (por efecto de la gravedad) de material no consolidado, lo que tiene lugar en escarpas y laderas de fuerte pendiente, el movimiento puede ser en caída libre, rodamiento o arrastre (Rapp, en Young, 1972). El movimiento se presenta en laderas con pendiente superior a 30°. Este tipo de fenómeno se denomina hundimiento superficial del suelo en la planicie fluvio-lacustre con pendiente inferior a 3°.

- Deslizamiento de suelo

Deslizamiento de suelo. Es un movimiento descendente de material no consolidado el cual se desarrolla sobre una superficie de contacto (diferenciación de materiales); se lleva a cabo sobre un plano de resbalamiento (litológico o sobre diaclasas o fracturas del suelo). Se caracteriza por su depósito irregular (heterométrico) y abarca áreas considerables (> 500 m²). Se presenta en laderas rectas de pendiente moderada (de 15 a 30° de inclinación).

Deslizamiento rotacional de suelo. Es el desplazamiento de una masa de suelo sobre una superficie de rotación, y se caracteriza por el basculamiento del depósito en sentido contrario a la pendiente. El suelo pierde su estructura aunque se reconocen lentes del material original.

Deslizamiento de bloques de suelo. Se lleva a cabo sobre una superficie plana o curva. Presenta una distribución interna de pilar - graben (en perfil, donde cada bloque se desplaza independientemente), la distribu-

ción interna de los materiales es mínima y se reconocen estructuras deformadas y basculadas. Se lleva a cabo en laderas de material no consolidado con pendientes superiores a 45° de inclinación y laderas de valle profundos con morfología en "V".

- Expansión lateral y flujos rápidos de suelo

Licuefacción. Se presenta en pendientes menores a 1° de inclinación, sobre planicies lacustres, fluviales o volcánicas, donde predominan secuencias estratigráficas de gravas, arenas y arcillas, cuya diferente densidad de los materiales favorece el desarrollo de licuefacción. Generalmente, existen condiciones de gley y los materiales no están consolidados. Estructuras de deformación como diques de arena, estructuras de carga y estructura laminar plegada, son los elementos evidentes de este fenómeno.

Flujos rápidos del suelo. Es un movimiento lateral del suelo a favor de la pendiente, presenta velocidades de emplazamiento extremadamente rápidas. El suelo pierde su estructura y se caracteriza por su extensión areal (> 1 km de longitud). Se desarrolla en pendientes moderadas (de 3 a 12° de inclinación).

2. Evaluación de la secuencia sísmica

Una vez diferenciado y caracterizado cada tipo de los efectos secundarios (derrumbe, caída de rocas, licuefacción, etc.), originado por los terremotos, es importante definir su evolución en el contexto geológico y geomorfológico local, permitiendo sugerir estadios en la evolución del paisaje. Se identificaron 33 depósitos de derrumbe, con su respectivo circo de desprendimiento (**Figura 4**).

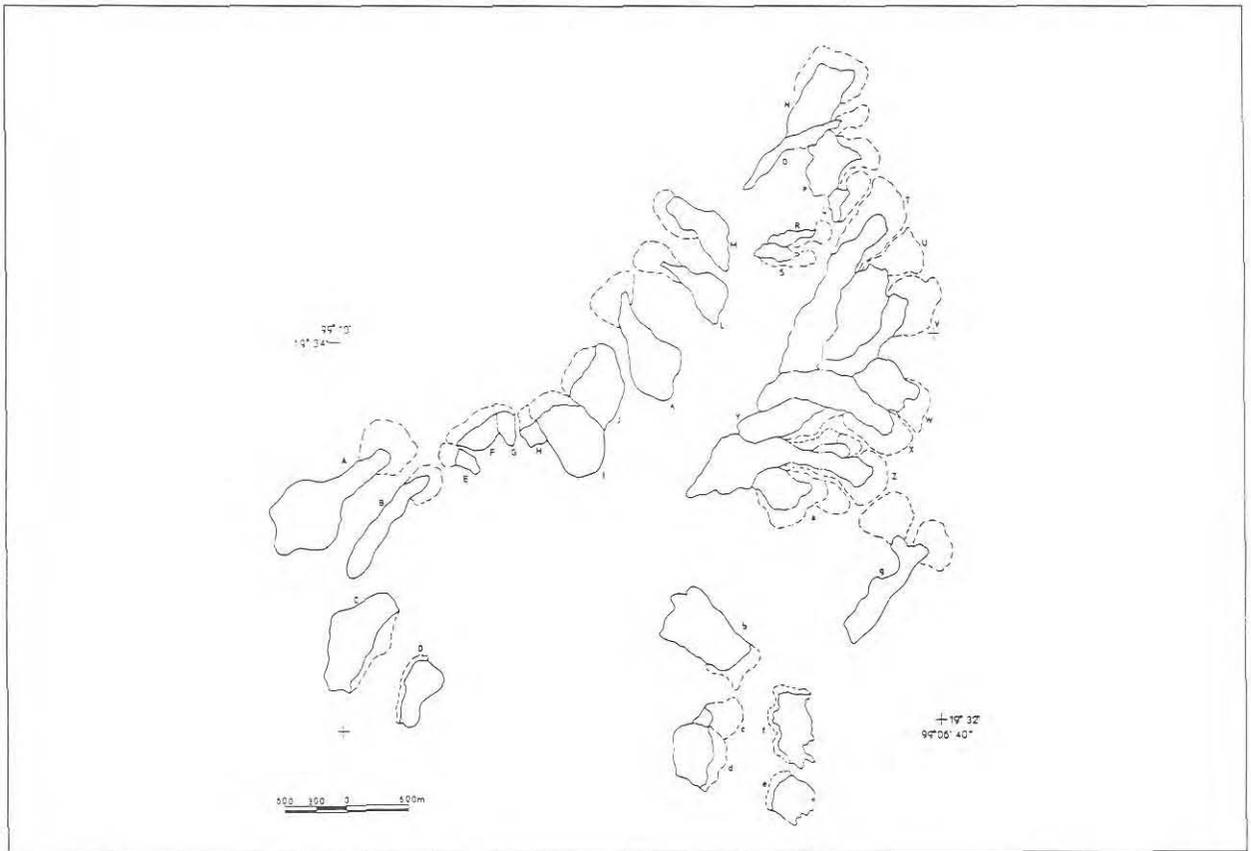


Figura 4. Letra de reconocimiento para el análisis de la secuencia evolutiva. En línea punteada se señala el área de desprendimiento; en línea continua el área de depósito.

Para definir la secuencia evolutiva de los derrumbes y deslizamientos se parte de cuatro criterios: a) secuencia estratigráfica y posición topográfica, b) densidad y profundidad de la disección (denominado como "índice de degradación de las formas"), c) cobertura superficial del suelo (vegetación, depósitos proluviales y diluviales) y d) derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo registrados en el periodo 1455-1995 (eventos históricos).

a) Secuencia estratigráfica. La posición estratigráfica de los derrumbes permite definir una edad rela-

tiva de las formas. La Sierra de Guadalupe es una estructura de edad Mioceno - Reciente. Manifestaciones volcánicas y tectónicas influyeron en la formación de las formas, siendo algunas de ellas heredadas. Derrames de lava, flujos piroclásticos, tobas y cenizas, forman el basamento geológico. Eventos tectónicos regionales influyen en la formación de elementos estructurales importantes, fosas (como la de Cuauhtepac), pilares y estructuras circulares, son fácilmente reconocibles, denotando el carácter tectónico cuyo patrón estructural se refleja en lineamientos del relieve (**Figura 5**).

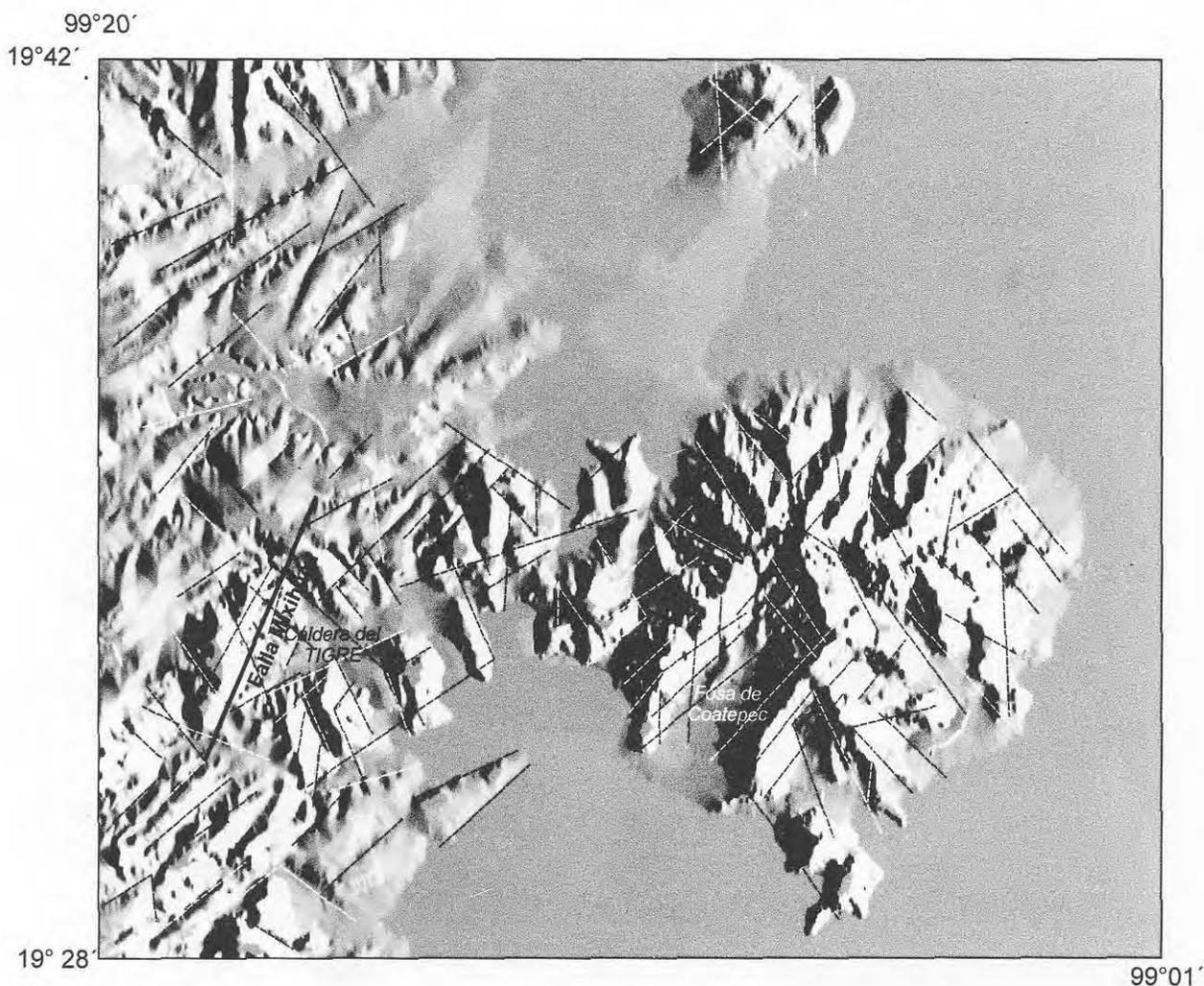


Figura 5. Modelo Digital del Terreno con fuente de luz 45° E. Se muestran los elementos lineales del relieve. Se señala el graben de Cuauhtepac y las fallas y fracturas que lo delimitan.

La manifestación reciente del vulcanismo, en el sector sur de la Sierra de Guadalupe, son los depósitos de toba y lavas presumiblemente del Holoceno (Lozano, 1968; Mooser *et al.*, 1996). Las tobas tienen un espesor de 2.6 a 3 m y descansan sobre siete derrumbes (M, N, P, T, U, V, g) en la parte norte y occidente de la fosa de Cuauhtepac, los cuales se han definido como "serie I" (Figura 6). La posición topográfica y

estratigráfica ayudó a definir la serie II (O, Q, R, S, W, X, a), que descansa sobre los depósitos que forman la serie I; la serie III (A, B, C, F, J, I, K, L, Z, Y, b) se determinó por los depósitos superficiales de diluviones, proluviones y fluvio-lacustres, asimismo, de estructuras primarias de suelo y cobertura vegetal. Finalmente, la serie IV (D, E, G, H, c, d, e, f) se diferenció en función de los eventos históricos del periodo 1455-1995.

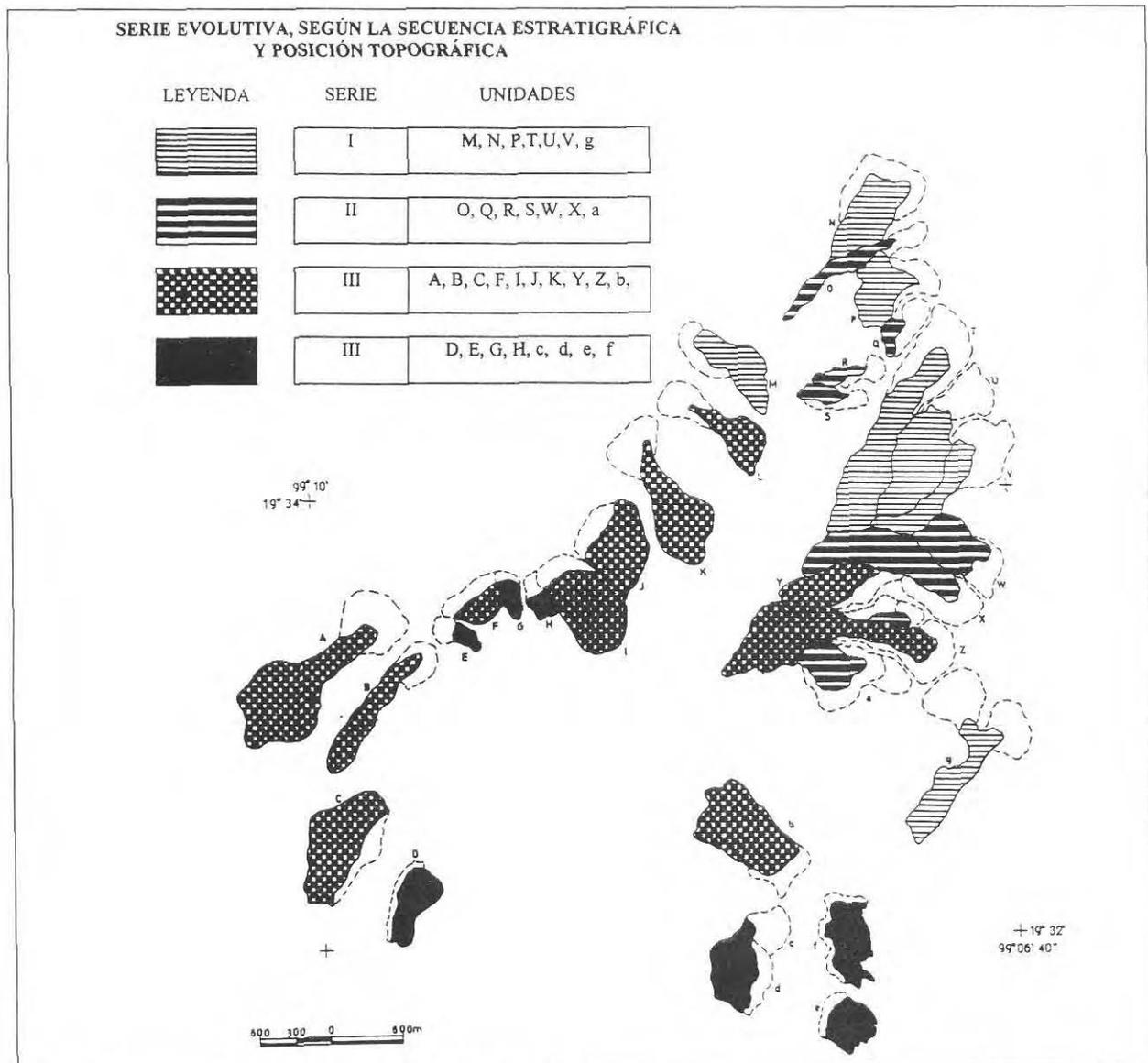


Figura 6. Generación de derrumbes y deslizamientos según la secuencia estratigráfica y topográfica.

b) Densidad y profundidad de la disección. Los valores de la densidad y profundidad de la disección fluvial permiten suponer una edad relativa de las formas, a mayor densidad y profundidad de la disección fluvial, mayor tiempo de degradación, o sea, mayor edad; además, la presencia de elementos y formas erosivo-acumulativas en las escarpas y en los depósitos de derrumbe o deslizamiento soporta lo anterior. Se agruparon los efectos secundarios de acuerdo con el tipo de movimiento y material, con el fin de plantear edades relativas según el análisis comparativo de los valores de la densidad y profundidad de disección (**Tabla 2 y Figura 7**).

Se midió densidad y profundidad de la disección tanto al depósito como a la escarpa de desprendimiento. En la primera, se registraron valores anómalos debido a que la mayor parte de los depósitos se encuentran cubiertos por tobas, coluviones u otros depósitos de derrumbe, y no se logró establecer una relación directa entre los valores comparativos de la densidad y profundidad de la disección en los depósitos (véase la tabla 2, en el apartado densidad de la disección en el depósito de derrumbe).

La densidad de disección fluvial y la profundidad de la disección en la escarpa de desprendimiento resultaron ser coherentes con la propuesta de Keefer, pues los valores de densidad mayores ($> 0.00900 \text{ m/m}^2$) corresponden a los derrumbes y deslizamientos más antiguos, en tanto que los valores mínimos ($> 0.00500 \text{ m/m}^2$), a los derrumbes y deslizamientos contemporáneos. Sin embargo, cabe destacar que los valores difieren de acuerdo con el tipo de material de que se trate, roca o suelo.

Con base en el índice de densidad de la disección fluvial y la profundidad de la disección, se proponen cinco estadios de la evolución en los derrumbes y deslizamientos desarrollados en material consolidado (roca) y tres estadios de evolución en derrumbes y deslizamientos presentes en suelo (material no consolidado); conjuntamente, la cobertura superficial y la estructura interna del suelo soportan la serie evolutiva (véase tabla 2, en el apartado formas y elementos del relieve asociados). Se tiene que el sector más antiguo, según los valo-

res de densidad y profundidad, se ubica en el sector norte del graben de Cuauhtepic; lo anterior concuerda con la secuencia estratigráfica y topográfica descrita anteriormente. En tanto que el sector oriental y occidental del graben presentan los derrumbes más recientes, siendo contemporáneos en las inmediaciones de los cerros Tenayo y Chiquihuite.

c) La cobertura superficial (suelo, diluviones, proluviones y vegetación) permite una diferenciación de la edad de las formas, en los perfiles estratigráficos se identifican estructuras internas que presumen una evolución de temporalidad del suelo. Estructuras como estratos lixiviados, concentración de arcillas, cutanes, motas de óxidos y concreciones de carbonatos fueron considerados. Cualitativamente, se consideró el espesor de la cobertura de diluviones y proluviones, además de la cobertura vegetal. La información obtenida se adjunta en la **tabla 2** (densidad y profundidad de la disección), en el apartado "formas y elementos complementarios".

d) Finalmente, la secuencia de eventos históricos permitió identificar aquellos eventos secundarios ocasionados por los terremotos entre 1455 y 1995. Los efectos secundarios que se han identificado son: caída de rocas, derrumbe o desplome de rocas y deslizamiento de rocas, son los predominantes y dependen del tipo de sismo, basamento geológico (tipo de roca, densidad de fracturas y diaclasas) y relieve (abruptas pendientes, intensidad del relieve y región geomorfológica), coincidiendo con los resultados de Keefer (1984) y King (1989). Menos abundantes son la caída del suelo, licuefacción, deslizamiento de bloques de suelo y flujos rápidos de suelo.

Recientemente se han registrado movimientos telúricos en la Sierra de Guadalupe. Casi importante es el sismo local del 18 de noviembre de 1991, cuya magnitud M_s fue de 5.2, generando un deslizamiento de bloques de suelo, caída y desplome de rocas. Hubo dos muertos y daños a 36 casas habitación. Lo anterior denota la actividad tectónica reciente del sector sur de la Sierra de Guadalupe y coincide con los resultados obtenidos según la secuencia estratigráfica, la densidad y profundidad de

Tabla 2. Secuencia evolutiva de los derrumbes y deslizamientos según la densidad y profundidad de la disección fluvial, y formas y elementos del relieve asociados

Letra de reconocimiento	Secuencia evolutiva (series)	Densidad de la disección fluvial (En m/m ²)		Formas y elementos del relieve asociados	Profundidad de la disección (en metros)	
		A (En la escarpa de desprendimiento)	B (En el depósito de derrumbe)		A	B
Caída y deslizamiento en roca (material consolidado)						
N, P, V, Q, T, U	I	0.0119809-0.0086507	0.0032389-0.0101194	Depósito de derrumbe sepultado por tobas, circos de erosión activos, saltos de cabecera, cobertura de diluvios, barrancos superiores a 10 m, concentraciones de arcilla y presencia de óxidos en subhorizontes del suelo y exhumación del basamento geológico.	5.25-12.52	6.17-10.22
D, L, W, I	II	0.098395-0.0090380	0.0066546-0.0051483	Depósitos de derrumbe que descansan sobre la toba, discontinuidad de la escarpa de desprendimiento por barrancos activos, depósitos diluviales que cubren el depósito de derrumbe, cobertura vegetal arbórea y disección fluvial subsecuente.	1.50-5.28	1.60-8.33
A, X, F, C	III	0.0070987-0.0060688	0.0088235 - 0.002208	Depósitos sepultados por una nueva generación de derrumbes, posición topográfica más alta, circos erosivos que cortan la escarpa de desprendimiento, aunque es todavía reconocible su morfología, cobertura de diluvios y presencia de concentración de arcillas y lentes de lavado en los subhorizontes del suelo.	1.00-2.54	0.52-4.83
Z, B, J, R, Y	IV	0.005947-0.0047931	0.0027843-0.0118252	Depósito de derrumbe que descansa sobre los antiguos depósitos de derrumbe, morfología fácilmente reconocible. Presencia de barrancos sobre la escarpa y circos erosivos activos, poco desarrollados, sin interrumpir la cicatriz de desprendimiento.	1.13-2.86	2.18-3.12
D,H,E,F,G,K, c, e,	V	0.0044021	0.0063454	Escarpa de desprendimiento activo, presencia de bloques de depósito y nichos de desprendimiento (histórico)	0.62-1.62	0.73-2.00
Caída y deslizamiento en suelo						
G, M, O	i	0.0079014 - 0.0129722	0.0069183 - 0.0040690	Depósito cubierto por tobas. Escarpas de derrumbe disecadas por circos erosivos y barrancos. Disección fluvial subsecuente, presencia de concentración de arcillas, carbonatos y lavado en los subhorizontes del suelo.	8.84-3.12	10.22-5.06
A,B	ii	0.0090054-0.0086961	0.0058750 - 0.0024092	Escarpa de desprendimiento disecada por circos y barrancos, aunque se reconocen en la misma escarpa nichos de desprendimiento y afloramientos rocosos. El depósito descansa sobre la secuencia fluvio lacustre de la planicie.	0.45-1.20	1.30-1.54
S	iii	0.00146872	0.0059608	Escarpa de desprendimiento sin cobertura de vegetación y suelo, depósito de deslizamiento de bloques de suelo, donde se reconocen los bloques independientes del mismo.	3.52	0.54

ÍNDICE DE DEGRADACIÓN DE LAS FORMAS

EN ROCA (material consolidado)

Legenda	Serie	Índice	Unidades
	I	>0.0110	N, P, Q, T, U, V
	II	0.0090-0.0109	D, I, L, W
	III	0.0060-0.0089	C, F, X, a
	IV	0.0030-0.0059	J, R, Y, Z, b
	V	0.0010-0.0029	E, G, H, K, c, d, e, f

EN SUELO (material no consolidado)

Serie	Índice	Unidades
i	0.0059-0.0079	M, g
ii	0.0089-0.0090	A, B, O
iii	0.00146872	S

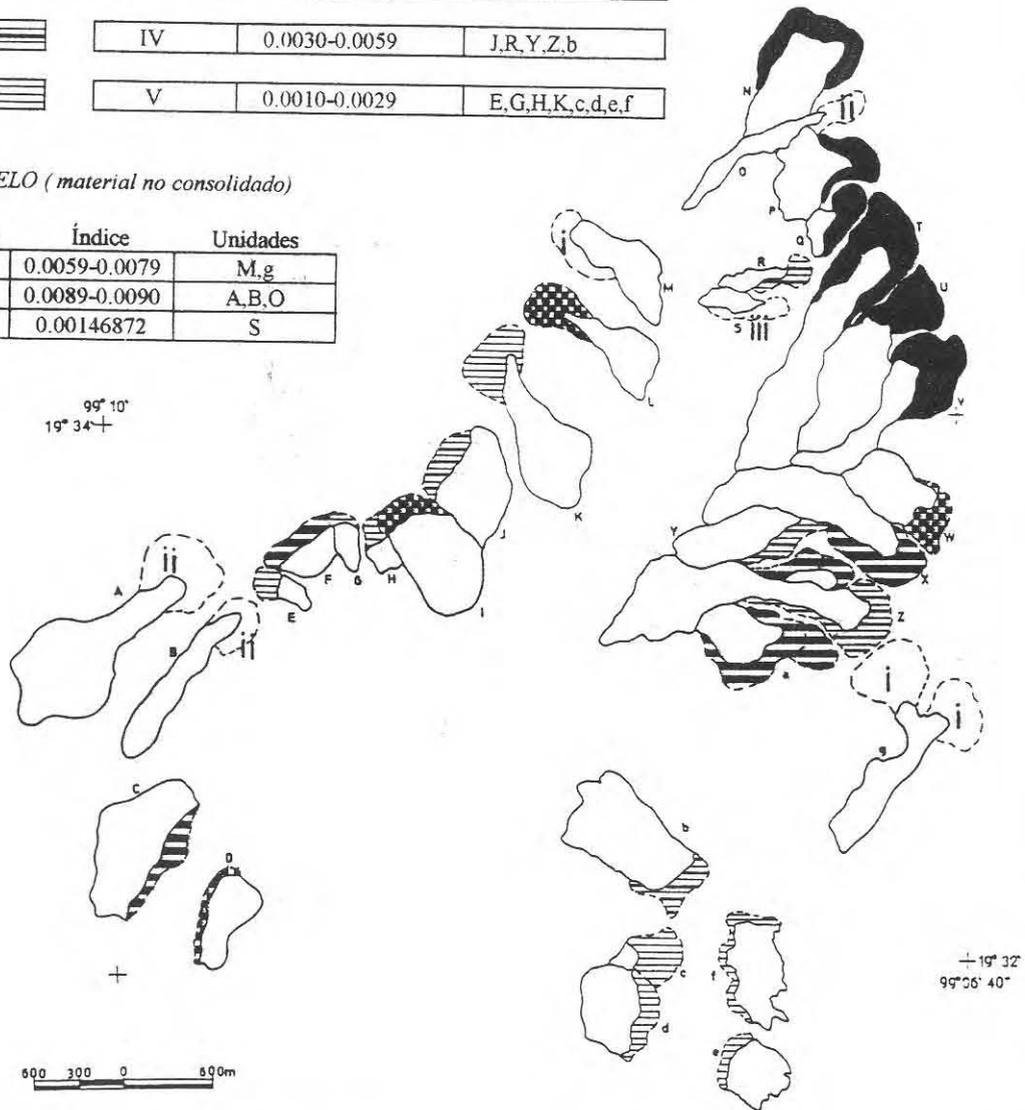


Figura 7. Generación de derrumbes y deslizamientos según el índice de degradación de las formas (profundidad y densidad de la disección fluvial y las formas y elementos del relieve asociados).

CONCLUSIONES

Se identificaron y tipificaron los derrumbes, deslizamientos y la expansión lateral del suelo en el graben de Cuauhtepac, sector sur de la Sierra de Guadalupe, reconociendo los siguientes tipos: a) derrumbes y deslizamientos en roca (material consolidado): caída de rocas, derrumbe o desplome de rocas, deslizamiento de rocas y deslizamiento de bloques de roca; b) derrumbe y deslizamiento en suelo (material no consolidado): caída de suelo, derrumbe de suelo, deslizamiento rotacional del suelo y deslizamiento de bloques de suelo; c) expansión lateral del suelo y flujos de suelo: licuefacción y flujos de suelo.

La caracterización de cada uno de los efectos secundarios de la sismicidad toma en consideración en el tipo de movimiento, distribución interna de los materiales, velocidad de emplazamiento, profundidad del depósito y magnitud (extensión espacial).

Con base en la secuencia estratigráfica y posición altitudinal de los depósitos se presenta una secuencia evolutiva de cuatro generaciones de derrumbes; conjuntamente, la densidad y profundidad de la disección fluvial permitió diferenciar cinco generaciones de derrumbes y deslizamientos, esta última se contempla con la descripción de la expresión

geomorfológica de la escarpa de desprendimiento y el depósito de derrumbe, cobertura superficial del suelo y el estudio de la sismicidad histórica.

La presencia de derrumbes y deslizamientos en el sector del graben de Cuauhtepac permite suponer su actividad sísmica y tectónica reciente de la Sierra de Guadalupe, lo anterior se sustenta con la densidad sísmica y la expresión geomorfológica de las escarpas de falla que limitan el graben.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM por el soporte económico brindado al proyecto de Maestría en Geografía: "Evaluación del riesgo geomorfológico en el municipio de Tlalnepantla, Estado de México", cuyo número de expediente es 523.01/1784 SFA/96, asesorado por el Dr. José Juan Zamorano Orozco; asimismo, la colaboración de las siguientes personas: Celia López Miguel y José Antonio Navarrete P. del Laboratorio de Videografía y Teledetección; Raúl Alvarado G., Raúl Gutiérrez, Efraín León e Israel Pantoja, del Departamento de Geografía Física, ambos del Instituto de Geografía de la UNAM. Finalmente, las observaciones de los dictaminadores, permitieron enriquecer y mejorar este escrito.

REFERENCIAS

- Atlas Nacional de México (1992), Principales fenómenos naturales que provocan desastres en la cuenca de México, T. II, Hoja V. 2.10, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Carzón, M. y M. Kirkby (1972), *Hillslope and process*, Cambridge University Press, London, 475 p.
- Corrales, I., J. Rosell, L. Sánchez, A. Vera y L. Villas (1977), *Estratigrafía*, Ed. Rueda, Madrid, 719 p.
- Crozier, M. (1973), "Techniques for the morphometrical analysis of landslides", *Zeit Fuer Geomorphol.*, 17, pp. 78-101.
- Crozier, M. (1992), "Determination of paleoseismicity from landslides", *Landslides 2*, USA, pp. 1173-1180.
- Cserna, Z., M. de la Fuente, M. Palacios Nieto, L. Triay, L. Mitre y P. R. Mota (1988), "Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México", *Boletín* 104, Instituto de Geología, UNAM, México, 71 p.
- Dalrymple, J., R. Blong y A. Conacher (1968), "An hypothetical nine unit landsurface model", *Z. Geomorphol.*, 12(1), pp. 60-70.
- Davis, L. (1992), *Enciclopedia of natural disasters*, Headline Book Publishing Pl., Great Britain, 433 p.
- Figueroa, M. (1971), *Sismicidad de la cuenca del valle de México*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, núm. 289, pp. 237-248.
- Fraustro M., O. y J. J. Zamorano (1997), Amenaza sísmica por efectos secundarios en la sierra de Guadalupe y áreas adyacentes: región norte de la Ciudad de México, *Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana*, nov., 222 p.
- García A., M. T. (1995), Origen y evolución de un deslizamiento de tierras en Metztlán, Hidalgo, tesis de Maestría en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 138 p.
- Goudie, A. (ed.) (1990), *Geomorphological techniques*, Edit for The British Geomorphological Research Grup. Routledge-London, 570 p.
- Hervey, J. (1978), *Geología para ingenieros geotectónicos*, Limusa, México, 158 p.
- Keefer, D. (1984), "Landslides caused by earthquakes", *Geol. Soc. Am. Bull.*, USA, pp. 406-421.
- King, A. (1989), *Geografía Física*, Oikos Tau, Barcelona, España, 528 p.
- Koukis, G. (ed.), (1997), *Rutschungstypen*, Symp. IAEG, Balkena-Rotterdam, Brookfield, pp. 7-8.
- Krauter, E. (1998), "Rutschungen unter Kontrolle? Monitoring und Stabilisierung von Massenbewegungen", *Geospektrum*, 4/98, Deutschland, S. pp. 20-24.
- Lozano B., L. (1968), Geología de la Sierra de Guadalupe, tesis profesional Ing. Geólogo, ESIA-IPN, México.
- Lugo H., J. (1989), *Diccionario geomorfológico*, Instituto de Geografía, UNAM, México, 337 p.
- Lugo H., J. y M. A. Salinas (1996), "Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la ciudad de México) y su relación con peligros naturales", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 240-251.
- Mooser, F., A. Montiel y A. Zúñiga (1996), *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica y aspectos geotérmicos*, Comisión Federal de Electricidad, México, 70 p.
- Mota P., R. (1988), *Catálogo de sismos de la cuenca de México*, Instituto de Geología, UNAM, México, 7 p.
- Nava, A. (1987), *Terremotos*, Fondo de Cultura Económica (Colec. La ciencia desde México), núm. 34, México, 158 p.
- Ortiz, P., M. A. (inédito), *Clasificación de laderas*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Rojas E., T., Z. Pérez y V. García Acosta (1987), "Y volvió a temblar": Cronología de los sismos en México (de 1 pedernal a 1821), *Cuadernos de la Casa Chata*, núm. 135, SEP, México, 201 p.
- Sánchez, S. y S. Singh (1986), Grandes temblores y sus efectos en el valle de México: observaciones y teoría, *Memoria del Simposio "Los sismos de 1985: casos de mecánica de suelos"*, Sep. SMMS, México, pp. 55-63.
- Salinas, A. (1994), Geomorfología de la Sierra de Guadalupe y riesgos naturales, tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 102 p.
- Servicio Sismológico Nacional, *Catálogo digital de sismos en México: 1887-1995*, SSN, México.
- Terzaghi, K. (1950), "Mechanism of landslides, application of Geology to Engineering Practice", *Geol. Soc. Am.*, Berkeley, vol. 83, 122 p.
- Varnes, S. (1978), "Landslides types and processes", *Geomorphology*, 3, pp. 71-56.
- Yates, R. C. Allen y K. Sieh (1996), *Earthquake geology*, Oxford Univ. Press, New York, 368 p.
- Young, A. (1972), *Slopes*, Oliver & Boyd, London, 288 p.