



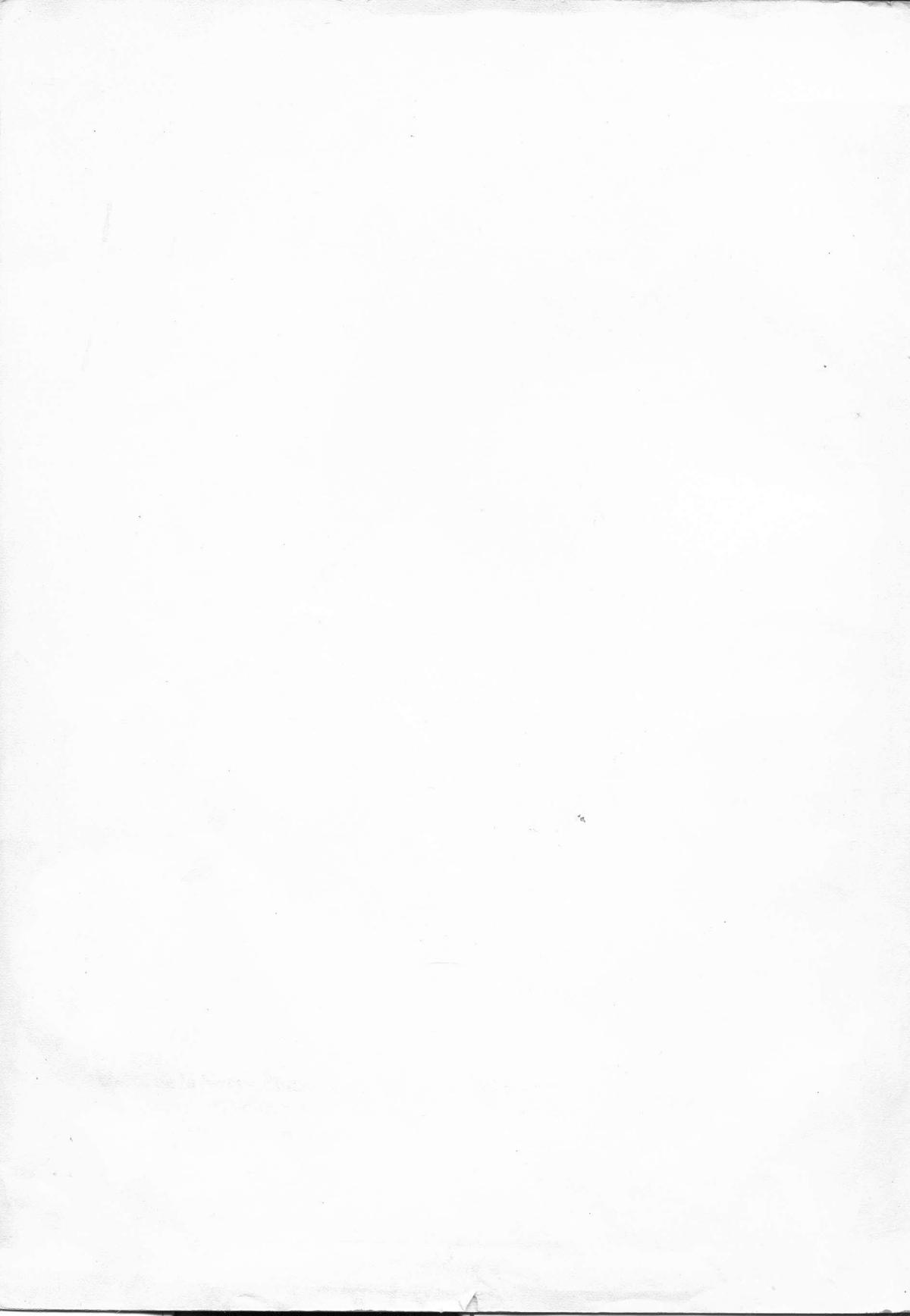


Portada:

“Carta de la Nueva Francia y de Lousiana nuevamente descubierta”. (Fragmento).

Louis Hennepin 1683

10



ELEMENTOS DE GEOMORFOLOGIA APLICADA  
(METODOS CARTOGRAFICOS)

INSTITUTO DE GEOGRAFIA

✓

# ELEMENTOS DE GEOMORFOLOGIA APLICADA

(METODOS CARTOGRAFICOS)

José I. Lugo Hubp



*Instituto de Geografía*

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
MEXICO, D. F.

1988

MÉTODOS DE  
GEOMORFOLOGÍA  
APLICADA  
(MÉTODOS CARTOGRAFICOS)

José L. Lago H. et al.

Primera edición: 1988

D. R. © Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad Universitaria - 04510 México, D. F.

Dirección General de Publicaciones  
Instituto de Geografía  
ISBN 968-36-0560-5

Impreso y hecho en México

MEXICO, D. F. INSTITUTO DE GEOGRAFIA  
1988

## INDICE

	Página
Presentación	9
Introducción	11
I. Definición, objetivos y situación actual de la geomorfología	12
II. Clasificación por dimensiones de las formas del relieve	17
III. Los procesos endógenos	19
IV. Los procesos exógenos	25
V. Análisis morfológico cualitativo y cuantitativo	27
VI. Análisis morfo genético	56
VII. Análisis morfodinámico	61
VIII. Análisis morfoestructural	70
IX. Aplicaciones de la geomorfología	84
Conclusiones	121
Referencias bibliográficas	123



Instituto de Geografía

GG-9100 7

CONTENIDO

1	Introducción	1
2	1. El problema de la filosofía	2
3	2. El método filosófico	3
4	3. El lenguaje filosófico	4
5	4. El pensamiento filosófico	5
6	5. El conocimiento filosófico	6
7	6. El valor filosófico	7
8	7. El fin filosófico	8
9	8. El origen filosófico	9
10	9. El desarrollo filosófico	10
11	10. El futuro filosófico	11
12	Conclusiones	12
13	Bibliografía	13

Escuela No. 100

## PRESENTACION

Labor primaria y primordial de los institutos de la Universidad Nacional Autónoma de México es la investigación, pero no como una actividad académica más, sino como un propósito que pretende llegar a la gran masa universitaria, a los especialistas y allegados a las materias de que se trata y, finalmente, como la expresión del conocimiento, al grueso de la población a la que la Universidad tiene el privilegio de servir. Así se explica, por sí mismo, el conocimiento de la geomorfología que, expuesto con sencillez, pero con absoluto rigor científico; sin caer en pedante suficiencia, se expone en estos "Elementos de geomorfología aplicada", que nos hace conocer José Lugo en un esfuerzo encaminado a servir a los estudiosos de una ciencia que cada día cobra mayor relevancia en el conocimiento de la Tierra como hábitat natural del hombre.

El Instituto de Geografía, con el decidido apoyo de la Dirección General del Personal Académico, al patrocinar y propiciar esta edición, cumple, así, uno de sus propósitos fundamentales: coadyuvar con la docencia proporcionándole elementos que puedan ser plenamente aprovechados por el magisterio y por el alumnado.

Este no es un libro más; es una síntesis del conocimiento geomorfológico que, tenemos la certeza, habrá de cumplir plenamente su propósito de enseñanza y de divulgación científica.

Dra. María Teresa Gutiérrez de MacGregor

El presente es un estudio de los aspectos económicos y sociales de la agricultura en el Estado de Veracruz, México. El estudio se basa en un análisis de los datos estadísticos y en entrevistas con los productores agrícolas. El estudio muestra que la agricultura es una actividad importante en el Estado de Veracruz, México, y que los productores agrícolas enfrentan una serie de dificultades económicas y sociales. El estudio también muestra que los productores agrícolas necesitan más apoyo gubernamental y que se necesitan más servicios de extensión agrícola.

El presente es un estudio de los aspectos económicos y sociales de la agricultura en el Estado de Veracruz, México. El estudio se basa en un análisis de los datos estadísticos y en entrevistas con los productores agrícolas. El estudio muestra que la agricultura es una actividad importante en el Estado de Veracruz, México, y que los productores agrícolas enfrentan una serie de dificultades económicas y sociales. El estudio también muestra que los productores agrícolas necesitan más apoyo gubernamental y que se necesitan más servicios de extensión agrícola.

El presente es un estudio de los aspectos económicos y sociales de la agricultura en el Estado de Veracruz, México. El estudio se basa en un análisis de los datos estadísticos y en entrevistas con los productores agrícolas. El estudio muestra que la agricultura es una actividad importante en el Estado de Veracruz, México, y que los productores agrícolas enfrentan una serie de dificultades económicas y sociales. El estudio también muestra que los productores agrícolas necesitan más apoyo gubernamental y que se necesitan más servicios de extensión agrícola.

El presente es un estudio de los aspectos económicos y sociales de la agricultura en el Estado de Veracruz, México. El estudio se basa en un análisis de los datos estadísticos y en entrevistas con los productores agrícolas. El estudio muestra que la agricultura es una actividad importante en el Estado de Veracruz, México, y que los productores agrícolas enfrentan una serie de dificultades económicas y sociales. El estudio también muestra que los productores agrícolas necesitan más apoyo gubernamental y que se necesitan más servicios de extensión agrícola.

## INTRODUCCION

La geomorfología es una ciencia nueva que nace en las postrimerías del siglo pasado y principios del actual. Los conceptos básicos tienen desarrollo en el primer cuarto del siglo veinte y son pocos los cambios o aportaciones que se producen hasta la época de la Segunda Guerra Mundial, cuando se inicia una nueva etapa, tanto por las novedades en el campo de lo teórico, como por las aplicaciones que empiezan a ser importantes como métodos geomorfológicos propiamente.

Los dos últimos decenios son de un desarrollo impetuoso, lo que se comprueba con la gran cantidad de libros sobre geomorfología, artículos y revistas especializadas. A los tratados generales se fueron agregando paulatinamente los de temas específicos: procesos fluviales, glaciáricos, carso (karst), morfología volcánica, morfotectónica, cartografía geomorfológica, etc.

En el decenio de los años cincuenta era posible a una persona interesada en el tema leer todos los libros existentes sobre geomorfología. Hoy día ésta es una tarea prácticamente imposible. La geomorfología, como toda disciplina científica, ha evolucionado en varias direcciones. Por esto, su estudio requiere de un procedimiento racional: iniciar con el conocimiento de los principios básicos y de los métodos de trabajo en gabinete y en el campo, y continuar con la profundización en uno o más temas.

Toda especialidad en geomorfología se basa en el conocimiento de los principios contenidos en los libros de texto, entre los que podemos citar los principales en lengua española, cuyos autores son: Cocke, Derrau, Rice y Thornbury. Los temas de estos libros son fundamentales en la formación de geógrafos y geólogos, y auxiliares en el caso de otros estudios profesionales. Se trata del conocimiento de la superficie de la Tierra, lo que incluye su clasificación en formas de distintas dimensiones (de las elementales de centímetros a las mayores como continentes y océanos), la configuración global (tipos de estructuras continentales y oceánicas y su posición espacial); los procesos endógenos y exógenos y las formas resultantes de ellos. Todo esto es indispensable en los cursos de geomorfología

que se imparten en las carreras de geografía y geología, por lo que no se repetirán en este volumen sobre geomorfología aplicada. Se toman como una base a partir de la cual se explica una serie de métodos geomorfológicos aplicables a la solución de problemas diversos, en especial a partir del análisis cartográfico.

La geomorfología aplicada se refiere a la solución de problemas relacionados con grandes obras de ingeniería (presas, vías de comunicación), yacimientos de placer e, in situ, erosión del suelo, uso del suelo, recursos hídricos (superficiales y subterráneos), yacimientos petrolíferos, riesgos (volcanes, inundaciones, derrumbes, etc.). Todo esto se basa en las observaciones directas e indirectas sobre el relieve terrestre, en el estudio de las rocas (en perfil y en plano) que lo constituyen y en la influencia y dinámica de los procesos endógenos y exógenos (volcanismo, sismicidad, intemperismo, erosión, acumulación).

Los métodos geomorfológicos actuales son muy numerosos. En México han sido más accesibles los desarrollados en Estados Unidos, Inglaterra y Francia. Actualmente existe una rica literatura sobre el tema, aunque en lengua española es más que pobre. Podemos citar un par de textos semejantes por su título: "La piel de la Tierra" de Miller (1970) y "La epidermis de la Tierra" de J. Tricart (1969).

Para la elaboración de este texto se han consultado varias obras, muchas de ellas de especialistas soviéticos. Con esto se pretende divulgar una serie de métodos poco accesibles, por razones idiomáticas, para la mayoría de los mexicanos interesados en la geomorfología.

## I. DEFINICIÓN, OBJETIVOS Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA GEOMORFOLOGÍA

La definición más sencilla que se puede dar sobre la geomorfología es: la ciencia (o disciplina) que estudia al relieve terrestre, que es el conjunto de deformaciones de la superficie de la Tierra. Sobre las subdivisiones de la geomorfología no existe un punto de vista común, lo que se debe fundamentalmente al gran desarrollo que ha tenido en los últimos 20 años. Una clasificación considera las siguientes ramas:

1. Geomorfología general. Comprende los principios teóricos y métodos fundamentales para el estudio del relieve.
2. Geomorfología planetaria. Originalmente se aplicó este término al estudio de las formas mayores de la Tierra, continentes y océanos, y actualmente se extiende a la superficie de los planetas del sistema solar.
3. Geomorfología regional. Se ocupa de la regionalización del relieve y del estudio de grandes territorios, con el fin principal de reconstruir las etapas de su desarrollo. Se apoya en la paleogeomorfología, que algunos autores consideran una disciplina más.
4. Geomorfología aplicada. Se trata de las aplicaciones a problemas prácticos por métodos geomorfológicos.

Algunos autores cuestionan la validez de esta última subdivisión porque se trata de la aplicación de los conceptos y métodos de la geomorfología general con la finalidad de resolver un problema determinado.

La antigua subdivisión de la geomorfología en climática y estructural ha sido prácticamente abandonada y solamente permanece como parte de la geomorfología general.

Hay autores que definen también la geomorfología dinámica, que se encarga fundamentalmente del estudio de los procesos exógenos, en muchos casos a partir del análisis cuantitativo. Hay que agregar que la dinámica del relieve es también endógena, lo que incluye movimientos neotectónicos y volcanismo.

Una clasificación es importante porque permite considerar a toda la geomorfología en su conjunto. Por lo mismo, es indispensable el conocimiento general de los principios de todas sus disciplinas y las posibilidades de las aplicaciones. Pero lo más importante es la interrelación que hay entre todas las ramas de la geomorfología.

La geomorfología es una de las ciencias que estudian el Universo, y la Tierra uno de sus elementos constituyentes, aunque, a la vez, existen otras disciplinas que estudian el planeta en sus partes: los minerales y las rocas, su arquitectura, historia, etc.

El relieve terrestre es objeto de estudio de la geografía y la geología, y son las disciplinas de estas ciencias las que apoyan los estudios sobre morfología, origen, edad y dinámica actual del mismo; elementos que, en conjunto, permiten diversos tipos de clasificaciones. De aquí surge la importancia del conocimiento básico sobre climatología, hidrología, oceanografía, edafología, geografía física (interrelación de los elementos del paisaje), petrografía, estratigrafía, sedimentología, tectónica, etc.

La geomorfología es una ciencia geográfico-geológica semejante, por su formación ambivalente, a la geofísica y a la geoquímica. Los principios geológicos y geográficos siempre están presentes, en mayor o menor grado, en los estudios geomorfológicos.

De acuerdo con lo anterior, podemos definir los siguientes objetivos fundamentales de la geomorfología:

1. El conocimiento de la superficie terrestre, en su totalidad o en porciones de los tamaños más diversos. De aquí surge una clasificación morfológica (tabla 1).
2. La clasificación del relieve en formas definidas por los procesos que les dieron origen (tectonismo, volcanismo, erosión, acumulación).
3. La determinación de la edad, absoluta o relativa, de las formas del relieve.
4. El estudio de la historia del desarrollo del relieve.
5. El conocimiento de los procesos actuales que modifican la superficie terrestre (endógenos, exógenos).

Para un estudio con el fin de resolver un problema determinado, puede ser suficiente abordarlo a partir de uno solo de los puntos señalados -el uno o el cinco, por ejemplo-; de un par; tres o todos, según el caso.

Hoy día, la ciencia del relieve terrestre tiene una enorme aplicación en todo el mundo; asimismo, la teoría general se sigue enriqueciendo con conceptos novedosos. Muchas orientaciones de la geomorfología se han convertido en verdaderas ramas de especialización; es conveniente citar algunas de ellas.

1. El estudio del relieve y procesos del fondo oceánico.
2. La cartografía y estudio general de grandes formas del relieve tales como sistemas montañosos, cratones, fosas tectónicas (tipo rift).
3. Los movimientos de la superficie terrestre debidos a la sismicidad y la isostasia.
4. Volcanismo: morfología, tipos de procesos, riesgo, etc.
5. Cuantificación de procesos exógenos: fluviales, gravitacionales, marinos, etc.
6. Erosión del suelo.
7. El relieve y su evolución en el periodo cuaternario.
8. Litorales: morfología, dinámica actual, historia de desarrollo.
9. Cartografía geomorfológica.
10. Geomorfolología de regiones tropicales.
11. Geomorfolología y teoría de sistemas.
12. Teoría e historia de la geomorfolología.

13. Yacimientos de placer.
14. Yacimientos minerales.
15. Paleogeomorfología.
16. Relieve de los planetas del sistema solar.
17. Ingeniería geomorfológica.
18. Carso (karst).
19. Geomorfología y ecología.
20. Relieve y sedimentos cuaternarios.

Estos y otros temas son en los que trabajan actualmente en el mundo algunos miles de geomorfólogos, aunque es conveniente aclarar que profesionistas con este nombre son relativamente pocos. En su mayoría son geógrafos, geólogos, geofísicos, oceanólogos, ingenieros, arqueólogos, cartógrafos edafólogos, etc. Especialistas que centran su trabajo en problemas sobre el relieve terrestre y, por lo mismo, se consideran miembros de una de las familias académicas más jóvenes del área de las ciencias de la Tierra.

En el siglo actual ha sucedido un fenómeno curioso en la evolución de esta ciencia. En Norteamérica fueron conservados los principios de la geomorfología davisiana, aun cuando en Europa, en especial en Francia, Inglaterra, Alemania y la Unión Soviética, fue cuestionada y rebasada con numerosas aportaciones. Realmente también en la patria de W. Davis evolucionaron los conceptos geomorfológicos, pero en muchos casos sin considerarse como tales, sino como parte de la geología. Esto se refleja en lo siguiente: mientras que en los Estados Unidos y muchos países del continente americano los trabajos geomorfológicos de mayor interés e importancia se publican en revistas geológicas, en Europa aparecen en revistas geográficas o propiamente geomorfológicas.

Es necesario tener presentes dos cuestiones sobre las ciencias de la Tierra. Primero, procurar estar al día en lo que se refiere al conocimiento de cada disciplina, y, segundo, considerar el grado de estudio que tiene nuestro país. Es un error pretender aplicar mecánicamente los métodos de investigación de moda en países desarrollados, ya que puede resultar un fracaso por no haber pasado antes por otras etapas obligadas. El desarrollo de la geomorfología en México será paralelo con el de otras disciplinas afines: geología, geofísica, geografía física, etc., y en la medida que se realicen investigaciones orientadas a fortalecer una infraestructura, por llamarla así, se verán favorecidos otros estudios de mayor complejidad.

## II. CLASIFICACION POR DIMENSIONES DE LAS FORMAS DEL RELIEVE

Una clasificación de este tipo es un procedimiento para la comprensión del relieve terrestre en su conjunto. Los intentos por establecer una clasificación de las formas del relieve, de acuerdo con sus dimensiones, se debe a varios autores: Engeln (1942), Cailleux y Tricart (1965), Guerasimov (1946), Leontiev (1975) y otros autores. En seguida se muestra la tabla 2 elaborada con base en una clasificación de V. Piotrovsky (1977) que, en realidad, es una adaptación de otras.

La tabla número 1 es útil como un marco de referencia sobre las formas del relieve. Para cada caso (orden) se aplicará una metodología distinta en el estudio de una porción de la superficie terrestre. Se puede apreciar también que, aunque la clasificación es esencialmente morfológica, existe una influencia endógena en las estructuras de mayores dimensiones y se convierte en exógena en las menores. La cartografía geomorfológica se ha desarrollado en diversas partes del mundo con métodos específicos, prácticamente para cada uno de los órdenes. Una pequeña localidad cartografiada en escala muy grande (1: 10 000) no tendrá ningún parecido en un mapa en escala pequeña (1: 1 000 000).

Es una cuestión fundamental en geomorfología conocer los distintos medios de representación cartográfica en función de las escalas, porque todas son de utilidad. Por ejemplo, el estudio detallado de un conjunto de

MAGNITUD (Orden)	SUPERFICIE	DIF. ALTURAS (metros)	EJEMPLOS	ESCALA DE REPRESENTACIÓN
I	Mill. Km <sup>2</sup>	hasta 20 000, 2500-6500 prom.	Continentes, cuencas oceánicas.	1: 50 000 000 <i>50 km</i>
II	Dec. y miles de Km <sup>2</sup>	max. 11 000 500-4000 prom.	Altiplanos, países montañosos continentales y oceánicos, depresiones cratónicas y oceánicas.	1: 10 000 000 1: 1 000 000* <i>10 km</i>
III	Cientos y miles de Km <sup>2</sup>	200-2000	Montañas, grandes cuencas, algunas trincheras.	1: 1 000 000 1: 100 000* <i>1 km</i>
IV	Cientos y miles de m <sup>2</sup>	200-300	Colinas, terrazas, poljes, barrancos.	1: 50 000 1: 10 000* <i>50 m</i>
V	m <sup>2</sup> y cientos de m <sup>2</sup>	m y decenas de m.	Bancos de cauce, barrancos, dolinas.	1: 25 000 1: 5000* <i>25 m</i>
VI	dm <sup>2</sup> y m.	0.1 a 1-2	Montículos, cárcavas	1: 5000. <i>50 m</i>
VII	cm y dm	cm <sup>2</sup> y dm <sup>2</sup> a m <sup>2</sup>	Cúmulos, estrías.	----- <i>1: 500</i>

\* Cartografía de detalle.

Tabla 1. Clasificación de las formas del relieve terrestre (Piotrovsky, 1977).

formas cárnicas (en escala muy grande) se verá favorecido con una cartografía que cubra toda la zona carsificada (mesa, planicie, ladera montañosa) y mejor aún; además una escala muy pequeña que defina la gran unidad (sistema montañoso, planicie de plataforma, etc.).

Las formas cárnicas, por pequeñas que sean, están controladas por los sistemas de fractura regionales, en la mayoría de los casos, y se estudian mejor a partir de la comprensión del plano regional. No hay antagonismo entre los distintos tipos de escalas, sino, al contrario, es un excelente complemento en los estudios geomorfológicos.

### III. LOS PROCESOS ENDOGENOS

La estructura de la Tierra en capas de distinta composición se debe a la influencia de la gravedad y a la propiedad de movimiento que tiene la materia. La evolución del planeta a partir de la condensación de materia cósmica se realizó con la concentración de las partículas más pesadas dando origen al núcleo y las más ligeras a la atmósfera.

Hoy día sabemos que los movimientos que ocurren en el interior de la Tierra son de magnitudes considerables, además de permanentes en el tiempo geológico. Se manifiestan por la sismicidad, el volcanismo, el magmatismo intrusivo, la ruptura de las rocas (con o sin movimiento de los bloques resultantes) y su deformación. Todos estos fenómenos son parte integrante del gran grupo de los endógenos.

Por la actividad endógena existen las deformaciones de la superficie terrestre, desde las trincheras oceánicas hasta las montañas más altas del planeta, con todas las formas menores subordinadas: valles, volcanes, planicies, etc. Se trata del proceso creador de las formas del relieve. Los procesos antagonísticos, los exógenos se encargan de la nivelación de la superficie de la Tierra mediante la destrucción de las elevaciones (erosión o denudación) y del relleno de las depresiones (acumulación). Resulta, así, una lucha constante entre ambos procesos, y el dominio de uno de los dos define los relieves actuales.

Procesos exógenos tales como la erosión fluvial, glaciárica o cársica, han sido generados por una intensa actividad endógena. Por ejemplo, las montañas del Asia Central, las más altas del planeta, tuvieron un desarrollo sustancial en los dos últimos millones de años: la altura alcanzada favoreció la acumulación de nieve y resultaron nuevos climas en la superficie. Ejemplos semejantes los tenemos más cerca: las tres montañas nevadas de México, con glaciares activos, son de formación muy joven, también cuaternaria y dos de ellas con actividad actual; su formación también influyó en cambios climáticos no solamente en ellas, sino en amplias regiones circundantes. Los glaciares condicionan un determinado régimen hidrológico; los suelos y la vegetación han sido controlados no sólo por el clima, sino por los materiales acumulados durante la actividad de los volcanes.

Todas estas relaciones entre procesos endógenos y exógenos son muy claras y lógicas, y basadas en las leyes de la naturaleza. El tema se complica cuando se consideran estos fenómenos no sólo para la actualidad, sino para el pasado. Los movimientos endógenos, lo mismo que los climas, no son permanentes en cuanto al tipo, velocidad y superficie que abarcan. Muchos rasgos del relieve actual de la Tierra, junto con otros elementos, permiten inferir los regímenes endógenos y exógenos del pasado. Las épocas prolongadas -de millones de años- de erosión que convierten a las montañas en peniplanos son tan sólo una variante que puede ocurrir en el futuro. La aplicación dogmática a cualquier región, del ciclo evolutivo del relieve, en etapas que van de la juventud a la senectud, niega la posibilidad de actividad endógena actual o futura que impida la realización de un ciclo idealizado.

Es tal la importancia de la actividad endógena que no es posible realizar un análisis geomorfológico en región alguna sin considerar la influencia de la tectónica: el tipo de régimen (antes basado en la teoría del geosinclinal, hoy de las placas litosféricas), estructura regional (orógeno, rift, escudo, macizo, plataforma, etc.); formas menores (volcanes, intrusiones, pliegues, etc.).

Los procesos endógenos se expresan en el relieve a través de los pliegues, las rupturas (grietas, fallas), y las estructuras volcánicas e intrusivas.

## Pliegues y su expresión en el relieve.

Los conceptos tradicionales se refieren a la expresión de los pliegues en el relieve, en forma directa e indirecta. Hay relaciones más complejas en sistemas de plegamiento donde las formas geológicas positivas y negativas pueden tener expresión directa, en unos casos, e inversa en otros. Originales son los conceptos de N.P. Kostenko (1985), quien ha estudiado zonas orogénicas activas del Asia Central; para esta autora la relación entre estructura plegada y relieve debe considerarse asociada a los movimientos neotectónicos. Así, por ejemplo, un sinclinal que ocupa una porción elevada no puede explicarse siempre como una expresión indirecta, sino lo contrario, cuando se debe a un ascenso brusco de un bloque-sinclinal que resulta en una posición más alta que otras estructuras. Es un caso en el que el relieve se define esencialmente por la actividad tectónica, más que la influencia de la erosión diferencial.

Son de especial importancia en la geomorfología aplicada las estructuras plegadas ocultas, lo que es común en planicies acumulativas de costas marinas y lacustres, de desiertos de arena, etc. Se han desarrollado diversos métodos para interpretar la estructura interna a partir de los rasgos de la superficie, lo que se ha aplicado esencialmente en la búsqueda de yacimientos de petróleo y gas.

## Dislocaciones disyuntivas y su expresión en el relieve.

Los distintos tipos de rupturas de las rocas tienen diversa expresión en el relieve. Las de dimensiones continentales, como los rift, se expresan en fosas (graben) alargadas, a veces con acuíferos profundos (Baikal, Tanganica). Con frecuencia las grandes rupturas son trabajadas por corrientes fluviales. En los casos más simples se reconocen grietas gigantescas que, por razones ópticas se observan mejor en las imágenes de satélite que directamente; en otros casos son lineamientos, es decir, se infieren por determinados rasgos del relieve dominantes en una dirección.

Los escarpes son las formas del relieve que mejor expresan las disyunciones de origen tectónico, aunque pueden deberse a otros factores:

litológicos, erosivos, etc. Son comunes también las combinaciones de formas plegadas-disyuntivas, o sea el pliegue-bloque, como: pilar-anticlinal, pilar-sinclinal, fosa-sinclinal, etc.

El estudio de las formas disyuntivas tiene gran importancia. Los diversos métodos geomorfológicos analizan estos elementos a partir de su expresión en el relieve, directa o indirecta. Los distintos parámetros de las grietas: orientación, longitud, ángulo de inclinación, profundidad, densidad y frecuencia, proporcionan una valiosa información que permite apoyar los estudios sobre regiones de mayor o menor actividad. Esto ha tenido una amplia aplicación en la geotecnia, exploración de yacimientos minerales, de estructuras petrolíferas, de aguas subterráneas y otras.

La expresión indirecta de grietas y fallas en el relieve tiene lugar a través de la red fluvial, de escarpes, de líneas costeras rectilíneas, base de las montañas también alineadas, formas cárnicas, etc.

Uno de los problemas de interés es determinar si las fallas son activas o inactivas, por el riesgo que esto puede representar a diversas obras de ingeniería.

### **Movimientos neotectónicos.**

Actualmente tienen mucha importancia en la geomorfología los movimientos verticales (positivos y negativos) y horizontales. Se han estudiado mejor en regiones de alta sismicidad como California, Japón, el Asia Central y en aquellas que hace pocos miles de años estuvieron cubiertas por potentes capas de hielo: norte de Europa y Canadá. Se trata de movimientos endógenos profundos relacionados con actividad sísmica y magmática, y someros debidos a fenómenos isostáticos y diapirismo. Evidentemente, son formadores también de pliegues y rupturas en las rocas. Su importancia radica, asimismo, en los riesgos, y su expresión en el relieve es diversa. En las rocas precámbricas del escudo Báltico los movimientos de levantamiento por isostasia han reactivado las grietas y favorecido el desarrollo de la red fluvial; en California los movimientos horizontales se reflejan en cauces desplazados; los sismos débiles (reconocidos sólo con instrumentos) con

frecuencia se presentan en etapas que duran algunas semanas, y provocan cambios débiles en el relieve, son más comunes que los sismos fuertes. Los de gran magnitud (> 7 en la escala de Richter) han provocado cambios de altitud de unos 20 cm a algunos metros.

Otra vez encontramos la relación causa-efecto, indispensable siempre en el estudio de la naturaleza. Los movimientos internos crean determinadas formas del relieve y, a la inversa, a través de éstas se puede inferir aquéllos.

Una bibliografía mínima recomendable sobre estos temas (dando preferencia a lo existente en español) son las obras de los autores siguientes: Jain (1980 t. I, cap. IV), Kostenko, 1985; Ollier, 1981; Hills, 1953 (cap. XIV).

#### **Volcanismo y magmatismo intrusivo.**

El volcanismo es uno de los procesos más importantes en la geomorfología porque es el que produce mayores cambios en el menor tiempo, por el nacimiento de volcanes, la reactivación de muchos, formación por estructuras como calderas y maares, desarrollo de grietas, ascensos y descensos del nivel de la superficie. El volcanismo joven condiciona también tipos específicos de actividad exógena, principalmente barrancos, en ocasiones glaciares, lagos, corrientes de lodo, aludes, etc., y tiene un enorme interés en otras disciplinas, como en la geografía física, por los cambios bruscos que se producen en el paisaje, o lo que es lo mismo, en el geosistema, incluso cambios -en apariencia temporales- en la atmósfera y el clima del planeta, como ocurrió con la actividad del Chichón en 1981. La formación de los suelos a partir de los materiales volcánicos es otro tema de interés.

El estudio del relieve volcánico es fundamental para la determinación futura de los procesos correspondientes (explosivos, efusivos) y la secuencia con que ocurrieron.

Actualmente la geomorfología apoya las investigaciones sobre riesgo volcánico. Estas se realizan directamente en los volcanes activos y en las zonas de mayor posibilidad de nacimiento o reactivación. Las mediciones de alta precisión en los aparatos potencialmente activos -altitud y pendiente- permiten reconocer cambios bruscos de milímetros y centímetros en las etapas de preactividad.

La cartografía geomorfológica puede pasar de la información general al detalle sobre determinados problemas, como los riesgos por lahares: localización, alcance estimado, etc.

\* Ya que México posee un relieve volcánico joven, sobre todo en regiones de densa población, la importancia que tienen estas estructuras se puede resumir en los siguientes puntos: a) la extracción de materiales para la construcción: piroclastos finos, escoria, roca masiva; b) el aprovechamiento de los relieves volcánicos con fines agrícolas y de asentamientos humanos, de fácil construcción cuando se trata de rocas del tipo de las tobas, complicado en los derrames de lava; c) con el relieve y rocas volcánicas se relacionan fenómenos como la erosión por barrancos o el desarrollo de suelos fértiles; en muchos casos se ve favorecida la infiltración y el enriquecimiento de los mantos subterráneos.

Hay cuestiones que han pasado inadvertidas, como la destrucción total de edificios volcánicos para obtener material para la construcción, sin un estudio previo que defina la conveniencia o no de una alteración brusca del paisaje, y las consecuencias negativas que pueden originarse. Por otro lado, el aprovechamiento de los volcanes como atractivo turístico o elementos para la divulgación científica es mínimo, considerando que existen algunos cientos de volcanes menores en México completos en su geometría: cono y cráter.

La vulcanología es un conjunto de disciplinas entre las cuales la geomorfología juega un papel fundamental porque es el inicio del estudio de un volcán o zona determinada.

En español aparentemente sólo existe una obra sobre vulcanología, de Araña (1980); en otros idiomas hay varias obras; ha sido muy aceptada la de Williams (1980).

#### IV. LOS PROCESOS EXÓGENOS

La transformación permanente de la superficie terrestre se realiza también por la acción de los procesos exógenos, condicionados, además de por los endógenos, por el clima y la gravedad. Los libros básicos sobre geomorfología tratan muy en especial estos procesos exógenos, conceptos fundamentales no sólo para comprender la superficie actual de la Tierra, sino porque sus huellas han quedado en las rocas desde el precámbrico al actual y han permitido reconstruir los ambientes del pasado geológico.

Si originalmente se podía estudiar la geomorfología con un texto de los que explican cada uno de los procesos exógenos, el avance de esta disciplina han conducido a la existencia, en la actualidad, de más de un tratado sobre un solo tipo de procesos: fluviales, glaciáricos, carso, eólicos, etc. Resulta, así, complicado tratar de estudiar la temática completa de los procesos exógenos; además, por el hecho de que éstos anteceden a este texto, sólo se tratan en forma muy somera.

Son tres tipos principales de procesos externos los que se encargan de la nivelación de la superficie terrestre: el intemperismo o meteorización, la erosión o denudación y la acumulación.

El intemperismo se encarga, por fenómenos físicos, químicos y bioquímicos, de la destrucción de las rocas. La remoción de partículas preparadas por el intemperismo se produce por distintos agentes, lo que es un proceso de erosión o denudación; finalmente, las partículas acarreadas son depositadas en forma temporal o permanente, lo que constituye la acumulación.

El estudio de todos los procesos exógenos se hace por separado, considerando cada tema aislado del resto, como es común en libros de texto,

pero es sólo por comodidad o método. En la realidad no existen en la naturaleza procesos aislados. El intemperismo casi siempre se produce en combinación de destrucción mecánica y química; la acción de los ríos se conjuga con la de movimientos de masas, o con los glaciares, etc.

El intemperismo físico se produce por contracción y dilatación de los minerales, cambios bruscos y extremos de temperatura; presión en los poros y grietas por precipitación de sales; rupturas por el crecimiento de las raíces de las plantas, y expansión de las grietas por el congelamiento del agua. La alteración química de los minerales se realiza por oxidación, hidrólisis, hidratación y disolución. El intemperismo bioquímico es producido por determinados organismos que aprovechan algunos elementos de las rocas.

La denudación o erosión complementa al intemperismo al remover las partículas preparadas; el medio por el cual se desplazan es el transporte. Los agentes principales de la erosión son: el agua de escurrimiento superficial y subterránea, el hielo en movimiento (glaciares), el mar (olas, mareas, corrientes litorales) y el viento.

La acumulación, el último de los procesos exógenos, se realiza prácticamente por los mismos agentes que la erosión. Un agente muy importante, en la actualidad, es el hombre, quien ocasiona las mayores modificaciones a la superficie de la Tierra.

Los tipos de procesos exógenos se presentan, en general, en grandes regiones, con un dominio determinado: erosión o acumulación fluvial, procesos glaciáricos, eólicos, cárnicos, etc. Esto se debe al régimen tectónico, la fisiografía en grandes extensiones y al clima, factores en estrecha relación.

Es importante considerar a los procesos exógenos no sólo para entender la historia de la Tierra y la transformación actual de su relieve, sino por la gran aplicación que tiene su conocimiento. Todos estos procesos son importantes en la construcción de grandes obras de ingeniería, en los riesgos, y en la planificación de uso del suelo; algunos se relacionan

con yacimientos de placer, con el aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas y con otros temas.

Los procesos exógenos, según la escala cartográfica con que se estudien, se consideran en detalle o con carácter regional. Así, por ejemplo, un valle fluvial se puede representar en un mapa con todas sus partes, o, bien, el relieve se clasifica por zonas donde predominan determinados tipos de procesos exógenos (fluviales, glaciáricos, cársicos, eólicos, etc.).

La tendencia moderna en el estudio de los procesos exógenos es la cuantificación de todos ellos: velocidad de intemperismo (disolución), de transporte, de acumulación, etc. En la tabla 2 se presenta una síntesis de los procesos exógenos con elementos asociados: los agentes que los producen y las formas del relieve resultantes.

Otra cuestión importante sobre procesos exógenos y formas del relieve correspondientes es la relación que tienen con la estructura geológica y la actividad neotectónica. Así, por ejemplo, los tipos de erosión fluvial y la intensidad de ellos pueden ser índices de límites de estructuras geológicas o de determinado tipo de actividad tectónica. Por esto es importante no sólo identificar las distintas formas del relieve y procesos en los estudios de gabinete y campo, sino interpretar la información obtenida que hace posible la obtención de una información mucho más amplia.

#### V. ANALISIS MORFOLOGICO CUALITATIVO Y CUANTITATIVO

Las formas del relieve terrestre se pueden definir por su semejanza con modelos geométricos (morfografía) y a partir de una cuantificación de determinados elementos del relieve (morfometría). Ejemplos de la geometría en el relieve son: conos, pirámides, elipses, rectángulos, etc. La erosión modifica el aspecto original. Por esto, teniendo claros los conceptos de formación del relieve y apreciando el grado actual de transformación en una región determinada, se puede tener una idea sobre la edad relativa de las formas, comparando con las regiones contiguas.

## AGENTES

## PROCESOS

## FORMAS

Energía solar, agua, cambios de temperatura, organismos.	Intemperismo	Costra de intemperismo, suelo.
Agua en la superficie.	Erosión y acumulación fluvial. Acumulación deluvial y proluvial.	Valles, planicie aluvial. Mantos de piedemonte, conos de eyecciones.
Agua subterránea y superficial, nieve, gravedad.	Remoción en masa (gravitacionales: erosión o denudación). Acumulación coluvial.	Circos de erosión, escarpes; manto coluvial, cono detrítico.
Agua subterránea.	Carso (karst) o carsificación.	Lapiaz, dolinas, poljes, uvalas, grutas.
Hielo	Erosión glaciárica (exaración) y acumulación.	Circos, valles, morrenas.
Viento	Erosión eólica (deflación) y acumulación.	Hoyas de deflación; barjanes, dunas.
Mar (olas, mareas, corrientes)	Erosión (abrasión) acumulación marina	Cantiles, nichos; playas, bancos, barras.
Hielo-agua en el subsuelo.	Criógenos (termokarst)	Hidrolacolitos, suelos estructurales.
Agua subterránea y hielo	Fluvioglaciáricos.	Manto fluvioglaciárico eskers.
Agua superficial-mar.	Fluviomarinos.	Planicie deltaica.
Hombre	Erosión (excavación) y acumulación (relleno)	Minas a cielo abierto, canteras; jales, basureros.

Tabla 2. Los procesos exógenos

## Morfografía.

En los mapas topográficos y en las fotografías aéreas se pueden trazar los elementos principales del relieve, inicio del estudio del mismo. Estos son, al igual que en la geometría, puntos, líneas, superficies y volúmenes (aunque estos últimos se representan en una proyección en plano).

Los puntos expresan formas del relieve que por sus pequeñas dimensiones no pueden ser representadas como tales en los mapas. En una escala en la que una forma del relieve se reduce cincuenta mil veces, resultan elementos tales como las cimas de las montañas, la desembocadura de un valle en otro, algunas dolinas, etc.

Ejemplos de líneas son: divisorias de aguas (parteaguas), talwegs, líneas de costa, base de montañas alineadas, escarpes, etc.

Las superficies de planicies subaéreas o submarinas, con frecuencia se describen por su forma en círculo, elipse, óvalo, rombo, etc. Asimismo, en su perfil pueden ser un plano horizontal o inclinado, o presentar ondulaciones.

Los volúmenes como modelos geométricos se aplican a las elevaciones: conos, pirámides, prismas, cilindros, etc. La observación de las montañas jóvenes nos permite apreciar su correcta geometría en los volcanes, domos, sistemas montañosos en su conjunto.

Una carta topográfica, principalmente en escala grande, permite con facilidad definir los elementos principales: puntos y líneas, como se muestra en la figura 1.

Elementos geométricos son también las configuraciones diversas de la red fluvial (dendrítica, anular, rectangular, etc.). Lo mismo sobre la clasificación universal de las formas del relieve, en positivas o negativas, en función de su expresión como superficie elevada o deprimida.

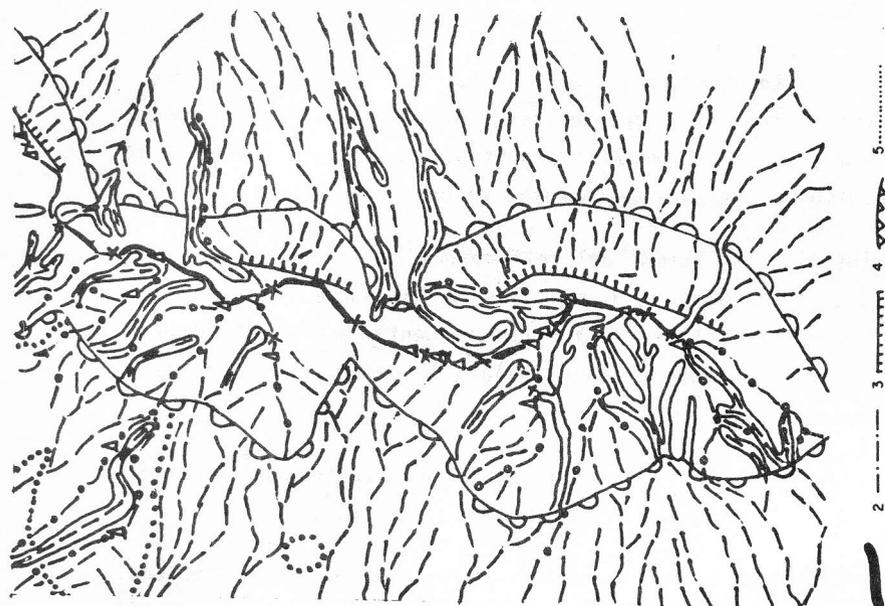
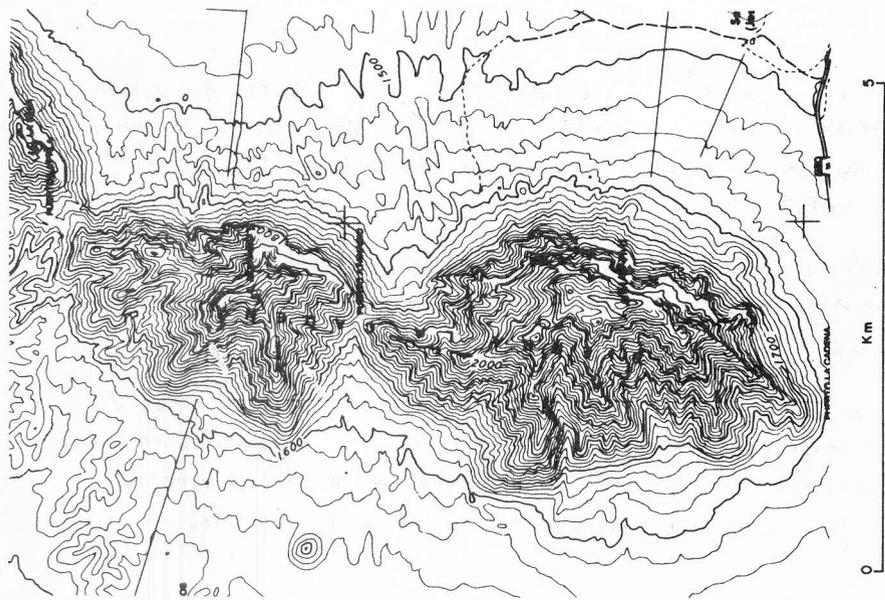


Fig. 1. Interpretación morfológica elemental (B) de un mapa topográfico (A): fragmento de la hoja 1: 50 000 G13D13 La Cadena, Dgo. (SPP). 1, Divisoria principal; 2, Divisoria secundaria; 3, Escarpes principales; 4, Pie de las montañas; 5, Pie de elevaciones menores; 6, Valles montañosos principales; 7, Talwegs; 8, Cimas; 9, Collados.

## Morfometría.

La cuantificación de ciertos elementos del relieve ha dado lugar, en la segunda mitad de nuestro siglo, a un gran desarrollo de los métodos matemáticos para el estudio no sólo de la superficie terrestre, sino también de los procesos actuales endógenos y exógenos.

Los elementos principales posibles de cuantificar a partir de formas del relieve, son: longitud, superficie, volumen, altura absoluta y relativa, pendiente, orientación, densidad, frecuencia y otros elementos numéricos. Estos parámetros tienen variantes y también se conjugan entre sí, de tal manera que los estudios morfométricos van de los métodos más simples, accesibles a un estudiante de secundaria, hasta los más complicados en los que se aplican matemáticas superiores. Los métodos morfométricos permiten la elaboración de mapas específicos que contribuyen al conocimiento del relieve terrestre.

El mapa altimétrico o hipsométrico (figura 2) es el inicial y uno de los más importantes, a pesar de la simplicidad con que se elabora. El problema fundamental consiste en definir, a partir de las alturas máxima y mínima en el mapa topográfico original, los intervalos de valores que han de delimitarse (para lo cual no existen reglas, sino criterios), con el fin de que exprese de manera inmediata y clara el relieve en su totalidad. Esta es su gran virtud: simplifica enormemente la comprensión de un mapa topográfico. La elección de colores no es arbitraria, sino que se apoya en un sistema internacional que, bien aplicado, da la impresión de observar el mapa en tercera dimensión. Esta secuencia de colores, de los fríos a los cálidos, se utiliza, asimismo, en gran parte de la cartografía geomorfológica, en la que siempre existe una jerarquía que se define con la secuencia de colores apropiada.

En la interpretación geomorfológica de mapas, la información que proporciona la hipsometría es fundamental en los estudios de los procesos exógenos, las morfoestructuras, la morfogénesis, etc.

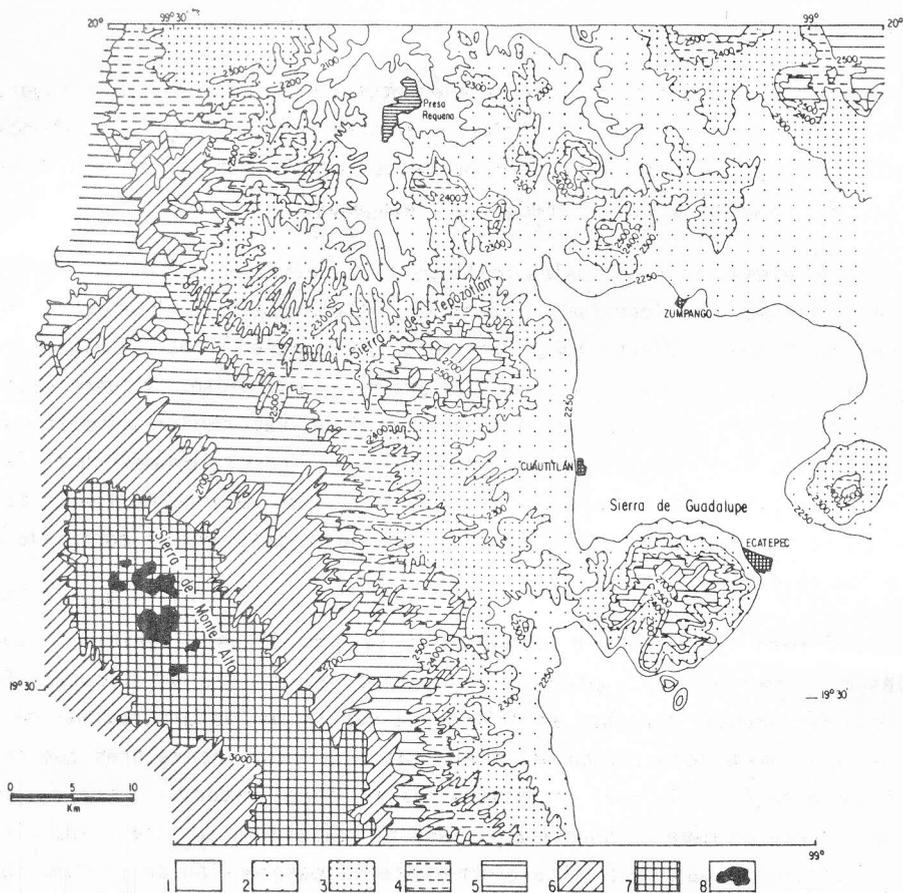


Fig. 2. Mapa hipsométrico (porción de la hoja topográfica México, 1: 250 000 E14-2 (SPP). Alturas absolutas en metros: 1, 2235-2250; 2, 2250-2300; 3, 2300-2400; 4, 2400-2500; 5, 2500-2700; 6, 2700-3000; 7, 3000-3500; 8, >3500.

Actualmente la hipsometría del planeta tiene como valores extremos -11 022 y +8 800 m, de lo que resulta una diferencia vertical máxima de casi 20 km.

### Mapas morfométricos.

Fue a partir de una clasificación numérica de la red fluvial establecida por R.E. Horton en 1945, que se desarrollaron muchos de los métodos morfométricos actuales. Es un procedimiento en extremo sencillo que clasifica las corrientes fluviales en órdenes numéricos: las que no poseen afluentes son de primer orden, las que resultan de la unión de dos de primer orden son de segundo; dos de segundo originan una de tercero, etc. (figura 3); posteriormente, una vez clasificadas todas las corrientes, las de orden mayor se van extendiendo hacia la parte alta de la cuenca, eliminándose órdenes menores. En 1952, A. Strahler modificó el método de Horton, dejando sólo la primera parte, la más sencilla.

Estos estudios estaban orientados a las cuencias hidrológicas consideradas como unidades del relieve, o sistemas cuyos límites son precisos. Posteriormente surgieron métodos morfométricos complementarios al estudio de las cuencias y se extendieron al relieve en general, buscando su correlación con otros elementos tales como los movimientos verticales, las rupturas de las rocas, la edad del relieve, etc. Esto último tuvo desarrollo especialmente en la Unión Soviética, con las investigaciones de numerosos geógrafos geomorfólogos.

A continuación se explican los métodos morfométricos principales que se aplican en las investigaciones geomorfológicas.

**1. Densidad de disección del relieve.** Es el equivalente a la densidad de corrientes fluviales, pero se diferencia de ésta porque su objetivo no son las corrientes en sí, sino el resultado de su acción, los talwegs como líneas originadas por la erosión fluvial. Su elaboración sigue los siguientes pasos.

a) En un mapa topográfico en escala grande, 1: 100 000 o mayor, se marcan todos los talwegs, tanto los que aparecen con corrientes fluviales, como

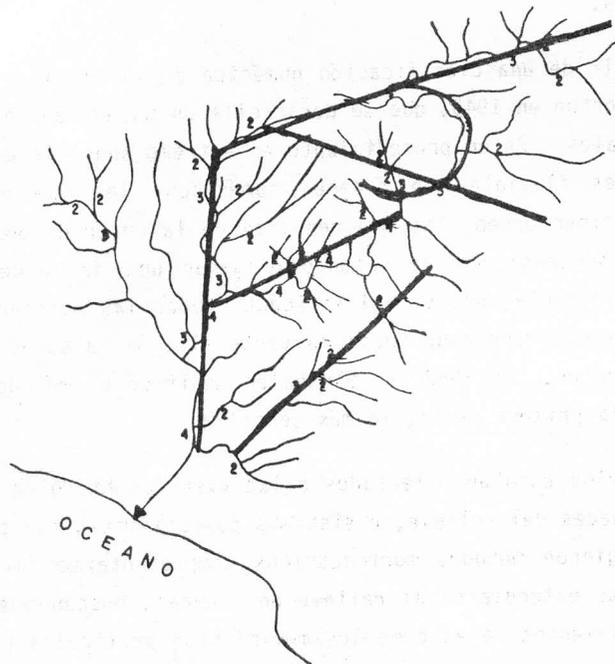


Fig. 3. Clasificación de la red fluvial en órdenes de corrientes de acuerdo con Horton (primera etapa) y Strahler. Las corrientes sin número en el mapa son de primer orden. Ejemplo real de un río que desemboca en el Pacífico cerca de Puerto Vallarta, Jal. Con líneas gruesas continuas se indican lineamientos.

- los que no, que se infieren por la configuración de las curvas de nivel.
- b) Se divide el mapa en figuras geométricas que cubran superficies de entre 16 y 25 km<sup>2</sup>. En cada una se mide la longitud total de talwegs (km) y se divide el valor entre la superficie (km<sup>2</sup>); el resultado -densidad de diseción en km/km<sup>2</sup>- se anota en el centro de la figura.
  - c) Se hace una interpolación entre todos los números en posición inmediata, para obtener complementarios.
  - d) Se configura con isolíneas.
  - e) El mapa puede terminarse en color, de acuerdo con la jerarquía utilizada en el mapa hipsométrico, o con achure.

Si a criterio del ejecutante los valores obtenidos no son suficientes, se utiliza una **ventana móvil**, o sea, una figura geométrica semejante a las utilizadas en el mapa, misma que se coloca en distintas zonas (con su centro en el punto de intersección de las figuras establecidas), con lo que se obtienen complementos.

No son convenientes las figuras geométricas pequeñas que proporcionen un exceso de información, ni muy grandes que generalicen. El trazo final de las isolíneas conviene realizarse con apoyo en la carta topográfica original, para modificar algunos trazos que aritméticamente se desvían de la realidad.

La representación final puede hacerse también por el relleno con color o achure de las figuras geométricas establecidas. En general, es preferible la configuración en isolíneas. En la figura 4 se muestra un ejemplo.

Estos mapas complementan a los de otras disciplinas, lo cual es comprensible ya que se trata de parámetros asociados al régimen hidrológico: infiltración, escurrimiento, precipitación; se relaciona con el tipo de rocas y estructura geológica; con procesos de erosión fluvial, gravitacionales, cárnicos. En este caso, como en otros, la información que se acumula sobre el relieve facilita su comprensión, pero ésta se da por la correcta interpretación de los datos obtenidos. Mientras más elementos se tengan en el proceso de análisis, mayor es la posibilidad de tener mejores resultados.

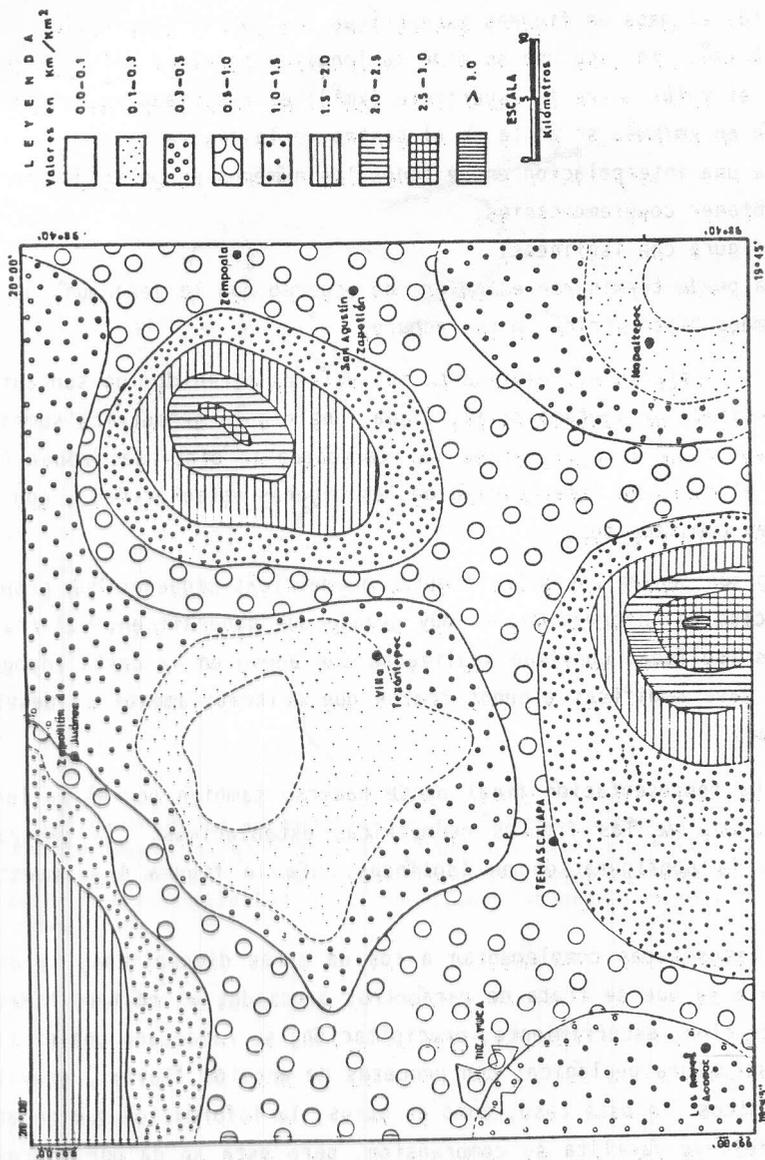


Fig. 4. Mapa de densidad de disección, hoja "Tizayuca", E14B11, SPP, (Sánchez Pérez, 1978).

**2. Ordenes de corrientes.** La elaboración de estos mapas es muy simple, aunque exige que el territorio cubra por lo menos una cuenca fluvial completa. A partir de esta carta se puede proceder a la elaboración de otras. En un caso, semejante al de densidad de disección, considerando corrientes de un mismo orden en las mediciones; así pueden resultar dos, tres o más cartas de este tipo para una misma región.

Otro método sencillo es el de frecuencia de corrientes, semejante al anterior, sólo que en vez de medir longitudes se cuenta la cantidad de corrientes de un mismo orden que quedan dentro de las figuras geométricas establecidas.

La utilidad de estos análisis parte de la consideración de que los órdenes de corrientes son reflejo de un proceso evolutivo. Las de primer orden son las más jóvenes, con valles de formación incipiente. Las de órdenes mayores, en general, reflejan las etapas más antiguas de desarrollo de la red fluvial, y en muchos casos son indicadores de estructuras sobre las que se han desarrollado los valles fluviales: anticlinal, grieta, falla, etc.

Un método ingenioso que se apoya en los órdenes de corrientes es el desarrollado por V. Filosofov, mismo que pretende reconstruir con curvas de nivel el relieve original a partir de los puntos donde se cruzan las corrientes de un orden determinado (excepto primero y segundo); uniendo con líneas valores iguales de altitud, pero sin cruzar las corrientes seleccionadas para el proceso cartográfico, resulta una configuración aproximada al relieve original. Esto es un esquema idealizado que sólo en determinadas condiciones geológicas y fisiográficas puede dar buenos resultados; otros tres mapas complementan al primero. En la obra de V.E. Jain (1980) se explica con detalle. Este procedimiento, como otros, es importante no tanto por la receta, sino por el criterio que se aplica, basado en una concepción sobre la formación del relieve en relación con estructuras geológicas plegadas y su transformación por los procesos de la erosión fluvial.

**3. Profundidad de erosión o disección del relieve.** A diferencia del método de densidad de la disección, que considera el proceso en plano, la profundidad de erosión lo considera en un perfil y equivale a una altura vertical

medida entre el talweg y la divisoria. Visto en un plano se trata de una distancia transversal al talweg y el valor se obtiene con facilidad por la diferencia de cotas entre curvas de nivel. El procedimiento es el siguiente:

- a) Se trazan las corrientes fluviales y sus divisorias correspondientes.
- b) Se divide el mapa en figuras geométricas iguales. La superficie que cubran debe establecerla el ejecutante de acuerdo con las condiciones fisiográficas y la escala en que se trabaje. En México hemos aplicado figuras de 5 km<sup>2</sup> para mapas 1: 50 000, y 900 km<sup>2</sup> para escalas 1: 4 000 000
- c) En la superficie correspondiente a cada figura geométrica se obtiene el valor MAXIMO de profundidad por erosión y se anota en el centro de la figura. En seguida se procede igual que en el método explicado, párrafos arriba, con el número uno.

La profundidad de erosión es un reflejo de un proceso de un tiempo determinado, con mayor intensidad en unas zonas que en otras, en función de las condiciones litológicas, estructurales, tectónicas y climáticas, principalmente. Por esto, los mapas resultantes también apoyan los estudios sobre la evolución del relieve, la presencia de estructuras disyuntivas y otros aspectos. Tiene aplicación en problemas de geotecnia, recursos hídricos, riesgos, erosión del suelo e, incluso, en yacimientos minerales.

La figura 5 muestra un ejemplo de este tipo de mapa.

**4. Disección general del relieve.** Se han intentado distintos métodos para combinar la información de los mapas de densidad y profundidad de disección en uno solo. Un procedimiento consiste en multiplicar valores de densidad de disección por energía del relieve; otro más en convertir en una escala de órdenes, establecida a criterio, los valores de densidad y profundidad de disección (una escala de valores para cada uno) y posteriormente sumar los dos que corresponden a cada zona. Es más aceptado el que se explica a continuación.

Se divide la carta topográfica en figuras geométricas iguales y en cada una de ellas se mide la longitud (en km) total de las curvas de nivel



y el valor se anota en el centro de la figura. Se puede, también, dividir la suma de longitudes entre el área. El procedimiento posterior es igual que en los casos anteriores. Una variante proporciona la pendiente media del terreno, al multiplicar el resultado de longitudes entre área por el intervalo de las curvas de nivel.

Es natural que los relieves con mayor grado de disección en plano y en perfil muestren más curvas de nivel y, también, más largas, con numerosos dobleces. Un ejemplo de este tipo de mapa se muestra en la figura 6.

**5. Pendientes del terreno.** Este es uno de los mapas morfométricos más sencillos, pero también laborioso. Se trata de un trabajo esencialmente mecánico consistente en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de pendiente. El problema principal es establecer los rangos que se representarán en el mapa, y esto depende de la escala utilizada, de la equidistancia entre curvas de nivel, de las condiciones fisiográficas y de los objetivos del trabajo. Hay que tener en cuenta que los valores de pendiente representados son promedio para una superficie inclinada proyectada en plano, de determinada anchura o longitud. Por esto, la mayor precisión se alcanza midiendo pendientes en distancias reducidas, entre 3 y 6 mm en el mapa, sea entre dos curvas inmediatas o entre cinco o diez. Recordando algunos principios aritméticos, el valor de inclinación se puede expresar en distintas formas, de acuerdo con el ejemplo siguiente.

En un mapa en escala 1: 50 000 se mide una pendiente entre dos puntos separados 5 mm que corresponden a curvas de nivel de valores 1200 y 1300 m. Resulta la distancia vertical (a) igual a 100 m y la horizontal (b) = 250 m (1 mm = 50 m). La pendiente puede expresarse como:  
 $a/b = 1/2.5$  (1); 0.4 (2); 40% (3);  $\text{ang tg } 0.4 = 21^\circ 49'$  (4).

Estas cuatro formas de expresión de la pendiente se usan en la geomorfología, pero en la cartografía se acostumbra la última, en grados. También por un método gráfico se pueden establecer los valores de pendiente para una escala y equidistancia de curvas determinadas, pero siempre son más precisos los métodos aritméticos.

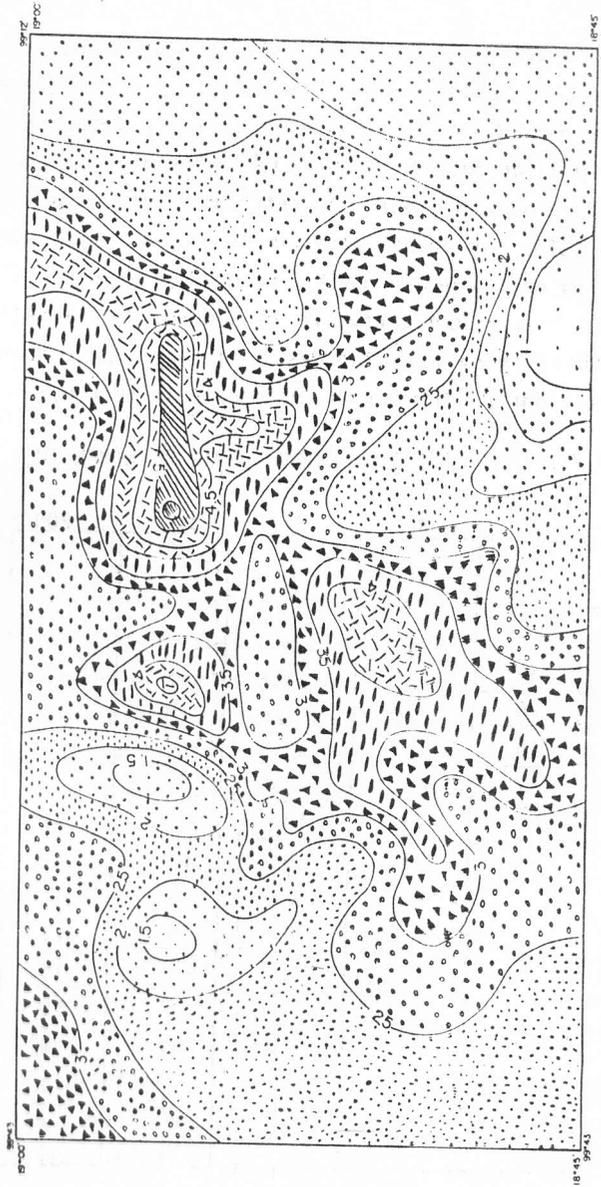


Fig. 6. Mapa de densidad general de disección, región Cuernavaca, Mor. - Tenancingo, Méx. (Palacio, 1980). Los valores de las isolíneas representan longitudes de curvas de nivel en km por km<sup>2</sup>.

Es conveniente, al elaborar un mapa de este tipo, buscar la mayor precisión midiendo entre dos curvas inmediatas, a menos que éstas se encuentren muy próximas ( $\ll 3$  mm); si la distancia horizontal entre curvas es constante, incluso puede hacerse la medición entre diez curvas. El problema se puede simplificar con una tabla de referencia en la que se tengan tres elementos: equidistancias entre curvas de nivel, distancia horizontal entre curvas para una escala determinada y valores en grados. Algo semejante a una tabla de un mapa de carreteras en el que en forma inmediata se reconocen las distancias entre dos ciudades elegidas. La siguiente tabla se elaboró para determinar pendientes en una escala 1: 50 000.

DISTANCIAS VERTICALES ENTRE CURVAS DE NIVEL (M)

GRADOS	10	20	40	50	100	200	
0 10'	69						D e i n s t r a e n n c c i u v a r e v l e a n s
0 20'	46						
0 30'	23	46					
1	12	24					
1 30'	7	15					
2	6	11					
3	4	8	16	19			
6		4	8	9	19		
9							
12				5	9	19	
15				4	7	15	m d m e
20				3	5	10	
25					4	9	
30					3	7	
35					3	6	

Tabla 3. Valores de pendiente que resultan de la relación de distancias vertical y horizontal, obtenidas en un mapa topográfico en escala 1: 50 000. Por una simple operación  $(a/b) \times 100$  se obtiene la pendiente en tanto por ciento, cuyo equivalente en grados vale la pena tener a la mano en otra tabla:

%	Grados	%	Grados
1	0 35'	14	8
1.5	0 52'	15.8	9
2	1	17.6	10
2.5	1 30'	21.3	12
3.5	2	26.8	15
4.5	2 30	36.4	20
5.2	3	46.6	25
7	4	57.7	30
8.8	5	70	35
10.5	6	84	40
12.3	7	100	45

Tabla 4. Equivalencias entre grados y tantos por cientos.

Cuando se elaboran mapas de pendientes de relieves complejos, donde se alternan superficies niveladas y elevaciones montañosas, es conveniente diferenciar intervalos en grados para uno y otro tipo de formas. Por ejemplo, para las planicies: 1) hasta 0.5, 2) 0.5-1.5, 3) 1.5-3, 4) 3-6; para las elevaciones: 5) 0-6; 6) 6-10, etc. Vemos las variantes posibles para elaborar un mapa de pendientes, lo que constituye el verdadero problema geomorfológico. La ejecución, aunque muy laboriosa, es la parte secundaria del problema. La figura 7 muestra un ejemplo.

**6. Energía o amplitud del relieve.** Este método consiste, también, en dividir un mapa en figuras geométricas iguales. En cada una de ellas se obtiene la diferencia máxima de alturas (en metros) y se anota el valor en el centro de la figura. Posteriormente se hace lo mismo que en los casos anteriores. Puede apreciarse que la dificultad consiste en elegir los valores en km<sup>2</sup> de las superficies en que se subdivide el mapa, para obtener una información satisfactoria.

La energía del relieve expresa, cuando se trata de grandes territorios cartografiados, la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena (figura 8). Altos valores de energía pueden corresponder a zonas de mayor actividad tectónica; en el caso contrario a otras

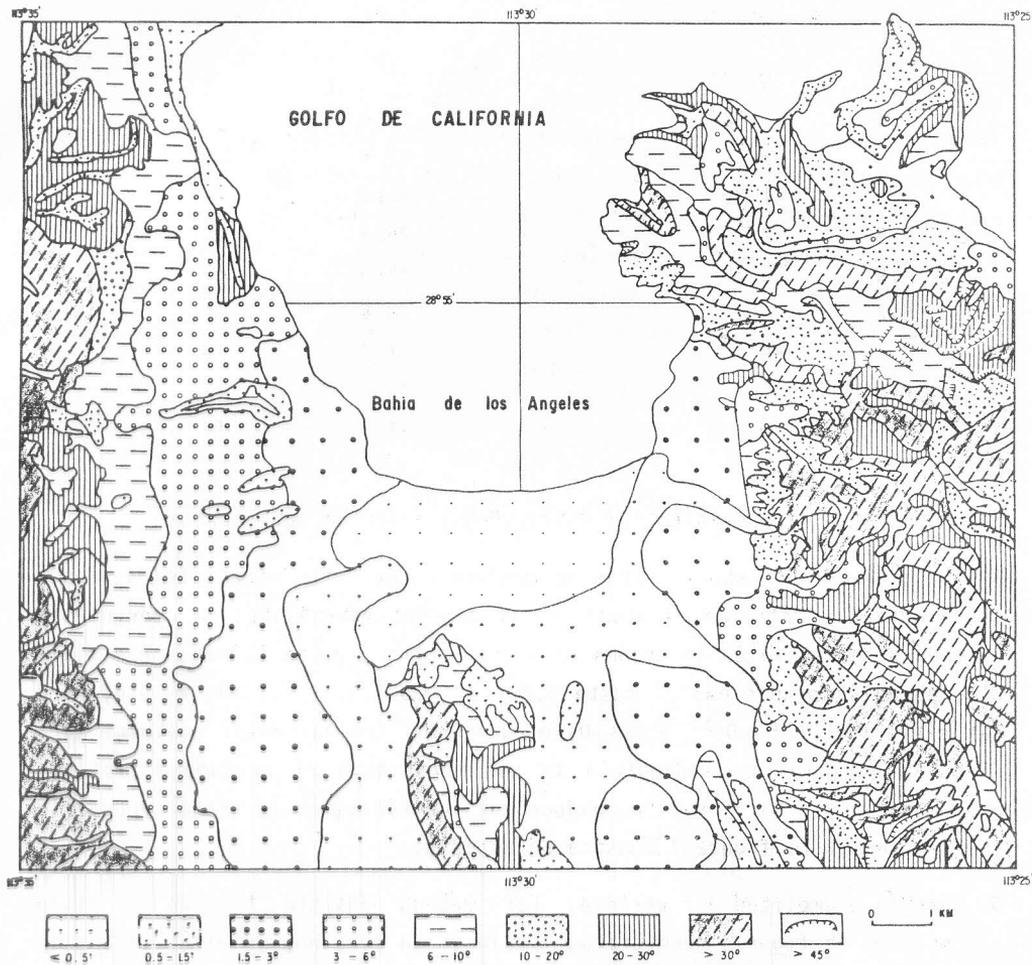


Fig. 7. Mapa de pendientes (Lugo, 1986). Fragmento de la hoja topográfica 1: 50 000 Bahía de los Angeles, BCS, H11B52, SPP.

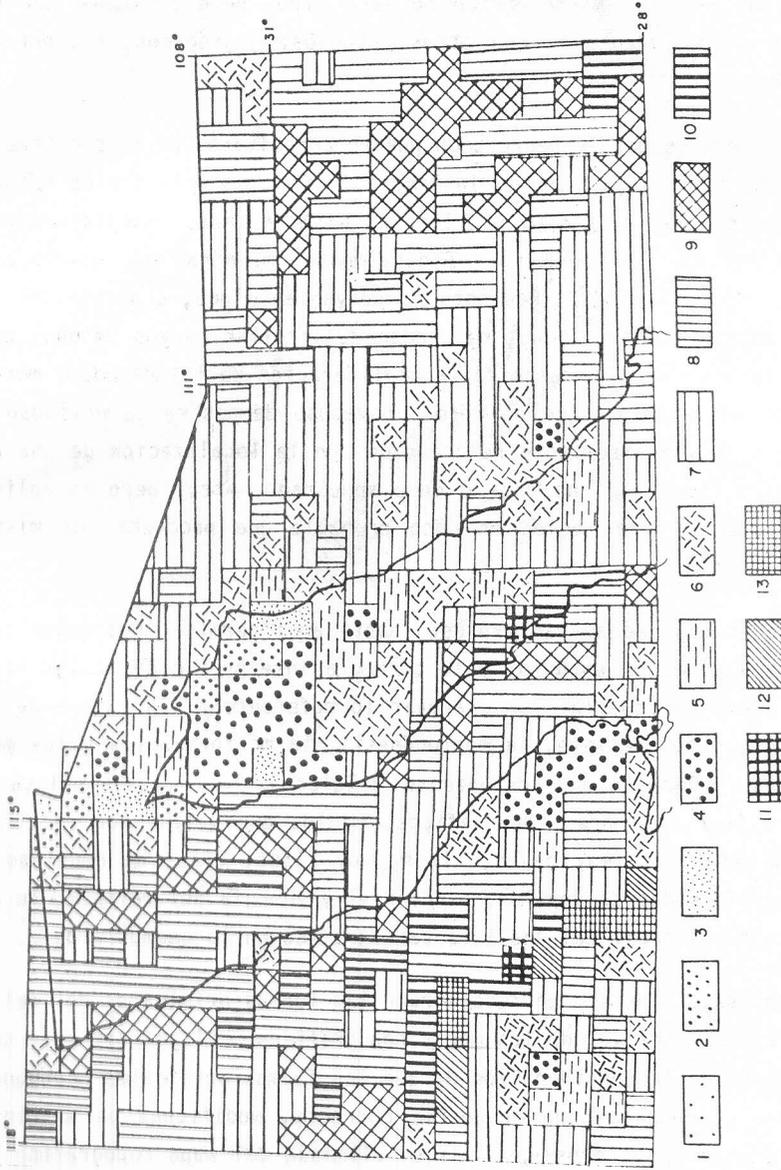


Fig. 8. Mapa de energía del relieve del noroccidente de la República Mexicana. Diferencias máximas de altitud en metros: 1, <math>\leq 10</math>; 2, 10-20; 3, 20-50; 4, 50-100; 5, 100-300; 6, 300-500; 7, 500-1000; 8, 1000-1500; 9, 1500-2000; 10, 2000-2500; 11, 2500-3000; 12, 3000-3500; 13, 3500-4000.

más estables. Es evidente que problemas semejantes no se resuelven por la elaboración de un mapa morfométrico de este tipo, pero sí puede ser una buena ayuda y complementarse con otros estudios: geológicos, tectónicos, sísmicos, etc.

Los ejemplos que se han citado pueden consultarse en la publicación en español de Miller (*La piel de la Tierra*). Son los principales métodos morfométricos los más sencillos y útiles al mismo tiempo. Existe una gran cantidad de métodos y en aumento. Generalmente, mientras más complicados son es menor su aplicación. Por esto es conveniente que, a partir del conocimiento amplio de los mismos, se puedan desarrollar nuevos métodos para una región determinada. Se explica la proliferación de los estudios morfométricos por el hecho de que un método novedoso demuestra su utilidad al resolver un problema importante relacionado con la localización de una estructura petrolífera, de una fosa o domo sepultado, etc., pero la aplicación del mismo en otra región es poco probable que produzca los mismos resultados.

Los métodos que se han expuesto hasta aquí permiten una mejor comprensión del relieve en estudio, y la correcta interpretación de los mapas elaborados lleva al especialista a apoyar lo referente a las edades de las distintas formas del relieve, la morfogénesis, la morfodinámica y las morfoestructuras. También es conveniente señalar que el profesionalista se acostumbre a leer los mapas topográficos, en los que define con facilidad los valores relativos (muy bajos, altos, muy altos, etc.) de densidad de disección, profundidad de erosión, pendientes y energía del relieve, lo que es una parte fundamental del análisis cartográfico en la geomorfología.

7. **Morfoisohipsas.** Consiste en reconstruir las formas originales del relieve por las curvas de nivel de los mapas topográficos. El principio es sencillo y se basa en la consideración de que las formas originales endógenas, en lo general, presentan una geometría correcta, modificada en distintos grados por los procesos erosivos. Si se eliminan del mapa topográfico las formas exógenas como los valles, se puede tener una aproximación al relieve primario (figura 9), pero más que al relieve, a las estructuras geológicas. No siempre es posible aplicar este método, o el grado de dificultad varía.

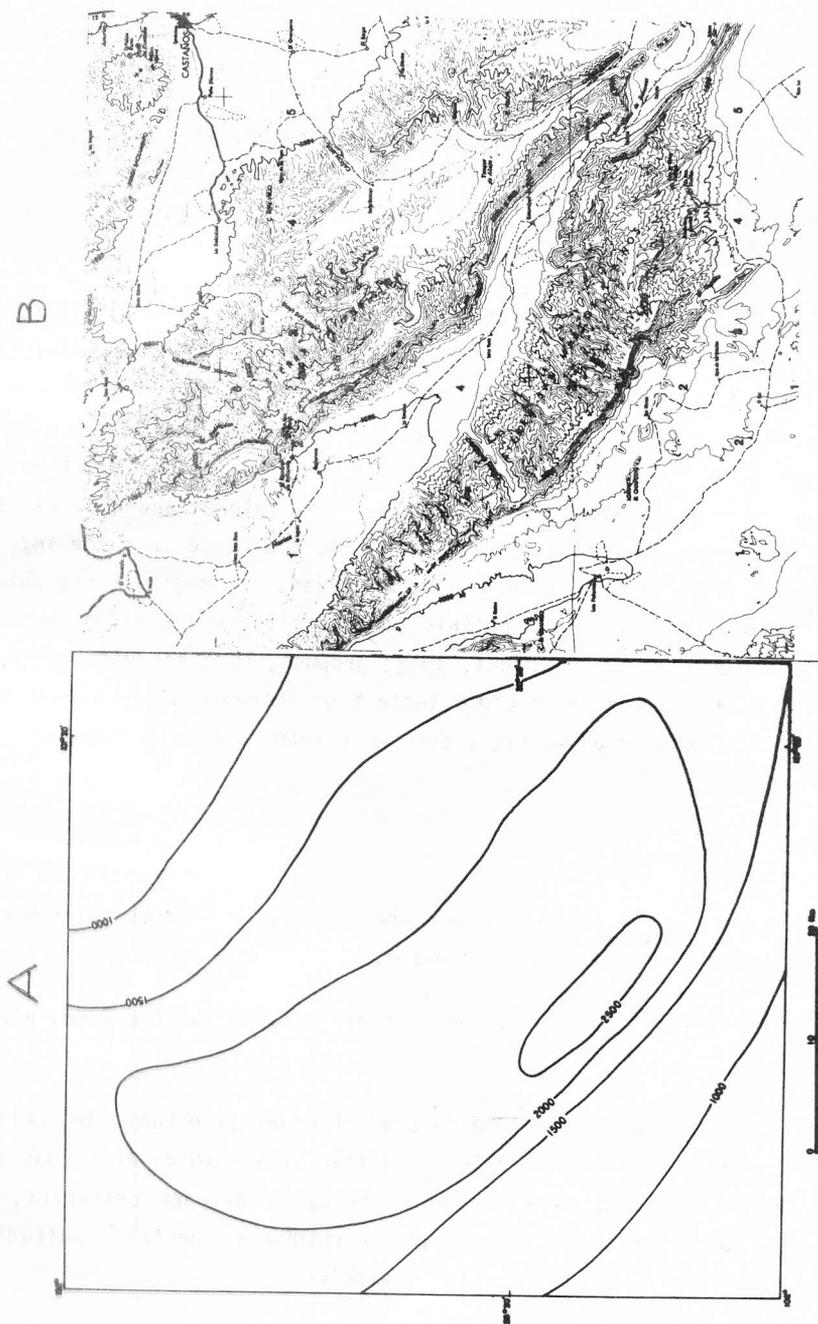


Fig. 9. Mapa de morfoisohipsas (B) resultado de la interpretación de otro topográfico (A) 1: 250 000 (fragmento), hoja Monclova G14-4, SPP.

Se aplica especialmente como apoyo a los estudios de geomorfología estructural y neotectónica.

8. Pendientes de los valles fluviales. Otro de los análisis importantes en la geomorfología es el de los perfiles longitudinales de los valles. Y. Mescheriakov aplicó en 1956 un método sencillo para apoyar los estudios morfoestructurales de regiones cratónicas, y consiste en lo siguiente.

A partir de cartas topográficas en escala grande se elabora una serie de perfiles longitudinales para los talwegs de los valles principales (figura 10). En cada perfil se observan los cambios bruscos de gradiente y se interpreta su origen tratando de señalar únicamente aquellos cambios (anomalías) debidos a factores tectónicos. Esto es, se eliminan aquellos que se deben a factores litológicos y exógenos. Los valores anómalos de gradiente se indican en la carta topográfica y posteriormente se puede inferir la correlación entre anomalías de distintos valles. En regiones cratónicas de la URSS este método permitió definir zonas activas e inactivas tectónicamente. L. Setunskaya (Aristarjova, 1979) propuso, para estudios de mayor detalle, la determinación de un coeficiente K de incremento de la pendiente del cauce en una zona de anomalía, y éste se determina por la fórmula:

$$K = \frac{I_a}{1/2 (I_b - I_h)}$$

$I_a$  es el gradiente del cauce en la porción anómala,  $I_b$  e  $I_h$  el gradiente en la porción superior e inferior de la misma.

Las estructuras geológicas más activas poseían valores K más elevados.

Este método nos da una idea de cómo proceder al estudio del relieve a partir de un elemento de los valles. Existen aplicaciones mucho más complicadas matemáticamente, pero ya que se trata de exponer criterios, con esto resulta suficiente. Es conveniente acompañar el perfil longitudinal con otro litológico y, de ser posible, geológico.

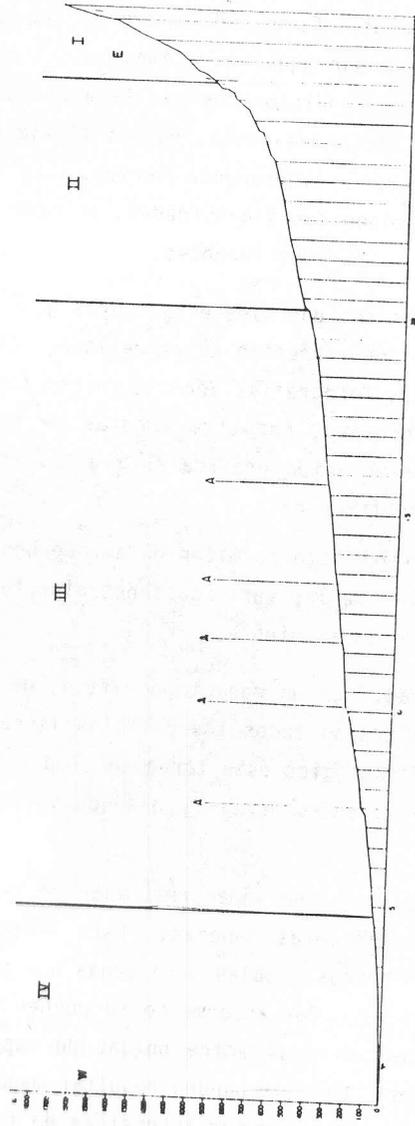


Fig. 10. Perfil longitudinal del cauce de un valle fluvial en las montañas de la Sierra Madre del Sur, región del estado de Colima. La letra A representa las anomalías reconocidas, en apariencia, límites de bloques. Zonas del valle: I, de erosión remontante; II, de erosión remontante; III, de erosión vertical; IV, de erosión vertical-lateral; E, de acumulación.

**9. Análisis de lineamientos.** Es un método con amplia aplicación en la geomorfología. Lineamientos son aquellos elementos del relieve dispuestos en una dirección dominante y condicionados por la actividad endógena. Se expresan a través de las líneas de costa, valles fluviales, etc. cuya geometría es de líneas rectas o ligeramente curvas. Es normal que un cauce fluvial se presente en plano con sinuosidades, en cambio, es poco común que sea rectilíneo en distancias considerables.

Los lineamientos son posibles estructuras geológicas (ejes de pliegues, grietas, fallas) con expresión en el relieve. En el estudio de gabinete se reconocen en las fotografías aéreas, cartas topográficas e imágenes de satélite. Posteriormente, por otros medios se intenta su estudio con más detalle. Su representación gráfica se realiza en mapas y en gráficas conocidas como rosas de fracturas.

Los métodos de gabinete permiten un avance considerable en el estudio de una región, antes de las verificaciones directas en el campo, y consisten esencialmente en lo siguiente.

a) Elaboración de mapas. En un mapa topográfico, de preferencia en escala grande (1: 50 000) se trazan todos los posibles lineamientos; si se cuenta con el apoyo del mapa geológico esta tarea se simplifica, más aún, iniciando el trabajo con fotografías aéreas y después vaciando la información al mapa.

Una vez que se tenga un mapa preliminar de lineamientos (figura 11) se puede proceder de distintas maneras. Este se puede subdividir en una serie de figuras geométricas iguales o en zonas que presentan distintas características geológicas. Posteriormente se pueden cuantificar los lineamientos, sea por longitud total entre unidad de superficie o por cantidad en superficies iguales. De aquí pueden resultar mapas que muestran en forma clara las zonas con mayor y menor intensidad de fractura (figura 12), lo que en principio equivale a zonas afectadas por esfuerzos mayores y menores, respectivamente. Sin embargo, siempre es necesario considerar todos los factores que pueden influir en el proceso de la fractura, principalmente la litología. Cada tipo de rocas presenta distintas características de disyunción.

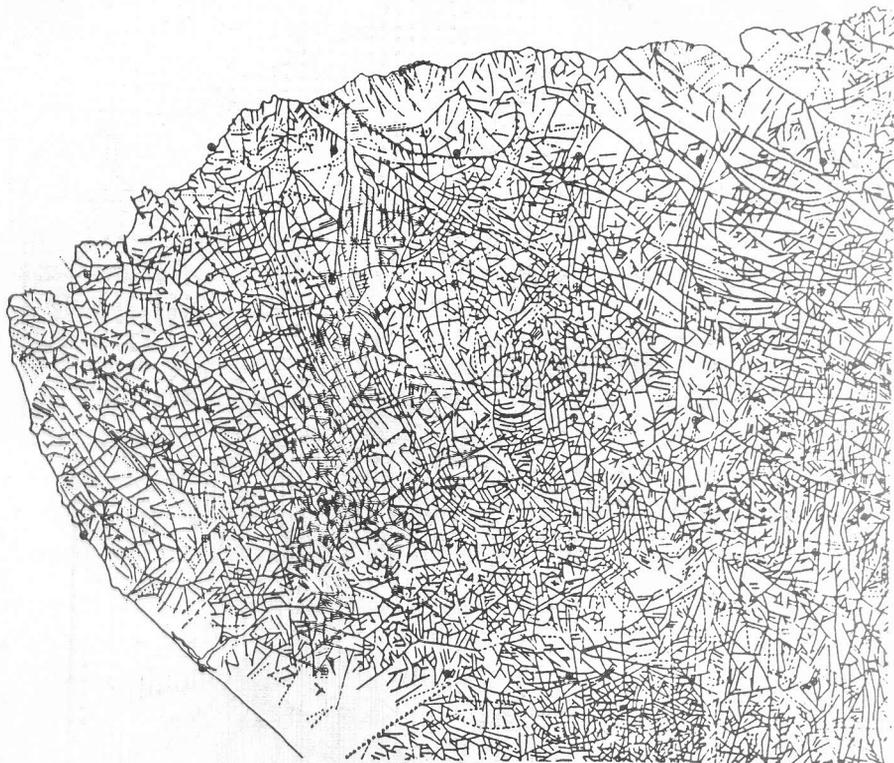


Fig. 11. Carta de lineamientos de la región de Cabo Corrientes, Jal. (Lugo y Ortíz, 1980b), elaborada por fotointerpretación.

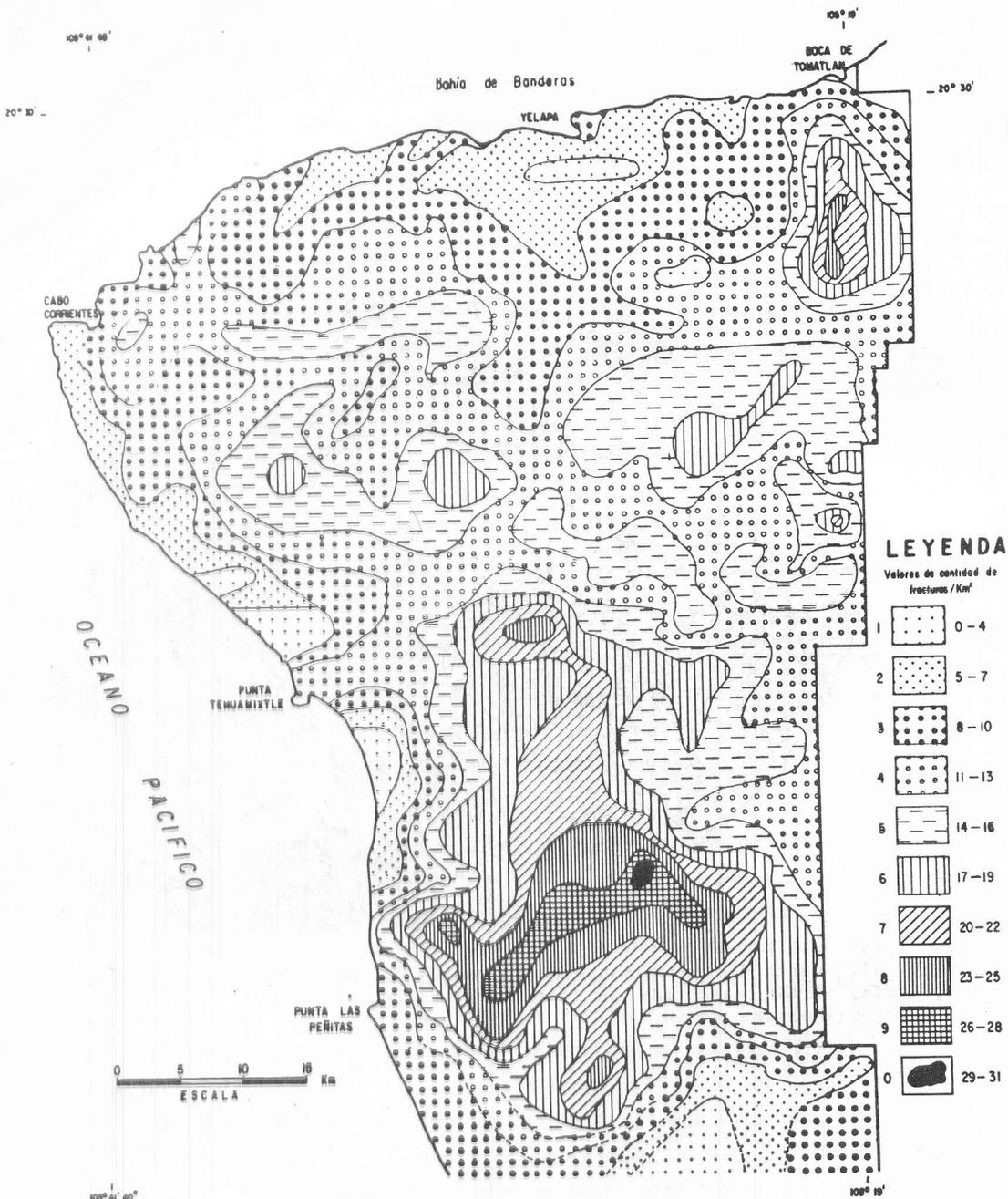


Fig. 12. Carta de frecuencia de lineamientos de la región de Cabo Corrientes, Jal. (Lugo y Ortíz, 1980a).

En muchos casos la red fluvial es una expresión fiel de la fractura de las rocas y, por esto, una carta de la densidad de la disección (expuesta en el punto 1) puede compararse con una equivalente de lineamientos. Lo mismo una carta de corrientes de orden tres o más alto. Es el criterio del investigador el que puede definir la conveniencia o no del método aplicado, de acuerdo con las características de la zona en estudio. En las redes fluviales en sedimentos no consolidados (aluviales, piroclásticos, etc.) es escasa la relación con las fracturas y es mayor en los sistemas montañosos y las superficies cratónicas donde las rocas del sustrato afloran o se encuentran cerca de la superficie.

La elaboración de los mapas puede considerar no todos los lineamientos sino, a criterio, seleccionarse los de determinada orientación o dimensiones longitudinales mínimas, etc. Pueden ser también mapas complementarios al principal.

Las zonas de mayor fractura, eliminando aquellas en las que la influencia es esencialmente litológica, pueden corresponder a crestas de formas plegadas, a domos, zonas de falla, intersección de grietas o fallas de grandes dimensiones, etc. Por esto son un apoyo importante en los estudios morfoestructurales y tienen aplicación en los trabajos preliminares de geotecnia, exploración de yacimientos minerales y estructuras petrolíferas.

b) Rosas de grietas. Entre los métodos de la geología estructural hay varios para representar las grietas. En la geomorfología estructural se utiliza normalmente el más sencillo, que refleja en una gráfica cantidades de grietas en una determinada dirección. Estas gráficas pueden elaborarse tanto en gabinete como en el campo. Para el primer caso se eligen zonas en la carta de lineamientos en las que se determina la orientación (es suficiente con respecto al norte) de todos los lineamientos reconocidos en el mapa. Vaciando los valores obtenidos en una hoja de papel polar el trabajo se simplifica mucho. Una vez que se cuenta con todos los datos necesarios se establece una escala proporcional en milímetros o centímetros que corresponden a una determinada cantidad de lineamientos con orientación en un intervalo de 10 grados (figura 13). Es conveniente que la cantidad de mediciones para la elaboración de una rosa, por lo menos se aproxime al centenar.

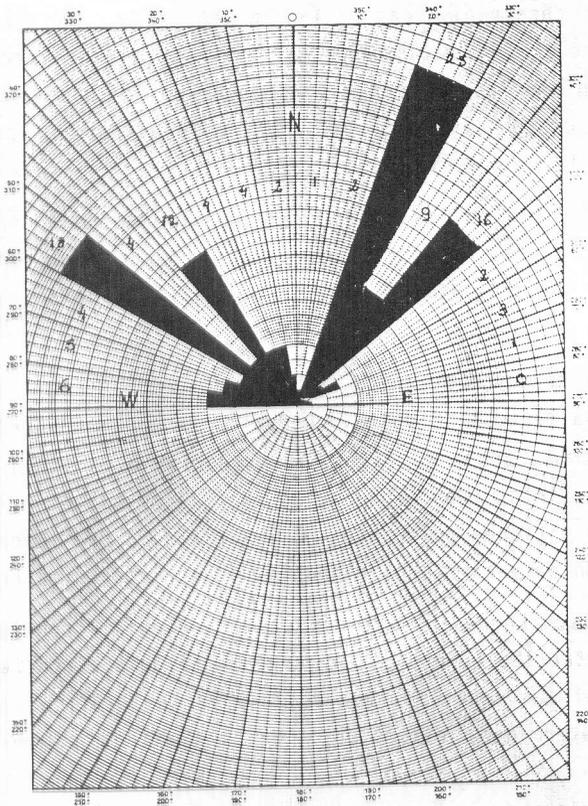


Fig. 13. Rosa de fracturas elaborada con mediciones en las montañas próximas a Puerto Vallarta, Jal. con base en 120 datos. Los números representan la cantidad de mediciones hechas en el intervalo correspondiente.

En el campo, en una misma zona se miden con la brújula las orientaciones de todas las grietas observables, independientemente de sus dimensiones. El procedimiento es igual que en el caso anterior.

Este tipo de análisis permite apoyar no sólo los estudios sobre geomorfología, sino, también, de geología general.

### **Consideraciones sobre los métodos morfométricos.**

Como conclusión sobre los métodos morfométricos conviene insistir en que pueden ser de mucha utilidad si se aplican en forma razonada, entendiendo, de antemano, que sólo son un apoyo para la resolución de un problema, y éste se resuelve cuando hay una interpretación correcta. La elaboración de mapas morfométricos como ejercicio para estudiantes tiene la ventaja de que los familiariza con los mapas y gradualmente se acostumbran a leer la abundante información que contienen, lo mismo que a entender el relieve, identificar sus formas, los procesos actuales, estructuras, relaciones entre estos elementos y otros, etc.

Un error grave es pensar que los mapas morfométricos conducirán directamente a una solución. Por valiosa y veraz que sea la información obtenida, sin el criterio del especialista no se podrán obtener resultados adecuados.

Hoy día se aplican instrumentos electrónicos para la ejecución de mapas de todo tipo. Es también conveniente distinguir entre las ventajas y desventajas de realizar todo tipo de mapas morfométricos por medio de una computadora. En muchos casos lo mejor es combinar los métodos tradicionales con la computación, sobre todo cuando esto economiza tiempo. Por otro lado, siempre existe la ventaja de almacenar una gran cantidad de información por medios electrónicos, misma que puede enriquecerse, transformarse y utilizarse en el futuro, con una enorme economía de tiempo. Otra cuestión es que no todos los mapas morfométricos son resultado total de fórmulas matemáticas, sino que el ejecutante puede corregir algunos trazos de la máquina para obtener mayor precisión.

Este tipo de estudios son convenientes en México por dos razones. Primero, por el escaso estudio geomorfológico del país, que exige una "infraestructura"; segundo, por la ventaja de contar con una buena base topográfica en escala grande, 1: 50 000, que facilita este trabajo.

## VI. ANALISIS MORFOGENETICO

El objetivo fundamental de los estudios geomorfológicos, tradicionalmente han sido la elaboración de mapas morfogenéticos. Esto significa que cualquier porción de la superficie terrestre, en escala desde la más pequeña a la más grande (tabla 1), se puede cartografiar diferenciando formas del relieve en función de su origen. Esto es en sí la morfogénesis. Se acostumbra agregar otro tipo de información que complementa el mapa: datos morfométricos (pendientes en grados, principalmente), elementos que reflejan únicamente morfología, edad de las formas (en términos geológicos), tipos de rocas, y, actualmente, se incluye información sobre neotectónica (tipos e intensidades relativas de los movimientos endógenos modernos).

No existe un acuerdo internacional común para la elaboración de los mapas morfogenéticos. Muchos autores se limitan a representar únicamente los elementos de la morfogénesis; otros consideran indispensable agregar información litológica, y otra corriente se opone porque considera que el mapa geomorfológico se acompaña de otro geológico; la información sobre neotectónica depende del grado de estudio geológico y tectónico del área en cuestión.

El mapa morfogenético es una combinación de información geológica y topográfica, de lo que resulta, en una primera interpretación, un mapa preliminar. El objetivo de los mismos es presentar una información general sobre el relieve de la región objeto de estudio. A diferencia del mapa geológico, cuya elaboración sigue reglas de aceptación universal, para el mapa geomorfológico sólo existen recomendaciones, y actualmente se siguen en el mundo las de dos escuelas principales: la hecha por una comisión internacional (Demeck, 1972) y la francesa, de la cual uno de sus principales exponentes es J. Tricart (1972).

Una de las mayores ventajas de la cartografía geomorfológica es la posibilidad de expresar los elementos más importantes del relieve de una zona en estudio, de acuerdo con los fines establecidos, de tal manera que, entonces, se desvía de las reglas comunes. Esto es muy frecuente porque una gran parte de los estudios geomorfológicos que se realizan en el mundo están dirigidos a la solución de un problema determinado. Sin embargo, la prevalencia de criterios para la elaboración de un mapa geomorfológico, orientado a problemas como: riesgo volcánico, aludes, derrumbes; recomendar zonas para la exploración de yacimientos hidrotermales, petrolíferos o placeres; proponer una política de planificación de uso del suelo: recreación, urbana, etc., deriva de la teoría general del mapa morfogenético.

La morfogénesis se basa en tres elementos: agente, proceso y forma. Los procesos intemperismo, erosión y acumulación son de distintos tipos, y agregando los endógenos resulta una amplia variedad que da origen a la totalidad de las formas actuales de la superficie terrestre.

Una clasificación del relieve para la elaboración de cartas geomorfológicas en escala grande es la siguiente (basada en Chemekov (1972) y Bashenina et al (1975)).

#### **Relieve endógeno.**

##### **A. Formas tectónicas modernas.**

1. Antiguas inactivas: escarpes de falla, laderas.
2. Jóvenes activas: crestas anticlinales, escarpes de falla, domos salinos.

##### **B. Formas volcánicas.**

1. Destructivas: cráteres, calderas, maares.
2. Mesas y derrames de lava.

#### **Relieve exógeno.**

##### **A. Formas denudatorias (erosivas).**

1. Destructivas: superficies transformadas por procesos gravitacionales, por erosión diferencial, remociones locales.

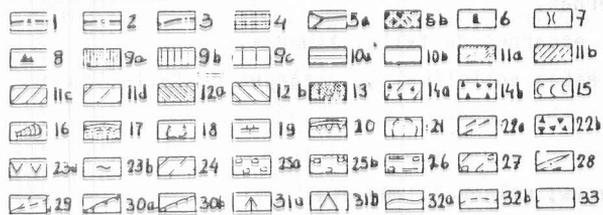
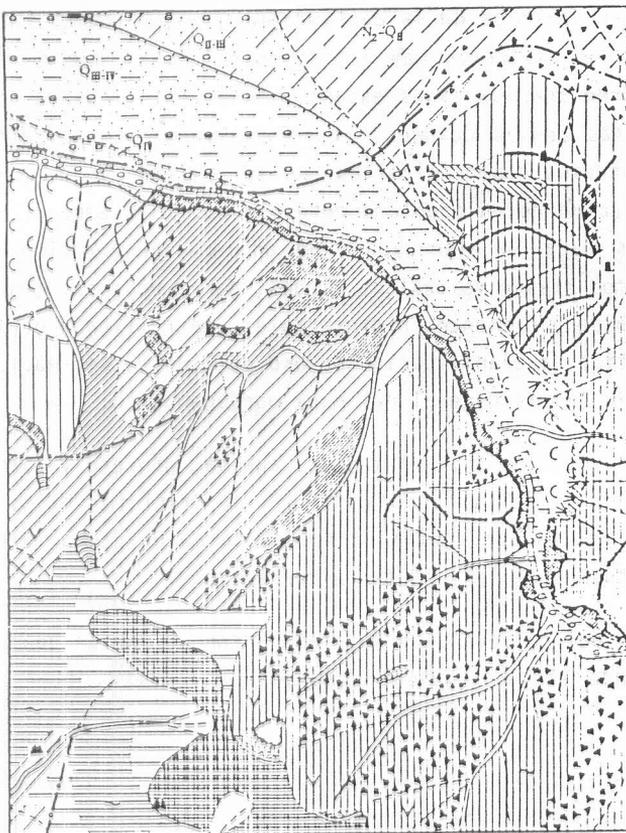


Fig. 14. Fragmento de una carta geomorfológica en escala 1: 50 000 (Talskaya, 1975). Leyenda resumida. Dislocaciones disyuntivas con expresión en el relieve: 1. Determinadas; 2. Inferidas; 3. Límite de fosa tectónica intermontana; 4. Superficies de nivelación anteriores al plioceno tardío ( $>1$  600 m); 5. Divisorias escalonadas de crestas montañosas (a: agudas, estrechas, escarpadas; b: redondeadas, planas); 6. Cimas de denudación; 7. Depresiones de denudación; 8. Residuos de intemperismo periglacial; 9. Laderas tectónicas (a:  $36-55^{\circ}$ ; b:  $26-35^{\circ}$ ) c:  $16-25^{\circ}$ ; Laderas Denudatorias: 10. De soliflucción (a:  $6-10^{\circ}$ , b:  $3-5^{\circ}$ ); 11. De reptación (a:  $36-55^{\circ}$ , b:  $26-35^{\circ}$ , c:  $16-25^{\circ}$ , d:  $11-15^{\circ}$ ); 12. Deluviales (a:  $11-15^{\circ}$ , b:  $6-10^{\circ}$ ); 13. De derrumbecaja de rocas ( $36-55^{\circ}$ ). Acumulaciones: 14, Manto de piedemonte formado por

depósitos de soliflucción-deluviales: a: residuales, b: activos; 15. Deluvial-proluviales; 16. Escalones estructurales; 17. Laderas de circos glaciáricos menores; 18. Depresiones de exaración; 19. Barra rocosa de circo; 20. Nichos de nivación; 21. Embudos de cuencas de captación; 22. Kurumes (a: ríos de roca; b: mares de roca); 23. Procesos actuales de modelado (a: soliflucción, b: reptación); 24. Fondos de cuencas intermontanas acumulativas, rellenas de sedimentos lacustres proluvial-aluviales ( $N_3^2 - Q_3$ ); 25. Llanura de inundación (a: baja  $Q_4^2$  b: alta  $Q_4^1$ ); 26, I terraza ( $Q_{3-4}$ ) de 3-5 m; 27. II terraza de zócalo ( $Q_{2-3}$ ) de 10 a 12 m; 28. Llanura de inundación y porciones de terrazas de ríos menores; 29. Depresiones de erosión; 30. Escarpes de erosión (a: en rocas del sustrato, b: en sedimentos no consolidados); 31, Conos de deyección. Límites: 32, Geomorfológicos (a: precisos, b: inferidos); 33. Límites de laderas de distinta pendiente.

2. Acumulativas.
  - 2a. Gravitacionales: originadas por caída de rocas, derrumbes.
  - 2b. Conos de deyección, mantos proluviales.
- B. Formas fluviales.
  1. Destructivas: escarpes, gargantas.
  2. Acumulativas: planicies aluviales, deltaicas.
- C. Formas fluviales-denudatorias.
  1. Destructivas: laderas de valles y barrancos.
- D. Formas fluvioglaciáricas.
  1. Destructivas (con erosión fluvial preglaciárica): laderas de valles, escarpes de terrazas de sandur.
  2. Acumulativas: planicies y conos de sandur, terrazas de kame.
  3. Destructivas (por corrientes subglaciáricas): paredes de canales y depresiones subglaciáricas.
  4. Acumulativas (por corrientes subglaciáricas): eskeres (o esqueros).
- E. Formas cársticas.
  1. Originadas por la disolución de las rocas: lapiaz, dolinas, uvalas, ponoras, cavernas.
  2. Con desarrollo en rocas no solubles: depresiones por asentamientos gravitacionales.
  3. Originadas por disolución y erosión fluvial: bordes de gargantas, valles ciegos, valles colgantes.
  4. Originadas por la depositación del carbonato de calcio: escalones de travertino.
  5. Originadas por disolución y abrasión (erosión marina): nichos, depresiones, costas con lapiaz.
- F. Formas de sufosión; hondonadas, valles.
- G. Formas glaciáricas.
  1. Destructivas: frentes de carnero, estrías, escarpes, nunataks, drumlins.
  2. Acumulativas: morrenas.
  3. De firn y glaciáricas: nieve, campo de firn, lenguas glaciáricas, seracs, frentes y cuevas de glaciares.
- H. Formas nivales y criógenas.
  1. Destructivas: nichos, aristas, formas criógenas del suelo.
  2. Acumulativas: crestas, franjas de rocas, planicies de soliflucción.

I. Formas termocársicas.

1. Originadas por deshielo: hidrolaccolitos, depresiones.
2. Originadas por la fusión de bloques de hielo en el subsuelo: depresiones, escarpes.

J. Formas eólicas.

1. Destructivas: campos de yardangs, hoyas de deflación.
2. Acumulativas: dunas, barjanes.

K. Formas marinas.

1. Destructivas: plataformas de abrasión, cantiles, grutas.
2. Acumulativas: playas, barras, flechas, tómbolos, marismas.

L. Formas orgánicas: planicies de pantanos de turba, montículos de turba, colonias de corales.

M. Formas antrópicas.

1. Destructivas: canteras, minas a cielo abierto, grandes excavaciones.
2. Acumulativas: jales.

Puede apreciarse que esta clasificación consta de adjetivos (procesos) y sustantivos (formas). Un par de ejemplos de mapas de este tipo se muestran en las figuras 14 y 15.

Las escalas ideales para este tipo de cartografía son: 1: 25 000 la más grande y 1: 250 000 la más pequeña. El procedimiento más adecuado para la elaboración de un mapa morfogenético es la fotointerpretación, lo que se complementa con el análisis del mapa topográfico correspondiente y otros temáticos de apoyo, principalmente el geológico. Una vez contando con un esquema preliminar, el trabajo de campo permite verificar los resultados del gabinete y perfeccionar el mapa.

## VII. ANÁLISIS MORFODINÁMICO

Los tipos de procesos que definen las formas del relieve clasificadas en el tema anterior de la morfogénesis no son, forzosamente, los mismos que actúan hoy día. Las terrazas fluviales representan un antiguo proceso fluvial; los valles glaciáricos pueden ser testigos de otras condiciones climáticas o encontrarse en desarrollo como tales. Lo mismo puede decirse de otras formas del relieve, sea eólico, marino, cársico, etc. En muchos

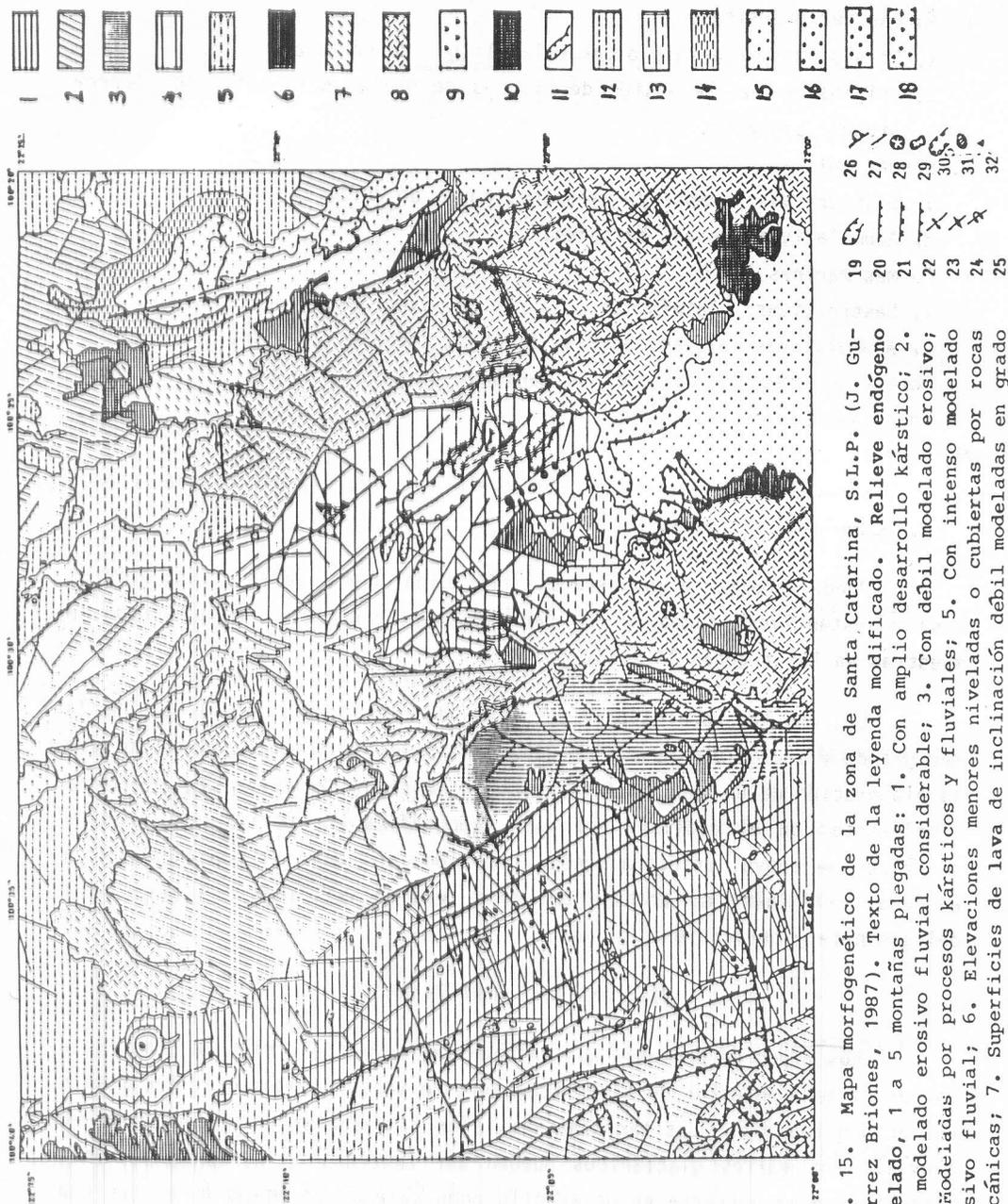


Fig. 15. Mapa morfogenético de la zona de Santa Catarina, S.L.P. (J. Gutiérrez Briones, 1987). Texto de la leyenda modificado. Relieve endógeno modelado, 1 a 5 montañas plegadas; 1. Con amplio desarrollo kárstico; 2. Con modelado erosivo fluvial considerable; 3. Con débil modelado erosivo; 4. Modeladas por procesos kársticos y fluviales; 5. Con intenso modelado erosivo fluvial; 6. Elevaciones menores niveladas o cubiertas por rocas volcánicas; 7. Superficies de lava de inclinación débil modeladas en grado fuerte por la erosión; 8. Laderas montañosas volcánicas con fuerte modelado

erosivo; 9. Mesas de lava. **Relieve exógeno**, a) Denudatorio: 10. Superficies de divisorias conservadas con respecto a la erosión; 11. Valles erosivos fluviales en laderas montañosas; 12. Superficies niveladas de inclinación débil; 13. Laderas modeladas en grado fuerte por procesos kársticos y erosivo fluviales; 14. Laderas modeladas en grado intenso por procesos kársticos y erosivos; b) Acumulativo: 15. Planicies de inundación; 16. Terrazas aluviales; 17. Conos de deyección; 18. Mantos coluviales (gravitacionales). **Símbolos complementarios**: 19. Circos de erosión; 20. Escarpes erosivos; 21. Escarpes estructurales; 22. Escarpes tectónicos; 23. Ejes de anticlinales; 24. Ejes de sinclinales; 25. Eje de anticlinal recumbente; 26. Eje de sinclinal recumbente; 27. Fracturas principales; 28. Volcanes; 29. Dolinas; 30. Polje; 31. Lago kárstico; 32. Cimas.

casos la información sobre los procesos actuales puede sobreponerse en la carta morfogenética; un medio para lograr esto es diferenciar las formas del relieve en activas o inactivas cuando esto es posible: dolinas, barrancos, dunas, valles glaciáricos, etc.

Por la aplicación que tienen los mapas de morfodinámica es común que se elaboren independientemente de los de morfogénesis. "A partir de una carta topográfica, en cualquier escala, se pueden inferir, en forma preliminar, los procesos exógenos dominantes en una región. En las escalas pequeñas se consigue representarlos a partir de la regionalización, o sea, aquel o los que dominan en un amplio territorio; en escalas muy grandes (incluso 1: 5 000) se pueden cartografiar con mucho detalle."

Un nivel de mayor aproximación lo proporciona la observación de las fotografías aéreas y el trabajo de campo. "Inicialmente se diferencian los distintos procesos exógenos: tipos de erosión y acumulación delimitados de acuerdo con su zona de influencia. Posteriormente se pueden estudiar intensidades relativas, por ejemplo, erosión fluvial débil, moderada, intensa, etc.", lo que son criterios cualitativos (figura 16).

"La geomorfología moderna, en muchos países ha pasado a cuantificar los procesos exógenos, de tal manera que se pueden cartografiar muchos de ellos de acuerdo con las velocidades promedio que se han establecido. Esto es resultado de observaciones precisas y continuas durante varios años. Se conocen valores de erosión vertical y lateral de los valles fluviales en general, de los glaciáricos, de la disolución de las rocas, de la velocidad de retroceso de cantiles marinos, de avance de las cabeceras de barrancos, del movimiento de dunas, etc.; lo mismo podemos decir de la acumulación que se cuantifica en volúmenes o unidades lineales por unidad de tiempo, lo mismo para el océano que para la tierra firme." Un autor moderno que trata este tipo de problema es Ollier (1981).

De un mapa topográfico se puede obtener información sobre procesos exógenos suficiente para elaborar un esquema preliminar; el problema es más sencillo mientras mayor es la escala. Los mapas morfométricos, en especial

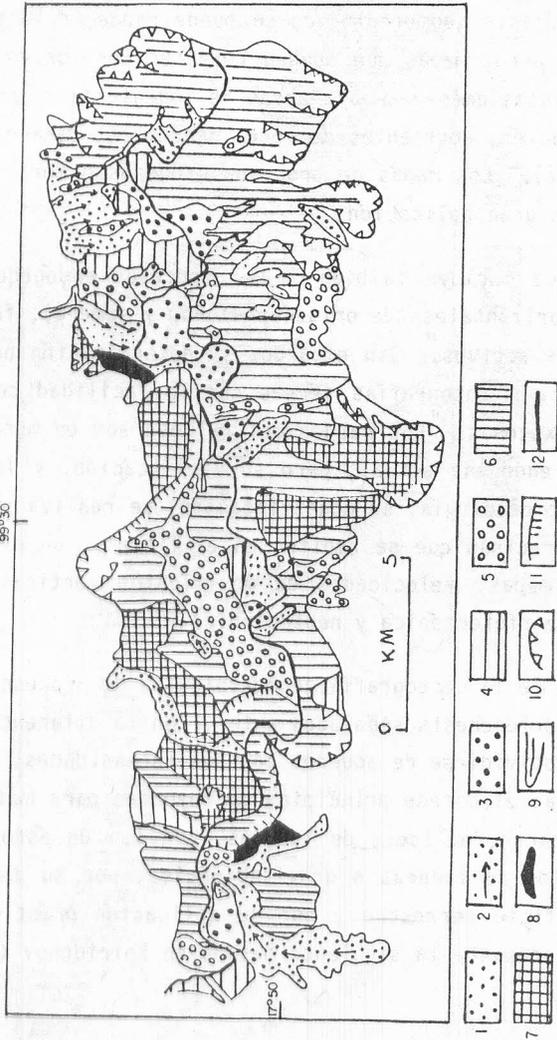


Fig. 16. Mapa de procesos actuales aplicado al proyecto de construcción de una presa en el valle de Balsas, Gro. (L. Aguilar Pérez, E. Palacios González, 1983). 1. Acumulación fluvial; 2. Acumulación aluvial y fuerte remoción; 3. Superficies estables (terrazas); 4. Erosión fluvial muy débil en planicies y elevaciones; 5. Erosión fluvial débil en laderas de rocas resistentes; 6. Erosión fluvial moderada en laderas de rocas poco resistentes; 7. Erosión (procesos gravitacionales) intensa; 8. Erosión (procesos gravitacionales) débil; 9. Escarpes; 10. Cauce del río principal (Balsas); 11. Valles fluviales principales; 12. Valles fluviales secundarios.

Los hipsométricos, de profundidad y densidad de disección, y de pendientes, son un apoyo para la comprensión de los procesos exógenos actuales.

“La importancia de este tipo de cartografía radica en que expresa los cambios que se están produciendo actualmente en la superficie terrestre, y a partir del análisis geomorfológico se puede predecir la transformación a corto plazo.” Otros mapas que pueden resultar son los de riesgos, mapas que señalan distintas amenazas para obras de ingeniería o asentamientos humanos, por inundación, corrientes de lodo, derrumbes, lahares, hundimiento, etc. (figura 17). Los mapas de procesos exógenos o morfodinámica, y sus variantes, tienen gran aplicación.

“La morfodinámica incluye también a los procesos endógenos: movimientos verticales y horizontales (de origen profundo y somero), fallas activas, volcanes y domos activos.” Sin embargo, su determinación no se hace en la carta topográfica o fotografías aéreas con la facilidad con que se definen los procesos exógenos. “Los rasgos del relieve son en muchos casos indicios de actividad endógena actual, pero su verificación, y lo que hoy es importante en la geomorfología, su cuantificación, se realiza principalmente con mediciones precisas que se repiten en el tiempo. De estos estudios resultan varios mapas: velocidades de movimientos verticales de la superficie terrestre, morfotectónica y neotectónica.”

Los principios de la cartografía geomorfológica de procesos son semejantes a los de la morfogénesis señalados antes, con la diferencia de que los procesos pueden subdividirse de acuerdo con sus intensidades. Para estudios de detalle se han elaborado principios de leyendas para cada tipo de procesos (fluviales, carso, eólicos, de laderas, etc.). De éstos, tienen especial importancia los de laderas o gravitacionales, por su amplia distribución en la superficie terrestre y por su aplicación práctica. Como ejemplo de leyenda se presenta la siguiente basada en Spiridonov (1985).

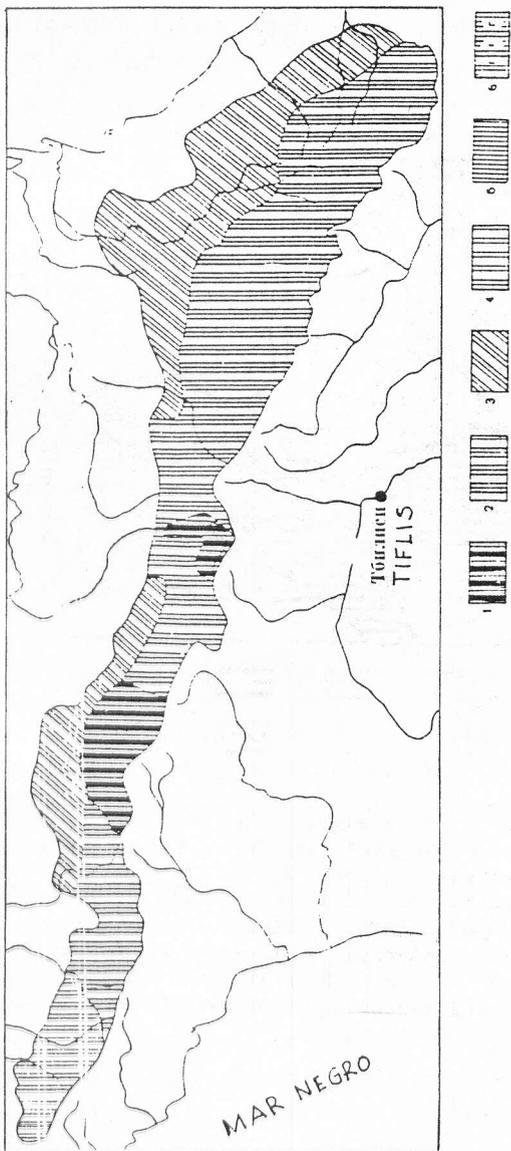


Fig. 17a. Fragmento de un mapa de riesgos en escala pequeña: regiones de la URSS con peligro de corrientes de lodo (K.V. Akifieva et al 1976). Regiones con riesgo de diverso grado por corrientes de lodo: 1, significativo en altas montañas; 2, moderado en altas montañas; 3, moderado en montañas de poca altura; 4, débil en altas montañas. Tipos de corrientes de lodo por su alimentación hídrica: 5, pluvial; 6, mixto (glacial-pluvial).

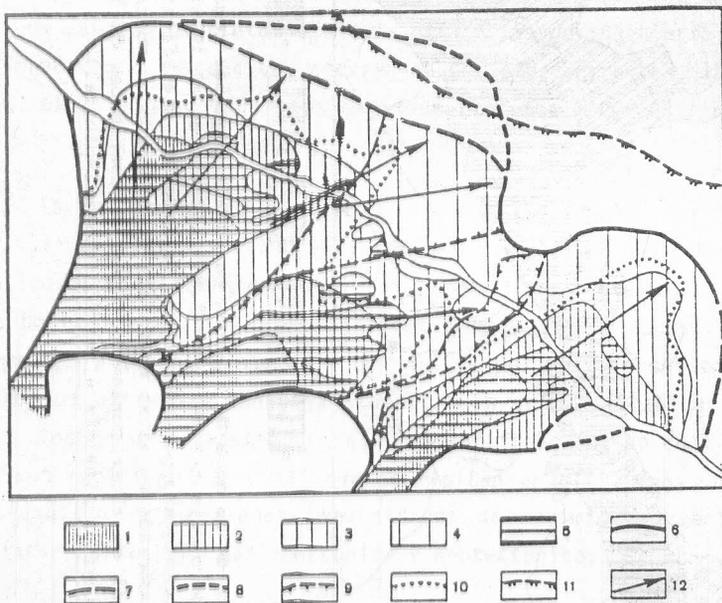


Fig. 17b. Esquema de riesgo por avalanchas en una zona de construcciones ingenieriles, en escala 1: 10 000 (K.V. Akifieva, 1975). Frecuencia de avalanchas: 1. Porciones afectadas anualmente; 2. En intervalos de hasta 10 años; 3. De 10 a 30-50 años; 4. De más de 50 años (hasta 200); 5. Porciones afectadas el año de la investigación. Límites: 6. Alcance de las avalanchas, determinado; 7. Alcance inferido; 8. Alcance potencial; 9. Cuencas de captación de las avalanchas; 10. Zona de avalanchas húmedas; 11. Pie de la ladera de los valles, opuesta respecto a las avalanchas; 12. Dirección de desplazamiento.

## Procesos de laderas

1. Gravitacionales.
  - 1.1. Movimientos rápidos (caída libre y rodamiento de rocas).
    - 1.1.1. Derrumbes.
    - 1.1.2. Caída de rocas.
    - 1.1.3. Aludes
  - 1.2. Movimientos de bloques de rocas.
    - 1.2.1. En laderas de desplome.
    - 1.2.2. Deslizamientos.
    - 1.2.3. Flujos-deslizamiento.
  - 1.3. Movimientos lentos de material detrítico grueso (por cambios de temperatura y humedad en la superficie y laderas del subsuelo).
  - 1.4. Flujos lentos.
    - 1.4.1. Solifluxión.
    - 1.4.2. Reptación.
    - 1.4.3. Criosolifluxión.
2. Diluviales (escurrimiento en manto en las laderas).
  - 2.1. Denudación.
  - 2.2. Acumulación.

" Para el territorio mexicano es muy importante el conocimiento de los procesos exógenos, muy activos como respuestas a la actividad neotectónica. Prácticamente todos los tipos están presentes en el país. En la península de Yucatán predomina el carso, en la Sierra Madre Occidental la erosión fluvial vertical, en el altiplano y noroeste tienen amplio desarrollo los mantos de piedemonte, localmente se presentan desiertos; en los tres volcanes más altos hay glaciares activos, el desarrollo de barrancos se reconoce en gran parte del país; los procesos marinos (litorales) tienen lugar en una longitud total de unos 10 000 km (incluyendo islas). Esta gran variedad de dinámica exógena no es ajena a la antagónica, no menos variada: alta sismicidad en la margen pacífica del sur de México y en el Golfo de California, volcanismo potencialmente activo en toda la Faja Volcánica, Baja California Sur y Chiapas; movimientos horizontales en Baja California, etc. "

## VIII. ANALISIS MORFOESTRUCTURAL

El término morfoestructura fue utilizado inicialmente por Guerasi-mov, en 1946, "para referirse a formas del relieve originadas esencialmente por procesos endógenos en interacción con los exógenos, a las que corresponde una determinada estructura geológica." En este sentido se sigue aplicando el término, aunque algunos autores usan otros tales como formas tectónicas y formas estructurales.

Originalmente el objetivo de los estudios geomorfológico estructurales era "relacionar la estructura geológica con las formas de la superficie terrestre." Así, a partir de la observación de ésta "es posible, en muchos casos, inferir la arquitectura del subsuelo: domos, monoclinales, anticlinales, fallas, etc. Posteriormente, este tipo de estudios fue abarcando problemas más complicados, como el "reconocimiento de estructuras ocultas y la determinación de movimientos neotectónicos." Para esto es necesario no solamente analizar las formas del relieve, sino los procesos exógenos actuales (tipos e intensidades), además de apoyarse en la geología y la geofísica.

### Mapas en escala pequeña

Los mapas morfoestructurales proporcionan simultáneamente información geomorfológica y tectónica general, lo que permite la fácil comprensión de un territorio preferentemente grande, base para estudios posteriores de mayor detalle.

La evolución de los conceptos geomorfológicos y el grado de estudio de grandes superficies ha exigido una cartografía cada vez más compleja. Actualmente, los mapas morfoestructurales se complementan con información sobre la evolución tectónica, los tipos de movimientos neotectónicos y sus intensidades relativas, clasificación de lineamientos, etc. En un trabajo de divulgación del autor (Lugo, 1986) se exponen algunos tipos de cartas morfoestructurales de autores soviéticos. En la obra de E. Hills (1953) puede consultarse el último capítulo: una breve y clara exposición sobre relaciones relieve-estructura geológica.

La elaboración de un mapa morfoestructural no alcanza un alto grado de información sólo por la investigación misma. Aunque el estudio en sí incluye observaciones sobre morfología, geología y tectónica, en muchos se apoya en los trabajos existentes sobre geología del subsuelo, tectónica, neotectónica, sismotectónica, etc.

Ya que este tipo de mapas se elabora preferentemente en escalas pequeñas (1: 500 000 a 5 000 000) son útiles para recomendar las zonas favorables para estudios, en escalas más grandes, en relación con yacimientos minerales, petrolíferos, placeres, etc. En la figura 18 se muestra un ejemplo de mapa de morfoestructuras.

Como ejemplo de una leyenda tipo para mapas morfoestructurales se transcribe la recomendada por Spiridinov (1985).

1. Relieve de cinturones activos: geosinclinales, epigeosinclinales, epi-cratónicos, rift.
  - 1.1. Formas controladas por levantamientos.
    - 1.1.1. Meganticlinorios, anticlinorios, arcos de sistemas montañosos.
    - 1.1.2. Montañas y crestas de arco-bloque.
    - 1.1.3. Crestas montañosas anticlinales.
    - 1.1.4. Crestas montañosas pilar-anticlinal.
    - 1.1.5. Montañas-pilar y crestas.
    - 1.1.6. Escarpes de cabalgadura.
  - 1.2. Formas del relieve controladas por hundimiento.
    - 1.2.1. Cuencas, planicies de fosas de piedemonte e intermontanas.
    - 1.2.2. Cuencas sinclinales, valles.
    - 1.2.3. Depresiones fosa-sinclinal.
    - 1.2.4. Depresiones tipo fosa (graben), cuencas de forma circular, valles.
    - 1.2.5. Escarpes de flexión.
    - 1.2.6. Escarpes de falla normal.
2. Relieve de regiones de poca actividad (cratones).
  - 2.1. Formas del relieve controladas por levantamientos.

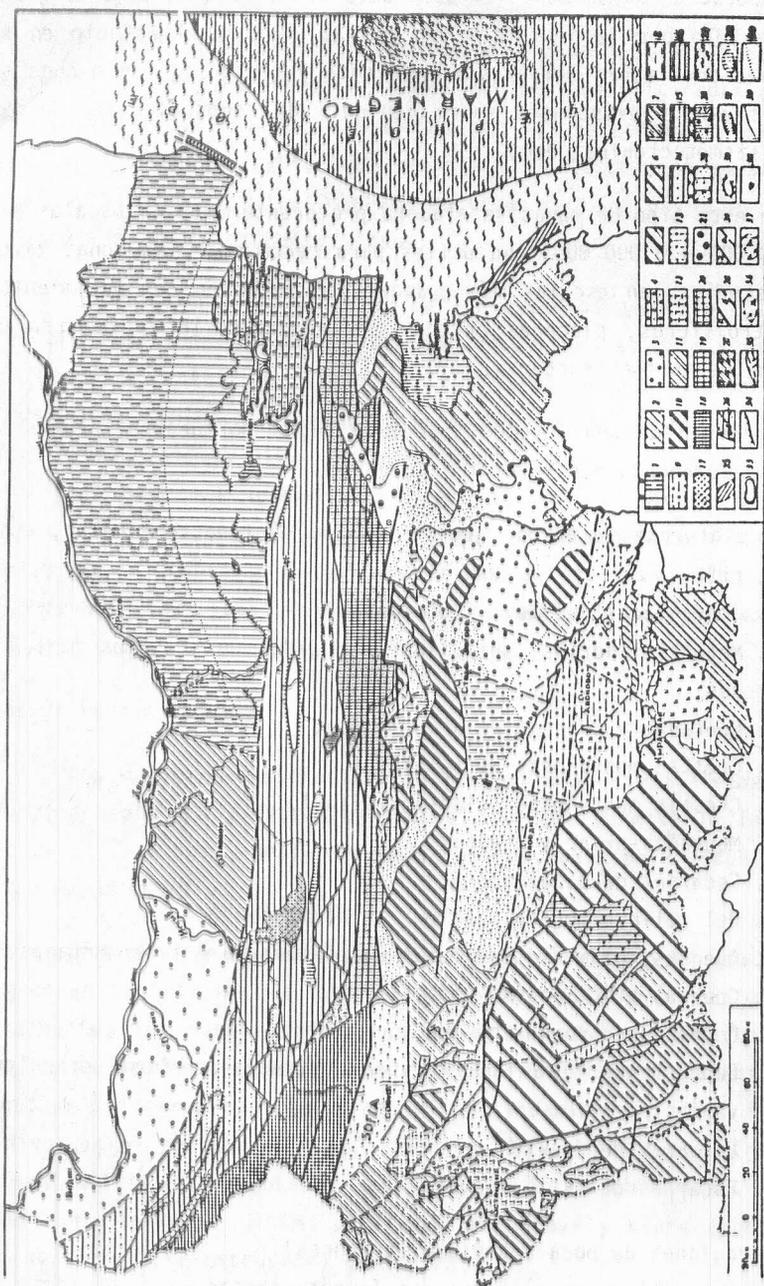


Fig. 18. Carta de morfoestructuras de Bulgaria (I. Vepstarov y K. Mishev, 1978). Leyenda resumida. Planicies epicratónicas de la plataforma del Danubio. 1. Planicies y mesetas en estructura en arco; a) planicies estructural-denudatorias y mesetas de la porción central del arco; b) planicies estructurales y acumulativas de la periferia; 2. Planicies estructural-denudatorias y acumulativas en un sustrato mesozoico y neogénico de la zona transicional de la plataforma; 3. Planicies bajas acumulativas;

4. Mesas y planicies estructural-acumulativas rellenas de sedimentos neogénicos, pleistocénicos y holocénicos; **Montañas del macizo intermedio Rodope**: 5. Montañas altas e intermedias de la porción central de una estructura arco-bloque; 6. Montañas intermedias y bajas de los bloques periféricos de una zona de reactivación alpina; 7. Montañas altas, intermedias y bajas de pilares periféricos; 8. Depresiones intramontañosas del eoceno tardío-oligoceno; 9. Depresiones intramontañosas y marginales, y piedemontes acumulativos heredadas de hundimientos neogénico-cuaternarios. **Montañas epigeosinclinales. Planicie y montañas intermedias**: 10. Montañas residuales altas, intermedias y bajas de cimas niveladas en un basamento herciniano y alpino; 11. Montañas intermedias y bajas de cimas niveladas en un basamento herciniano y mesozoico; 12. Cuencas endorreicas y exorreicas en depresiones tectónicas eoceno tardío-oligocénicas; 13. Depresiones intramontañosas y marginales, y piedemontes acumulativos de depresiones alpino tardías. **Montañas epigeosinclinales de los Planinos Seniles**: 14. Planicies acumulativas de piedemonte en un sustrato mesozoico plegado; 15. Montañas bajas y lomeríos en un sustrato plegado mesozoico y paleogénico; 16. Montañas intermedias de segmentos de arco-bloque; 17. Depresiones intramontañosas del cretácico tardío y paleógeno temprano acuñadas en elevaciones alpino tardías y modernas; 18. Altas montañas de la zona axial de una estructura arco-bloque; 19. Montañas intermedias y altas de la zona axial de una estructura de arco-bloque; 20. Montañas intermedias y bajas de la zona axial de una estructura arco-bloque; 21. Depresiones intramontañosas del eoceno tardío-holoceno. **Morfoestructuras de desarrollo moderno**: I. Depresiones intermontanas en fallas profundas y suturas: 22. Rellenas: a) por sedimentos neogénicos-pleistocénicos-holocénicos, b) neogénicos, c) pleistocénicos y holocénicos. II. Depresiones intramontañosas y marginales: 23. Rellenas: a) por sedimentos neogénicos, pleistocénicos y holocénicos, b) neogénicos, c) pleistocénicos y holocénicos. **Morfoestructuras de la cuenca del Mar Negro**: 24. Planicie de plataforma continental abrasivo-acumulativa; 25. Fosas modernas en la plataforma continental; 26. Talud continental estructural-denudatorio; 27. Planicie acumulativa profunda del fondo de cuencas. **Elementos morfoestructurales del relieve**: 28. Escarpes de fallas profundas: a) con expresión en el relieve, b) interrumpidos o sepultados; 29. Escarpes de falla normal que limitan estructuras menores: a) con expresión en el relieve, b) interrumpidos; 30. Crestas anticlinales; 31. Depresiones sinclinales; 32. Crestas y mesas sinclinales; 33. Mesetas; 34. Escalones litológicos; 35. Frente de cabalgadura con expresión en el relieve; 36-38. Morfoestructuras volcánicas: 36. Montañas en escudo-dómicas; 37. Montañas volcánicas lineales; 38. Estructuras subvolcánicas y conos neogénicos; 39. Límites de morfoestructuras mayores; 40. Límites de morfoestructuras menores.

- 2.1.1. Montañas rejuvenecidas en escudos.
- 2.1.2. Elevaciones en escudos.
- 2.1.3. Planicies, mesas de plataformas.
- 2.1.4. Elevaciones, mesas en antecliís, arcos, superficie levantadas
- 2.1.5. Crestas anticlinales y braquianticlinales.
- 2.1.6. Crestas, arcos suaves.
- 2.1.7. Colinas dómicas y diapíricas.
- 2.1.8. Crestas pilar-macizos.
- 2.1.9. Escarpes de falla inversa.
- 2.2. Formas del relieve controladas por hundimientos.
  - 2.2.1. Depresiones (planicies bajas) en cuencas y sinecliís.
  - 2.2.2. Valles en fosas.
  - 2.2.3. Depresiones sinclinales y braquisinclinales.
  - 2.2.4. Cuencas.
  - 2.2.5. Depresiones tipo fosa y valle.
  - 2.2.6. Escarpes de flexiones.
  - 2.2.7. Escarpes de falla normal.

Esta leyenda contiene los elementos tectónicos más importantes en el trabajo de cartografía morfoestructural. Es más que nada una guía que puede ser modificada o complementada. No está basada en los principios modernos de la tectónica de placas; sin embargo, términos como montañas epicratónicas, epigeosinclinales, etc. pueden ser remplazados por los correspondientes; asimismo, pueden agregarse los de margen activa y pasiva y otros más. El volcanismo, no considerado en esta leyenda, puede incluirse sin problemas y comprender incluso una tercera categoría (Núm. 3) correspondiente a cinturón volcánico, con subdivisiones numéricas de dos o tres dígitos a criterio del autor del mapa.

Este tipo de mapas se complementa con frecuencia con subdivisiones, por altitudes, de las planicies, sistemas montañosos y altiplanos. Otros elementos que se agregan, dependiendo del grado de estudio de la región, son: velocidades relativas de desarrollo en el neógeno-cuaternario (neotectónica), evolución tectónica general, edad geológica, diferenciación de formas en activas e inactivas, etc.

La elaboración de estos mapas debe considerar que la línea de costa no es un límite de las estructuras. Es siempre conveniente procurar extender la cartografía al fondo oceánico con el fin de que no se interrumpán los elementos reconocidos en la tierra firme. Por ejemplo, los sistemas montañosos marginales resultan incompletos cuando no se representa su extensión submarina (plataforma y talud continentales) y la trinchera o rift asociados. La cartografía del fondo oceánico se hace con base en cartas batimétricas y temáticas diversas. Como complemento a la leyenda de Spiridonov, la siguiente es la clasificación que recomienda O. Leontiev (1975).

1. Zona continental submarina. Es la porción de corteza granítica cubierta por el océano, consistente en tres estructuras.
  - 1.1. Plataforma continental.
  - 1.2. Talud continental.
  - 1.3. Pie del continente.
2. Zona transicional. Es aquella en la que se presentan las cortezas continental y oceánica en asociación compleja, que comprende también tres estructuras.
  - 2.1. Cuenca de mar marginal.
  - 2.2. Arco insular.
  - 2.3. Trinchera.
3. Zona del lecho oceánico. Es la de corteza esencialmente oceánica en la que se presentan las siguientes estructuras.
  - 3.1. Planicie abisal.
  - 3.2. Montañas submarinas.
4. Dorsales.
  - 4.1. Valle rift.
  - 4.2. Laderas.

Algunos autores consideran también a las dorsales como parte de la zona del lecho oceánico, puesto que pertenecen al mismo tipo de corteza. Sin embargo, Leontiev la separa en una cuarta zona. Esto es de poca importancia. Las subdivisiones en formas menores pueden continuar; por ejemplo,

Las trincheras poseen fosas individuales; la planicie abisal puede ser horizontal, ondulada; el talud continental posee una amplia variedad de formas: cañones, escarpes, mesas, etc.

### Conceptos generales

Un problema que resolver por los estudios geomorfológico estructurales es la expresión que tienen las estructuras geológicas en el relieve, que puede ser muy simple, como una elevación correspondiente a un anticlinal o domo, o compleja, que se infiere por determinados rasgos de la superficie. De acuerdo con L. Polkanova (1978) son los siguientes factores los que condicionan esta expresión:

- 1) La geometría de las estructuras geológicas.
- 2) Los procesos exógenos que actúan en respuesta a la actividad tectónica.
- 3) El sustrato rocoso: tipo litológico y estructura.
- 4) La correlación entre las velocidades de crecimiento de las estructuras y las de la erosión o acumulación.
- 5) Las características del desarrollo del relieve.

Los procesos exógenos son con frecuencia indicios para inferir estructuras activas en zonas niveladas, como planicies marinas y fluviales donde los sedimentos cuaternarios ocultan la estructura geológica. El tipo de disección, las formas del relieve presentes y las relaciones entre éstas son elementos que analizan. Como se ha mencionado en otros párrafos, son las anomalías geomorfológicas los mejores índices que pueden conducir a reconocer estructuras ocultas.

Es indispensable estudiar el sustrato geológico. El tipo de roca controla la intensidad de la disección, en unión de otros factores. Por los métodos tradicionales de la geología se pueden establecer los tipos de estructuras con un estudio detallado de los afloramientos. Ya que la litología juega un papel fundamental en la determinación de las formas del relieve, es conveniente definir las anomalías geomorfológicas que no son

controladas por este factor, para llegar a establecer cuáles se deben esencialmente a la actividad neotectónica, uno de los problemas que resolver por los métodos geomorfológico estructurales.

En las superficies donde predomina la erosión es menos complicada la expresión de las estructuras y la litología en el relieve. Este tema puede consultarse en Guerra Peña (1980), Sparks (1971) y Gerard (1988).

Más complicado es el caso de la expresión de las estructuras en las planicies de acumulación. En el caso de levantamientos locales disminuye la intensidad de este proceso, y, como regla, se presentan en la superficie como elevaciones pequeñas. Los hundimientos favorecen el desarrollo de formas tales como los bancos aluviales en los cauces de los ríos. Los estudios en la plataforma continental también han confirmado la utilidad de los métodos geomorfológicos estructurales para interpretar rasgos geológicos y actividad neotectónica.

Estos estudios se acompañan de los métodos geológicos de los espesores y las facies, que proporcionan una información fundamental para reconstruir los procesos y etapas de formación del relieve en zonas de acumulación.

Las relaciones de intensidades entre levantamiento y erosión, y hundimiento y acumulación son el principio para la comprensión de las formas del relieve en su origen y dinámica actual. Cada vez con mayor precisión se determinan velocidades de erosión y acumulación, así como de levantamiento, hundimiento o desplazamiento horizontal de grandes territorios, incluyendo las cuencas oceánicas.

Se considera que el relieve evoluciona en etapas que se caracterizan por el predominio de determinados procesos. Una orogenia representa un levantamiento en un gran territorio, con una velocidad considerable en la escala geológica. Pero durante la formación de montañas hay, también, etapas en las que predomina la erosión sobre el levantamiento.

Los movimientos neotectónicos se reconocen con frecuencia por el estudio de las costas marinas. El incremento de altura de los bancos litorales, del mar a tierra firme, es signo de levantamiento. La variación altitudinal de los cantiles de una misma litología puede explicarse por movimientos endógenos diferenciales. La erosión marina disminuye en intensidad en los cantiles más elevados, por la acumulación de rocas en su base; así, en condiciones de levantamiento pueden formarse cabos o elevaciones locales, y en el caso contrario, bahías.

### Relieve eólico.

A partir de un estudio del relieve eólico en las planicies costeras del Caspio se han reconocido estructuras geológicas ocultas, según L. Aristarjova (1979). La investigación se inició delimitando las formas no eólicas, "islas": promontorios rocosos anteriores a las acumulaciones por el viento, o de desarrollo simultáneo.

Otra parte del estudio comprendió posición de las formas, geometría y dinámica, así como el régimen eólico, fisiografía, tipo de sustrato rocoso, masas de arena e irregularidades del relieve de origen tectónico. En apariencia, la neotectónica influye en el relieve eólico, ya que un levantamiento provoca el descenso del nivel de las aguas subterráneas; asimismo afecta la resistencia del sustrato rocoso.

La expresión de las estructuras se reconoció por los siguientes elementos.

1. El terreno era más elevado y las formas eólicas mejor consolidadas sobre los arcos de estructuras locales positivas.
2. En las proximidades de los levantamientos más activos se observó un cambio local de la orientación de las formas eólicas.
3. En las formas estructurales positivas locales fue común una conjugación de grandes formas de acumulación y erosión eólica (hoyas de deflación). Se



reconocieron solanchaks húmedos salinos en depresiones a las que subyacían diapiros.

4. Con frecuencia las formas eólicas complejas y disecadas corresponden a estructuras positivas y las más simples a negativas.

5. En la periferia de los levantamientos locales y algunas veces sobre los arcos, disminuye la compactación de los granos de las formas eólicas.

Este ejemplo muestra cómo a partir de un estudio detallado de formas menores y procesos exógenos en un relieve de planicies fue posible reconocer estructuras ocultas relacionadas con yacimientos de petróleo (figura 19).

### **Niveles geomorfológicos**

Una parte de los estudios del relieve es la de los niveles altitudinales conocidos como superficies de nivelación o aplanación. Se originan por la acción erosiva o acumulativa de un proceso dominante (monogenética) o dos o más (poligenéticas), pero ocupan una posición altitudinal distinta a la que tenían cuando se formaron.

En el proceso de levantamiento la erosión transforma el relieve original, por lo que sólo se conservan fragmentos que son las superficies de nivelación y se reconocen mejor en las divisorias de aguas, las cimas y las masas en las montañas; en las planicies son de mayores dimensiones y se presentan en todos los casos en un escalonamiento: las de formación más antigua en las porciones más elevadas, las más jóvenes en las más bajas.

El estudio de estas superficies incluye su morfología, las rocas en las cuales fueron modeladas, la cobertura de sedimentos y la correlación de éstos con la fuente de origen. La morfología permite la delimitación y es un inicio para la determinación de edades relativas. La superficie se denomina denudatoria cuando descansa en ángulo sobre las rocas del sustrato y estructural cuando es concordante a las mismas. La elaboración de perfiles geológico-geomorfológicos facilita el estudio de estas formas del relieve.

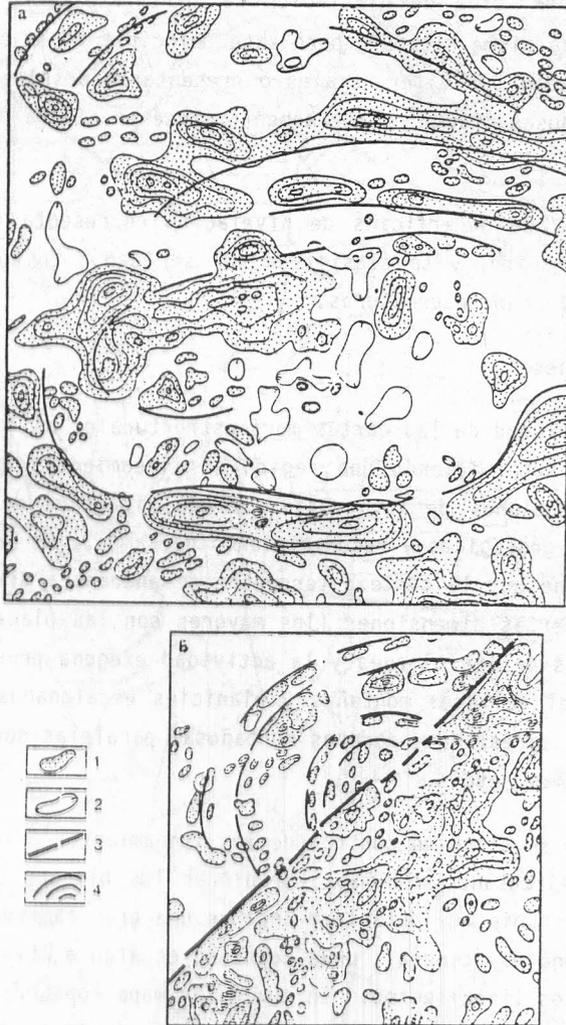


Fig. 19. Ejemplo de un análisis geomorfológico estructural de un relieve de hoyas residuales alineadas (V.I. Mijailov, en: L. Aristarjova, 1979). a: clara disposición concéntrica de residuos y hoyas de un relieve invertido en un levantamiento local; b: conjunto de formas rectilíneas y concéntricas de un relieve residual (elevaciones menores) 1, residuos de erosión; 2, depresiones (hoyas); 3, dislocaciones disyuntivas; 4, pliegues inferidos (líneas estructurales).

Las superficies de nivelación de una misma edad, teóricamente se encuentran a una misma altitud, pero este principio no se cumple porque los movimientos pueden ser diferenciales o presentarse desplazamientos por fallas y otras causas, factores que deben tomarse en cuenta durante el análisis.

Un mapa de superficies de nivelación representa éstas de acuerdo con su configuración, y se clasifican por su edad. En conjunto facilitan reconocer las grandes estructuras.

### Cartas de bloques

Una variedad de las cartas morfoestructurales es la de bloques. Esta se elabora subdividiendo una región en lineamientos que se trazan con base en observaciones de fotografías aéreas, imágenes de satélite, mapas topográficos y geológicos y reconocimiento de campo. Se basa en el principio que sostiene que la corteza terrestre se encuentra dividida en bloques de las más diversas dimensiones (los mayores son las placas litosféricas). Los movimientos de los bloques y la actividad exógena provocan determinada expresión en el relieve: montañas y planicies escalonadas, alternancia de elevaciones y depresiones, cadenas montañosas paralelas con distintos niveles altitudinales, etc.

Cuando se tiene un control de los lineamientos principales, queda a criterio del ejecutante del mapa establecer los bloques que han de representarse. Un estudio muy detallado incluye una gran cantidad de superficies delimitadas; uno muy general, unas cuantas; es algo equivalente a la representación de los lineamientos. En cualquier mapa topográfico (de preferencia en escala grande, 1: 50 000) de una región donde predomina el sustrato rocoso sobre los sedimentos no consolidados, el trazo de todos los lineamientos, hasta las grietas elementales cartografiables por su tamaño, dará como resultado una densa red irregular que no permite agregar ningún otro tipo de elementos cartográficos. En la figura 20 se señala un ejemplo.

Las cartas de bloques son de utilidad por cuanto permiten seleccionar zonas para estudios de detalle relacionados con la geotecnia, la

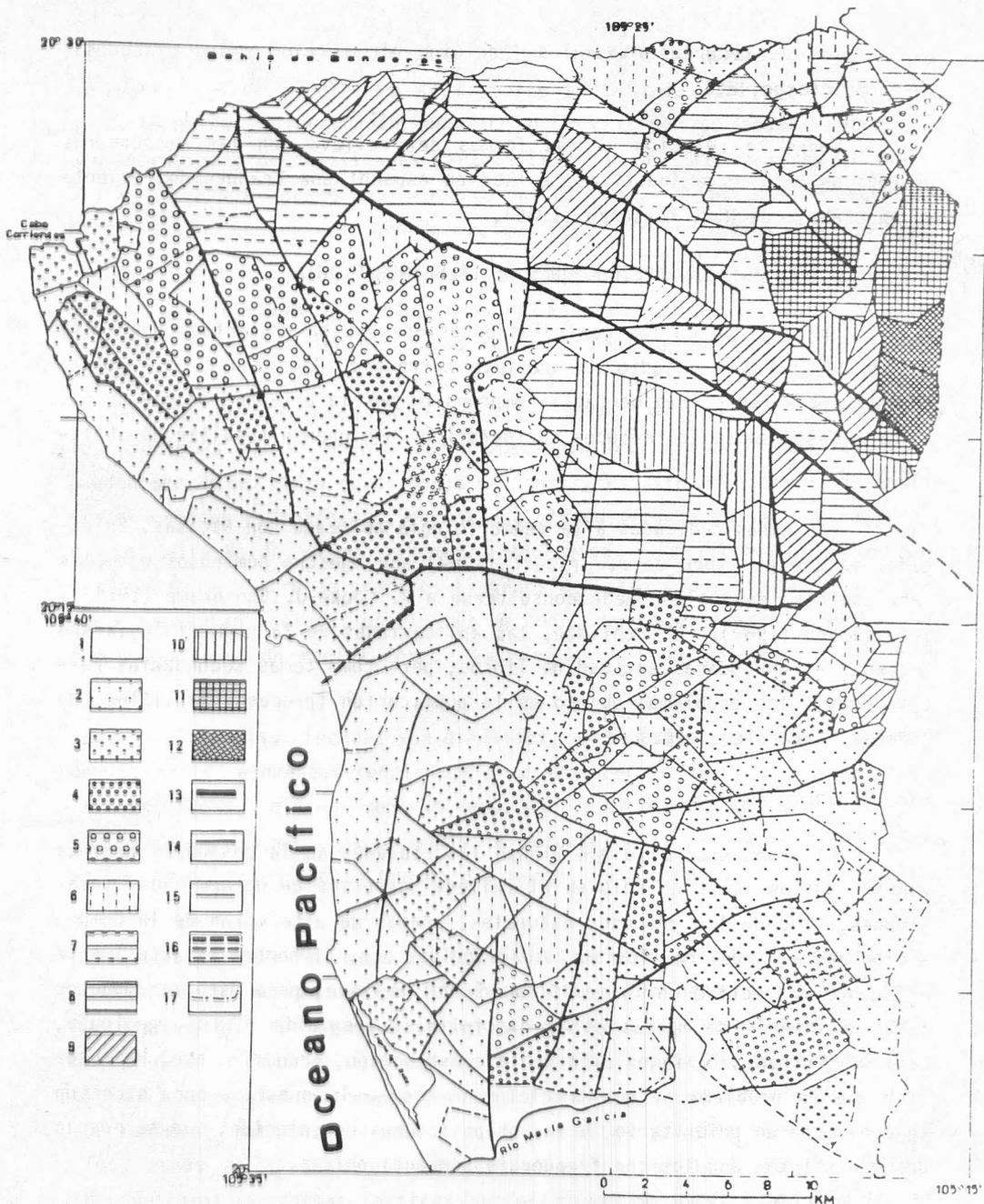


Fig. 20. Mapa de bloques de la región de Cabo Corrientes (J. Lugo y M. Ortíz, 1980b). 1. Planicies aluviales menores de 50 msnm; bloques y su máxima altitud (en m): 2, 100; 3, 200; 4, 400; 5, 500; 6, 600; 7, 700; 8, 800; 9, 900; 10, 1000; 11, 1200; 12, 1400. 13. Fracturas de primer orden; 14. De segundo orden; 15. De tercer orden; 16. Fracturas inferidas; 17. Límite de la zona estudiada.

exploración de recursos minerales (incluido el petróleo y los placeres), zonas de riesgo, etc.

Sobre la relación de las formas del relieve con las estructuras geológicas activas e inactivas, existe en español una traducción reciente de un trabajo de N.P. Kostenko (1985).

#### IX. APLICACIONES DE LA GEOMORFOLOGÍA

Una vez que en los capítulos anteriores se ha presentado una serie de métodos para el estudio del relieve terrestre, las aplicaciones de la geomorfología resultarán de fácil comprensión por la orientación que se da, en cada caso, sobre los métodos cartográficos que pueden resultar de utilidad.

Las obras dedicadas a la geomorfología aplicada son escasas. En español existe un libro de J. Tricart (1969) que muestra numerosos ejemplos interesantes; en inglés puede consultarse a R. Cooke-J. Doornkamp (1974) y Veerstappen (1983). En realidad, las aplicaciones de la geomorfología son tratadas en una buena cantidad de libros, pero como temas secundarios restringidos a los problemas objeto de la publicación (procesos fluviales, de laderas, litorales, etc.).

##### Asentamientos humanos

El gran desarrollo que tienen las ciudades en la posguerra provoca cambios sustanciales no sólo en el relieve terrestre de determinadas localidades, sino de los procesos naturales, además de alteración de la composición de la atmósfera, los suelos agrícolas, etc. El hombre es actualmente el agente más activo en la modificación del relieve; pero este fenómeno es tema de interés de muchas otras disciplinas: geografía física, geología, ecología, urbanismo, ingeniería de la construcción, economía, etc. Ha sucedido que un problema al que tradicionalmente se le prestaba poca atención se convierte en prioritario, y las proposiciones de solución, que se buscan desde distintos ángulos, con frecuencia son antagónicas.

El problema de la modificación de uso de las zonas geomorfológicas. Los cambios desfavorables y de riesgo de diversos tipos de erosión y otros de tipo geomorfológico.

Es recomendable recomendar con una cartografía de ejemplo. Esto de los ríos, y los que de densidad de drenaje. Los problemas que se pueden ser de utilidad para el estudio de cuencas hidrográficas. Se ca una alteración geomorfológica y otros que representan riesgos de barrancos, erosión y riesgos.

Ya que las alteraciones de los mapas, especialmente de los barrancos, lomas, y otros. Podemos llamar a esto en la mayor concepción mexicana.

"Los mapas de una zona ocupada por el núcleo urbano que tiene y por la geografía debe incidir en los aspectos cartográficos) tales como las corrientes, márgenes de los ríos, zonas de asentamientos (históricos); de riesgos, etc."

exploración de recursos minerales (incluido el petróleo y los placeres), zonas de riesgo, etc.

Sobre la relación de las formas del relieve con las estructuras geológicas activas e inactivas, existe en español una traducción reciente de un trabajo de N.P. Kostenko (1985).

#### IX. APLICACIONES DE LA GEOMORFOLOGÍA

Una vez que en los capítulos anteriores se ha presentado una serie de métodos para el estudio del relieve terrestre, las aplicaciones de la geomorfología resultarán de fácil comprensión por la orientación que se da, en cada caso, sobre los métodos cartográficos que pueden resultar de utilidad.

Las obras dedicadas a la geomorfología aplicada son escasas. En español existe un libro de J. Tricart (1969) que muestra numerosos ejemplos interesantes; en inglés puede consultarse a R. Cooke-J. Doornkamp (1974) y Veerstappen (1983). En realidad, las aplicaciones de la geomorfología son tratadas en una buena cantidad de libros, pero como temas secundarios restringidos a los problemas objeto de la publicación (procesos fluviales, de laderas, litorales, etc.).

#### Asentamientos humanos

El gran desarrollo que tienen las ciudades en la posguerra provoca cambios sustanciales no sólo en el relieve terrestre de determinadas localidades, sino de los procesos naturales, además de alteración de la composición de la atmósfera, los suelos agrícolas, etc. El hombre es actualmente el agente más activo en la modificación del relieve; pero este fenómeno es tema de interés de muchas otras disciplinas: geografía física, geología, ecología, urbanismo, ingeniería de la construcción, economía, etc. Ha sucedido que un problema al que tradicionalmente se le prestaba poca atención se convierte en prioritario, y las proposiciones de solución, que se buscan desde distintos ángulos, con frecuencia son antagónicas.

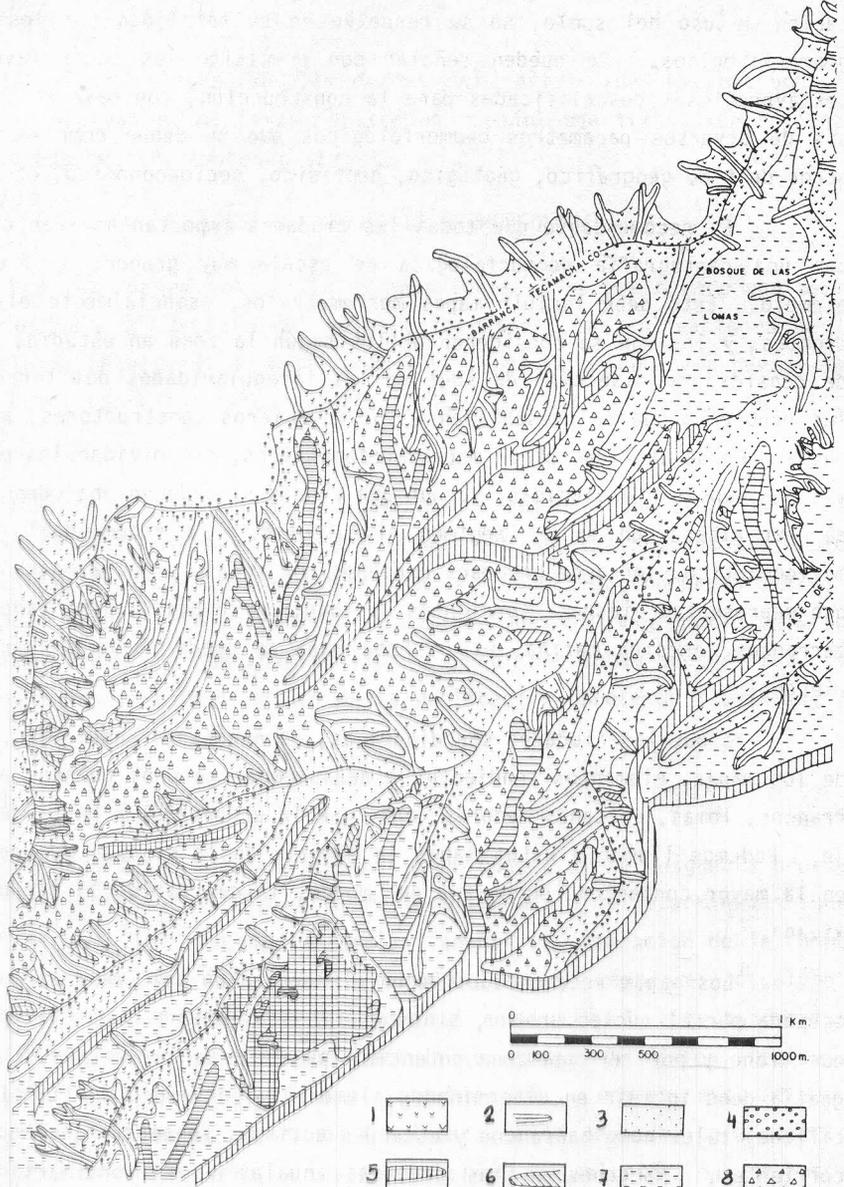
El problema de hacia dónde deben crecer las ciudades, y la planificación de uso del suelo, no se resuelve en su totalidad por los métodos geomorfológicos. Se pueden señalar con precisión las zonas favorables, desfavorables y descalificadas para la construcción, con base en el análisis de diversos parámetros geomorfológicos que se deben complementar con otros de tipo geográfico, geológico, geofísico, socioeconómico, etc.

Es recomendable que todas las ciudades importantes sean cubiertas con una cartografía geomorfológica en escala muy grande, 1: 5 000, por ejemplo. Esto debe incluir mapas morfométricos, esencialmente el de pendientes, y los que se consideren útiles según la zona en estudio. Un mapa de densidad de disección da idea de las irregularidades del terreno y de los problemas que se presentarán a los ingenieros constructores; asimismo, pueden ser de utilidad otros mapas morfométricos, sin olvidar los de análisis de cuencas hidrológicas, ya que una ciudad situada en una cuenca provoca una alteración en el régimen hidrológico. Es recomendable un mapa morfogenético y otro de procesos exógenos que señale especialmente aquellos que representan riesgos: corrientes de lodo, derrumbes, carso, cabeceras de barrancos, erosión marina, etc. Este mapa se puede convertir en otro de riesgos.

Ya que las ciudades son dinámicas, es necesario conservar, a través de los mapas, elementos tendientes a desaparecer en unos cuantos años: barrancos, lomas, volcanes menores, etc. que la urbanización borra del paisaje. Podemos llamar a estos mapas la *memoria de la ciudad*, muy maltratada en la mayor concentración humana del mundo, la capital de la República Mexicana.

<sup>11</sup> Los mapas recomendados deben elaborarse no sólo para la superficie ocupada por el núcleo urbano, sino para todo el entorno, por la influencia que tiene y por ser una zona potencial que va a ser asimilada. La cartografía debe incidir en determinados elementos (por medio de símbolos específicos) tales como barrancos y escarpes activos, zonas de desembocadura de corrientes, márgenes de las crecidas anuales y extraordinarias de los ríos, zonas de asentamiento por compactación, antiguos lagos y pantanos (históricos); de formas cárnicas subterráneas, de dunas activas e inactivas, etc.<sup>14</sup>

19  
4



99° 15'

- |    |  |    |  |    |  |    |  |
|----|--|----|--|----|--|----|--|
| 1  |  | 2  |  | 3  |  | 4  |  |
| 5  |  | 6  |  | 7  |  | 8  |  |
| 9  |  | 10 |  | 11 |  | 12 |  |
| 13 |  | 14 |  | 15 |  |    |  |

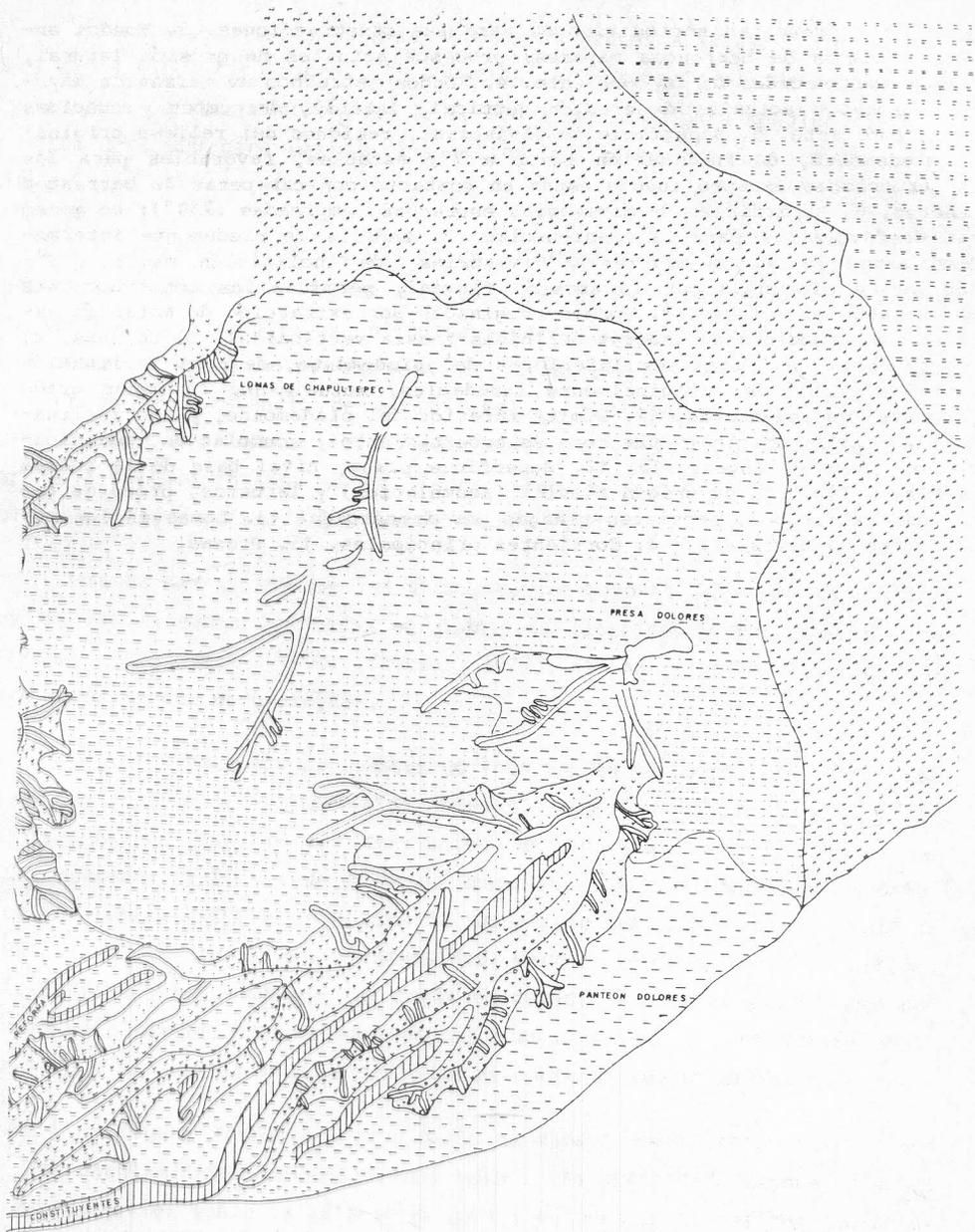


Fig. 21. Mapa geomorfológico aplicado a los asentamientos humanos (S. Hernández Adame, 1987). Leyenda resumida. 1. Laderas de barrancos mayores, profundos (50-100 m) en el piedemonte; se realizan construcciones modificando el relieve. 2. Barrancos menores (afluentes), de menos de 50 m, muy

activos; representan serios riesgos para las construcciones. 3. Fondos anchos y planos de barrancos mayores; procesos actuales de erosión lateral, derrumbes, crecidas de la corriente. 4. Fondos estrechos de barrancos mayores; procesos actuales de erosión vertical, lateral, derrumbes y crecidas de la corriente. 5. Superficie de divisorias, resíduos del relieve original de piedemonte, de inclinación menor a  $7^\circ$ ; estables, favorables para las construcciones excepto cuando están en contacto con cabeceras de barrancos menores, 6. Superficies de divisorias estrechas, empinadas ( $>10^\circ$ ); en general desfavorables para la construcción. 7. Laderas de piedemonte intermedias entre barrancos mayores y divisorias, de inclinación menor a  $8^\circ$ ; débilmente afectadas por la erosión fluvial; permiten las construcciones modificando el relieve. 9. Formas originadas por extracción de material para la construcción: a) Laderas empinadas (hasta verticales), b) Colinas, c) Depresiones. 10. Porciones inferiores del piedemonte, de poca inclinación ( $1.5-3^\circ$ ), estables; originalmente inundables, actualmente en menor grado por obras de ingeniería. 11. Límite inferior del piedemonte, plano inclinado ( $0.5-1.5^\circ$ ); originalmente zona de escurrimiento y acumulación, modificada por obras de ingeniería; 12. Superficie plana, nivel base de la cuenca de México ( $<0.5^\circ$ ), de origen fluvial (acumulación) y lacustre, procesos totalmente alterados, persisten riesgos por inundación. 13. Lomas en las superficies de divisoria. 14. Corrientes principales. 15. Presas.

Verstappen (1983) recomienda las siguientes escalas de cartografía para casos específicos: de 1: 25 000 a 1: 10 000 para localizar zonas favorables para la construcción; de 1: 10 000 a 1: 5 000 para señalar riesgos, y hasta 1: 1 000 para definir los sitios más adecuados para la construcción.

La existencia de riesgos no es un impedimento para la presencia de asentamientos humanos. Muchas grandes ciudades del mundo están amenazadas por terremotos y erupciones volcánicas; varios asentamientos han desaparecido desde tiempos remotos (Pompeya, Cuicuilco). El problema es tener conciencia de la existencia de estos riesgos. El hombre puede cambiar el curso de un río y desecar lagos, pero hasta la fecha no ha intentado alterar la actividad interna de la Tierra: siempre ha convivido con sismos y volcanes activos y tendrá que seguir siendo así.

Se ha demostrado que los sismos causan mayores daños en las porciones de las ciudades asentadas en planicies lacustres y aluviales que en terrenos rocosos más sólidos (Tricart, 1973). Es una relación entre un proceso endógeno con otro exógeno.

Riesgos como las corrientes de lodo pueden ser o no impedimento para el desarrollo de asentamientos humanos. Hay grandes ciudades que frecuentemente son dañadas por corrientes de lodo que tienen su origen en altas montañas, esto sucede principalmente en el Asia Central y en Sudamérica (Argentina y Chile). No toda la superficie que cubre una corriente de lodo es afectada con la misma intensidad, pero en algunas porciones resulta catastrófico. Es común que los conos de deyección activos evolucionen por corrientes torrenciales, aunque esporádicas, incluso una en veinte años, por lo que se elimina toda posibilidad de construcción en ellos.

La figura 21 muestra un ejemplo de mapa geomorfológico relacionado con los asentamientos humanos. Aquí sólo se ha pretendido exponer algunos criterios útiles sobre la aplicación de los métodos cartográficos geomorfológicos.

La carta de pendientes es útil por cuanto las porciones de menor inclinación son las más favorables para la construcción. Una pendiente fuerte exige una alteración del relieve original. Es recomendable aplicar las categorías siguientes cuando están presentes superficies planas (valores en grados): <math>0.5-1^{\circ}</math>,  $1-1.5^{\circ}</math>,  $1.5-3^{\circ}</math>,  $3-5^{\circ}</math>,  $5-10^{\circ}</math>,  $10-15^{\circ}</math>,  $15-20^{\circ}</math>,  $20-30^{\circ}</math>,  $>30^{\circ}</math>.$$$$$$$$

El análisis geomorfológico es indispensable en la planificación del crecimiento de ciudades y de medidas preventivas en ellas, pero siempre se acompaña por otros estudios. La ciudad de México es un ejemplo excelente de problemas de urbanismo en relación con la geomorfología: formas del relieve, procesos, riesgos, alteraciones humanas, construcciones en todos los tipos de condiciones, y pendientes del terreno, etc.

### Estudios agrícolas.

Los métodos geomorfológicos tienen aplicación en cuestiones relacionadas con los suelos agrícolas: prevención de la erosión, planificación de cultivos, y afinidad con algunas formas del relieve.

Para el especialista en cuestiones edafológicas, uno de los principales mapas temáticos que le son de utilidad es el geomorfológico general y variedades de éste, además de la información climática, hidrológica, biogeográfica, etc. Un mapa geomorfológico es un aporte valioso por la relación que con los tipos de suelos y fertilidad tienen algunas formas del relieve: planicies y terrazas fluviales, superficies de origen volcánico (piroclásticas o de lava), planicies lacustres o palustres, zonas cársticas (con frecuencia se presentan los suelos terra rosa), etc.

Los mapas de procesos exógenos son también un apoyo en este tipo de estudios y su elaboración puede orientarse esencialmente a una información relacionada con los fenómenos de alteración del suelo agrícola por movimientos gravitacionales, cárcavas y barrancos, dunas activas, etc. Pueden elaborarse mapas esenciales, por ejemplo de barrancos, uno de los principales procesos de la erosión del suelo agrícola. Entre los mapas que se utilizan está el de densidad o frecuencia de barrancos por  $\text{km}^2$ . Pueden realizarse de manera semejante al de densidad de disección, o, bien, contando la cantidad de cabeceras (las porciones más activas) por unidad de

superficie. Los barrancos también pueden clasificarse por su actividad, sea apreciativa o cuantificada en m/año.

De todos los procesos exógenos los fluviales son fundamentales en una cartografía detallada aplicada a cuestiones agrícolas, donde se señalan los tipos de escurrimiento: en plano y lineal, que pueden subdividirse por su magnitud, y los talwegs clasificarse en órdenes, dimensiones, tipo de erosión que predomina (vertical, lateral, remontante). Lo mismo puede decirse de una clasificación detallada de las vertientes.

Algunos mapas morfométricos son esenciales en los estudios a que nos referimos. Uno de ellos es el de pendientes, por su relación con los cultivos adecuados, la erosión potencial a que están sometidos y los tipos de procesos exógenos que se presentan en cada categoría de pendiente.

En los Estados Unidos se aplica una clasificación de los suelos de acuerdo con la inclinación del terreno en las siguientes categorías (en grados): 0-2°, 2-4.5°, 4.5-9°, 9-17°, 17-36°, >36°.

Para evaluar la erosión potencial de los suelos, el especialista soviético M. Zaslavsky (Spiridionov, 1985) recomienda los siguientes intervalos: 1-3°, 3-5°, 5-8°, 8-10°, 10-15°, 15-20°, 20-40°, >40°.

En la URSS, V. Kravtsova y E. Nikolaevskaya (*op. cit.*) proponen los siguientes intervalos (en grados) para cartas de pendientes aplicadas a cuestiones agrícolas: hasta 1.5°, 1.5-3°, 3-6°, 6-12°, 12-20°, 20-45°, >45°. Esta última se basa en lo siguiente:

Las superficies de inclinación menor a 1.5° prácticamente no son afectadas por el escurrimiento. Entre 1.5 y 3° empieza a manifestarse un débil escurrimiento por lo que el trabajo de la tierra exige tomar medidas preventivas contra la erosión. Entre 3 y 6° la erosión fluvial puede ser intensa en las laderas expuestas al sur, por lo que se toman medidas especiales contra la erosión; la maquinaria utilizada disminuye en productividad en un 15% y el gasto de combustible aumenta hasta 10%.

De 6 a 12° se presentan suelos alterados en grado medio a fuerte por el escurrimiento. En este caso es indispensable observar cuidadosamente técnicas agrícolas para protegerlos. Las superficies de 12 a 20° son desfavorables para algunos cultivos, los especialistas deben recomendar el uso adecuado de estos terrenos. En pendientes mayores no se trabajan los suelos, su uso es para el bosque.

Estos intervalos sirven más que nada como criterios para la elaboración de cartas de pendientes con aplicación a la agricultura, las que se pueden modificar de acuerdo con las condiciones especiales; además del tipo de mapa en que se trabaje (escala e intervalo de curvas de nivel), las condiciones topográficas, climáticas, edafológicas, etc.

Los estudios de tipo regional en escalas pequeñas, sobre terrenos útiles para la agricultura, se apoyan, además de en las cartas de pendientes, en las siguientes: geomorfológica general, de procesos exógenos, densidad de disección, profundidad de erosión y longitud de laderas. Con base en esta información es posible elaborar otros mapas sintéticos.

#### **Construcción de obras de ingeniería.**

No existe proyecto de construcción de presa, vía de comunicación o puente que no tenga que ver con los conceptos geomorfológicos; simultáneamente podemos decir que no hay proceso endógeno o exógeno que no sea de interés en los trabajos preliminares de ingeniería civil. Pero, además, los estudios geomorfológicos se realizan durante la obra y posteriormente. Por esto, la aplicación de la geomorfología en la ingeniería civil es también una especialidad que Simonov (1979) y otros autores llaman ingeniería geomorfológica.

19 [ ] Las presas se proyectan en localidades que reúnen una serie de condiciones favorables: forma del valle fluvial, volumen de escurrimiento, accesibilidad, bancos de material, etc. El primer factor es morfológico: determinar una porción de un valle fluvial donde éste de preferencia sea profundo y estrecho. Esto, naturalmente, no es un problema complejo de geomorfología y es fácil de resolver con el apoyo en mapas topográficos y

fotografías aéreas. Pero a esto debe agregarse un estudio geomorfológico para definir las formas del relieve, los procesos actuales y los sedimentos cuaternarios, además de lo que se refiere a la ingeniería geológica y otros estudios complementarios. <sup>19</sup>]

20 [Un mapa geomorfológico general del sitio donde se proyecta una obra de ingeniería y una amplia zona circundante permite inferir las condiciones positivas y negativas para la construcción. Por ejemplo, el relieve cársico representa una fuerte infiltración y las oquedades del subsuelo pueden ser un riesgo en el caso de construcción de vías de comunicación. Las terrazas fluviales y los conos de deyección inactivos son formas que por sí mismas y por su consistencia favorecen la construcción de vías de comunicación.]

21 ["Las superficies de divisorias son formas estables que favorecen el trazo de vías de comunicación y construcciones, sin embargo, tienen que estudiarse también las laderas contiguas. Es común que en algunas partes se vean amenazadas estas superficies por cabeceras de barrancos o el retroceso de escarpes, fenómenos que se producen con velocidades considerables, de manera que en lapsos de unos cuantos años producen cambios sustanciales en el relieve.

22 [Los escarpes con frecuencia resultan de la construcción de una obra, como las carreteras en laderas de fuerte pendiente; según el tipo de material que constituye la ladera, la inclinación de ésta y de los estratos, del régimen hidrológico y otros factores, será la velocidad del proceso erosivo. El escarpe creado artificialmente favorece la caída de rocas y en ocasiones derrumbes. Son fenómenos inevitables, pero su conocimiento, a priori, permite evaluar costos de mantenimiento, riesgos y elegir entre dos o más porciones para el trazo más conveniente de una vía de comunicación.] <sup>Ken</sup>

En las márgenes de mares y lagos son comunes formas como las terrazas, en general superficies estables; los cantiles fósiles se sitúan en antiguas playas donde ya no tiene influencia el oleaje. La porción superior del litoral es aquella que alcanza las mareas en el transcurso de un

día y en el año. Pero hay que considerar las extraordinarias provocadas por tormentas, que pueden ocurrir una vez en 30 años.

Todas las líneas de costa son dinámicas. La erosión, la acumulación y posibles movimientos de ascenso o descenso de la tierra firme, respecto al nivel del mar, provocan un cambio constante en los litorales. El conocimiento de las velocidades promedio de levantamiento o hundimiento, por mediciones precisas repetidas en el tiempo, permite inferir transformaciones a corto y mediano plazo.

Algo semejante a lo anterior puede decirse de los ríos. El cauce de los mismos siempre se encuentra en transformación: desciende en altitud o se ensancha hacia uno o los dos lados. Son más notables los cambios en los grandes ríos de planicies con meandros. En el caso de desvío de aguas en canales, un desplazamiento lateral de la corriente puede hacer inútil una obra.

La construcción de puentes siempre tiene una relación estrecha con la geomorfología: laderas en que se apoyan y los procesos fluviales tales como turbiedad, magnitud de la erosión y de la acumulación, y otros factores.

Un mapa como el geomorfológico general tiene un buen complemento con otros morfométricos: altimétrico, densidad de disección, profundidad de erosión, pendientes y los que se consideren necesarios según el problema que se ha de resolver. Un mapa de densidad de disección informa indirectamente sobre cambios cualitativos del escurrimiento y de la infiltración. La carta de pendientes es fundamental por cuanto una obra de ingeniería aprovecha la inclinación original del terreno o la modifica, lo que tiene relación con los costos y problemas técnicos.

En la secuencia de elaboración de mapas geomorfológicos, uno de los más importantes es el de procesos, ya que señala los riesgos potenciales actuales y del futuro inmediato: tipos de movimientos de masas, crecidas de los ríos, carso; acción eólica, glaciárica, marina; desarrollo de barrancos, etc. Además pueden agregarse, o señalarse en otro mapa, procesos

exógenos potenciales: actividad volcánica, sísmica, fallas activas. De todo esto puede surgir un mapa de riesgos que, a diferencia de los anteriores, proporciona una información mucho más precisa que señala los tipos de amenazas naturales a futuro y el alcance longitudinal de los mismos.

A lo largo de un valle fluvial en el que se pretende construir una presa, si además de los factores comunes se considera la intensidad de los procesos de la erosión y acumulación fluvial, se puede tener un mejor punto de apoyo; ambos factores se relacionan con el azolve, esto es, con la duración de la obra.

Un último mapa recomendable es el de sedimentos cuaternarios: tipos y espesores, cuando haya posibilidad de obtener esta información, que requiere de estudios especiales y más costosos que las observaciones que se realizan en mapas topográficos y fotografías aéreas.

De acuerdo con el tipo de obra en construcción, el relieve de la zona y otros factores, se determina el tipo de mapas que se elaborarán (figura 22). En determinados casos pueden ser necesarios algunos especiales de barrancos, del relieve eólico, cársico o volcánico, etc. La geomorfología no es la única disciplina que interviene en este tipo de estudios, pero sí la primera (muchas veces acompañada de otras físico-geográficas como climatología, hidrología, etc.) porque la investigación se inicia con las características superficiales. La geología es naturalmente indispensable y se complementa con la geomorfología en el estudio de las rocas (tipos, grados de alteración), de las estructuras geológicas, la neotectónica, etc.

Si bien los estudios geomorfológicos más importantes son los preliminares a la construcción, se recomienda su continuidad durante la obra y posteriormente a su terminación. Es conveniente estudiar las modificaciones que se producen en el relieve y la influencia que esto tiene en el entorno. Una presa significa la brusca transformación de un valle profundo y estrecho, tipo cañón, en un gran acuífero que, con el tiempo, al azolverse se convierte en una ancha planicie aluvial. El proceso de erosión vertical se transforma, de esta manera, en acumulación que se incrementa cauce arriba de la obra. Esto tiene un interés no sólo científico, por el conocimiento



Fig. 22. Fragmento de un mapa geomorfológico de un valle fluvial, aplicado a la construcción de una hidroenergética (N. Riabkov y N. Siagaev, 1975). 1. Llanura de inundación; 2. I terraza; 3. III terraza; 4. IV terraza; 5. V terraza; 6. Ladera del valle; 7. Escarpes de erosión; 8. Hoyas de deflación; 9. Depresiones de lago abandonado; 10. Montículos y dunas eólicas; 11. Barrancos activos; 12. Isolíneas del techo del sustrato rocoso; 13. Porciones de levantamientos modernos reconocidos por datos geológico-geomorfológicos; 14. Cauces sepultados; 15. Isolíneas de la superficie de laderas; 16. Líneas de diques y pozos; 17. Línea de variante óptima para la construcción de la cortina; 18. Cauce del río y dirección de éste.

de estos procesos, sino, también, resulta una información de utilidad aplicable en estudios futuros.

Las modificaciones al relieve por obras de ingeniería y los procesos actuantes es algo que puede tener consecuencias negativas; en algunos casos son pérdidas económicas que se superan por los beneficios obtenidos de la construcción; en otros pueden ser superiores a la inversión. Son problemas en cuya solución deben intervenir varios especialistas, entre ellos los ecólogos, por el daño que puede causar una construcción, como una presa, para la fauna habituada a un ambiente determinado. No se trata de evitar las construcciones por problemas ecológicos, sino reducir al máximo el daño a la naturaleza cuando se toman las precauciones debidas.

En un territorio como el mexicano difícilmente puede hablarse de grandes obras de ingeniería que no se construyan en condiciones desfavorables; presas en zonas cársicas y de actividad sísmica y volcánica, vías de comunicación en laderas de fuerte pendiente (incluso más de 20°), con riesgos de derrumbes, corrimientos de tierra y otros más. Esto no significa que los riesgos impidan una construcción, esto sólo sucede en casos extremos; en general, la tecnología moderna aplica los métodos adecuados para superar las dificultades, y considera también el costo inversión-mantenimiento, criterio que permite evaluar las ventajas y desventajas de una obra.

En ocasiones, una construcción puede convertirse en un verdadero riesgo al acumular energía que, de no tener un buen control, puede causar verdaderas catástrofes. Es el caso de las presas en valles montañosos cercanos a una población aguas abajo, generalmente en un piedemonte. Ha ocurrido su ruptura por un relleno extraordinario, por derrumbes sobre el vaso, fallas geológicas, corrimientos de tierras, por combinación de diversos factores, etc., sepultando poblaciones laderas abajo, provocando cientos e, incluso, miles de muertos.

La secuencia general de trabajo en la determinación de localidades para la construcción de obras de ingeniería es la que normalmente se emplea en los estudios geomorfológicos aplicados que se mencionó en el caso de los

yacimientos de placer: iniciar con una escala cartográfica pequeña y culminar con escalas muy grandes:

- a) Cartas geomorfológicas y de regionalización, en escala 1: 500 000, se utilizan en la planificación inicial.
- b) En una escala 1: 200 000 a 1: 100 000 se elabora la geomorfología de las zonas donde se proyecta una obra determinada.
- c) Cartas geomorfológicas más detalladas, en escala 1: 50 000 a 1: 25 000 se elaboran para la localidad específica de desarrollo del proyecto.
- d) En escala muy grande, 1: 10 000 y mayor, se realizan cartas para señalar problemas específicos en la localidad de la construcción o porciones de la misma.

Lo anterior permite tener una visión regional de un gran territorio: estructuras geomorfológicas y zonificación de procesos endógenos y exógenos; formas del relieve; procesos actuales y riesgos.

#### **Yacimientos de placer.**

Este tema ha sido ampliamente estudiado por geomorfólogos soviéticos. Originalmente fue Y. Bilibin (1938) y posteriormente varios autores. En español puede consultarse el capítulo 13 de la obra de V. Smirnov (1982)

La geomorfología de yacimientos de placer es actualmente una verdadera especialización, por lo que en estas páginas sólo se considera en forma general y con énfasis en los métodos cartográficos y de campo esenciales en una investigación de este género.

Los placeres se forman por el intemperismo de rocas con contenido de minerales valiosos. El transporte por cualquier agente se acompaña de una destrucción diferencial, de manera que se conservan los minerales más resistentes y de mayor densidad. La acumulación temporal o permanente de detritos con contenido de minerales valiosos, o éstos en aspecto puro, son

Los placeres o yacimientos de placer. Los más conocidos son de: oro, diamante, casiterita, ilmenita, rutilo, leicoxeno, platino, cinabrio, circón, corundo, granate, topacio, tantalio, wolframio, tierras raras (monacita, xenotimo), cristal de roca, ámbar, ópalo y calcedonia.

V. Trofimov (Voskresenski, 1985) clasifica los placeres en actuales, antiguos y fósiles. Estos últimos han sido transformados considerablemente por los procesos diagenéticos o por el metamorfismo precenozoico. Los antiguos se presentan en rocas no consolidadas cuya formación ya terminó. Los actuales son holocénicos o del pleistoceno tardío. En muchos casos se originan por la erosión de placeres formados en el plioceno y en el cuaternario temprano-tardío.

1) [Por su origen, de acuerdo con el tipo de acumulación que los produjo, los placeres pueden ser eluviales, diluviales, aluviales, proluviales, marinos, glaciáricos, fluvio-glaciáricos y eólicos. Los principales son los aluviales (se calcula que representan el 90%); entre los restantes se encuentran concentraciones valiosas en depósitos marinos (de litoral y plataforma continental) y eólicos.]

2) [Los placeres aluviales se subdividen de acuerdo con las formas del relieve donde se localizan: banco, cauce, llanura de inundación, terraza y delta.]

3) [De acuerdo con la forma de los criaderos se reconocen los tipos siguientes: manto, estratos, lentes, listones, cordones y nidos. Las dimensiones longitudinales de los placeres en valles fluviales varía de unos cuantos metros hasta 15 km en casos excepcionales.]

Los tipos de placeres más explotados son los de oro, ampliamente dispuestos en el mundo, y los diamantes, concentrados en regiones determinadas. En seguida se exponen los métodos de investigación dirigidos especialmente a placeres aluviales auríferos, por ser los más representativos.

4) [El proceso de formación de los placeres aluviales puede ser comprendido cuando se conocen los principios de la geomorfología fluvial: dinámica de erosión y acumulación, evolución de formas del relieve, etc. Los

ríos no sólo crean los placeres, sino que los transforman, destruyen o sepultan. Es fundamental reconstruir la historia de los valles fluviales con posibilidades de explotación, y de toda la región circundante.

Las porciones de los valles fluviales donde se produce la acumulación de detritos son las más favorables para ser exploradas. Esto se basa en los conceptos elementales de la geomorfología fluvial. Sin embargo, los problemas pueden ser mucho más complejos que la localización de las llanuras de inundación ensanchadas o el desarrollo de bancos en el cauce. Es muy común que los placeres se busquen en antiguos valles que fueron sepultados o abandonados por la corriente, en las terrazas, o en otras condiciones que actualmente no tienen una dinámica fluvial.

La clasificación de las corrientes fluviales en órdenes (V. Morfometría) es un auxiliar en la investigación por dos razones: a) Permite una mejor comprensión de la evolución de la red fluvial -con el orden aumenta la cantidad de agua- y orienta la investigación. En general, las corrientes de primero y segundo orden pocas veces presentan placeres explotables; b) El estudio de distintas cuencas fluviales con presencia de placeres permite establecer valores estadísticos sobre la relación que tienen con el orden de corriente y con otros parámetros asociados tales como altitud, anchura del valle, profundidad de erosión, etc. De esta manera se obtiene información que contribuye a apoyar otras investigaciones.

Las zonas de acumulación en los valles con potencial mineral serían las más favorables para la exploración. Pero hay que considerar que los regímenes climático y tectónico no son constantes, por lo que los estudios deben tomar en cuenta estos factores.

El método general de búsqueda de placeres recomienda iniciar con un gran territorio para el cual se elabora una cartografía de orientación neotectónica y morfoestructural; en ésta se pueden establecer las zonas más favorables para la exploración, mismas que se estudian en escala grande (1: 50 000). Se representan los rasgos principales del relieve: valles fluviales y sus elementos, sedimentos no consolidados (clasificados por su génesis y edad), bloques tectónicos. Este tipo de investigación pretende

establecer los regímenes neotectónicos y la historia de la formación del relieve; permite definir con mayor precisión las zonas con mayor potencial de placeres y pasar a estudiarse en una escala más grande: 1: 10 000. En ésta se detalla la estructura del valle y sus sedimentos no consolidados; además de las formas visibles del relieve, se muestran los contornos de las sepultadas, tanto comprobadas como inferidas.

Contando con buena información sobre lo anterior, se pueden elaborar cartas esquemáticas que expresan cantidad y grado de pulimento de detritos de cuarzo en el aluvión aurífero, composición mineralógica, etc.

Además, en cartas geomorfológicas especiales se señalan los yacimientos originales conocidos, indicando el tipo y las zonas de placeres establecidas e inferidas. En el mapa se indica si son explotables o no, indicando proporción de oro (g/t); asimismo se señalan las zonas del valle recomendables para explorar con mayor detalle. Esta información, por su utilidad, se señala en todas las cartas elaboradas, incluyendo las de escala pequeña.

En escalas 1: 1000 y 1: 2000 se elaboran mapas del lecho aluvial con placeres, con datos sobre estructura geológica, espesor y tipo de la carpa aurífera-aluvial, contenido de oro y otros elementos que se consideran convenientes.

En todas las etapas la cartografía se acompaña del análisis de perfiles longitudinales y transversales al valle.

Para los valles con un conjunto completo de terrazas son necesarios los perfiles longitudinales que expresan el nivel de las terrazas, indicando edad y grado de conservación de su aluvión. Cuando los placeres tienen un amplio desarrollo en los afluentes en su unión con el valle principal, es conveniente elaborar perfiles longitudinales, para unos y otros, en escalas de 1: 20 000 - 1: 10 000, en los que se indican los valles que poseen o no placeres.

Los perfiles transversales se elaboran en tres escalas: uno a 25 mil, a través de todo el valle (hasta la divisoria), para señalar la localización de los depósitos explotables. En escala uno a 5 mil se elaboran perfiles que expresan la litología (espesores, facies, edades) en la zona de placeres. Se indican, también, valores de contenido aurífero.

Con más detalle se representan las capas auríferas en escalas uno a mil y uno a dos mil, con exageración vertical de 10. En éstos se marcan con detalle datos sobre litología del aluvión y estructura litológica. Se representa pulimento, tamaño de detritos, presencia de cuarzo, etc. El perfil expresa la relación entre composición granulométrica del aluvión, estructura del lecho rocoso y localización del oro.

Se trata de investigaciones esencialmente geomorfológicas que comprenden el relieve y sedimentos no consolidados. Los resultados son útiles por cuanto facilitan las exploraciones en otras zonas.

La exploración de yacimientos de placer incluye la localización de la fuente de origen, seguir el camino recorrido por los detritos y establecer las localidades favorables para su acumulación. Esto exige analizar la red fluvial actual y antigua y la formación de los sedimentos correlativos; el estudio del régimen de movimientos tectónicos en relación con la acumulación y transporte de sedimentos no consolidados, el estudio del régimen tectónico, de los climas del pasado, etc.

Los placeres pueden localizarse en el cauce, llanura aluvial y terrazas; en el cauce en diversas formas de acumulación del mismo, como islotes, bancos, etc., tanto formas actuales como antiguas sepultadas. La figura 23 muestra un mapa geomorfológico sobre este problema.

#### Yacimientos minerales.

Una de las orientaciones y aplicaciones más modernas de la geomorfología es en los yacimientos minerales in situ. Varios autores soviéticos se han ocupado de este problema y actualmente existe una abundante bibliografía; nos limitamos a mencionar algunos (varios artículos en un mismo

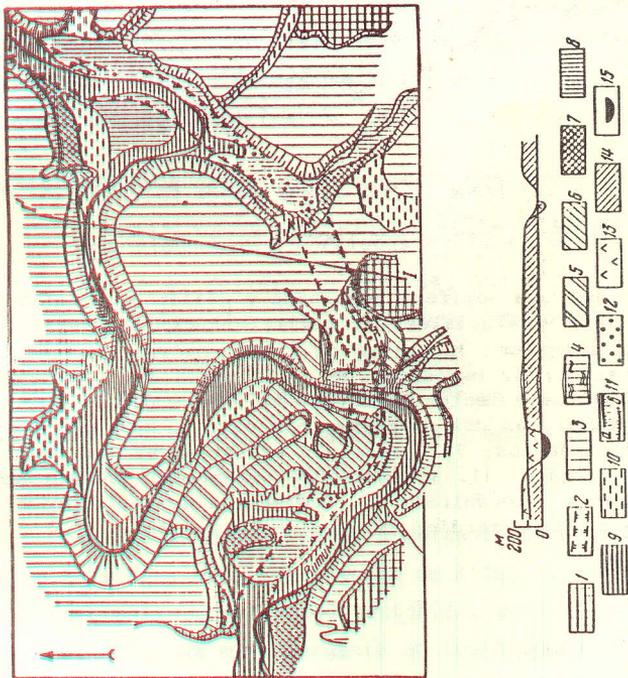


Fig. 23a. Mapa geomorfológico aplicado a la exploración de yacimientos de placer (S.G. Mirchink, complementado por Y.P. Kazakevich, 1972). 1. Terraza de 105 m de altura; 2. Cauce sepultado; 3. VII terraza de 75-80 m de altura; 4. VI terraza de 50-60 m de altura; 5. V terraza de 45 m de altura; 6. IV terraza de 30 m de altura; 7. III terraza de 12-15 m de altura; 8. II terraza de 6-7 m de altura; 9. Llanura de inundación; 10. Laderas niveladas con cubierta deluvial significativa; 11. Laderas: a) peñasco, b) aluvión; 12. Placeres auríferos sepultados por sedimentos cuaternarios de terrazas diversas; 13. Sedimentos no consolidados; 14. Lecho rocoso; 15. Capa aurífera.

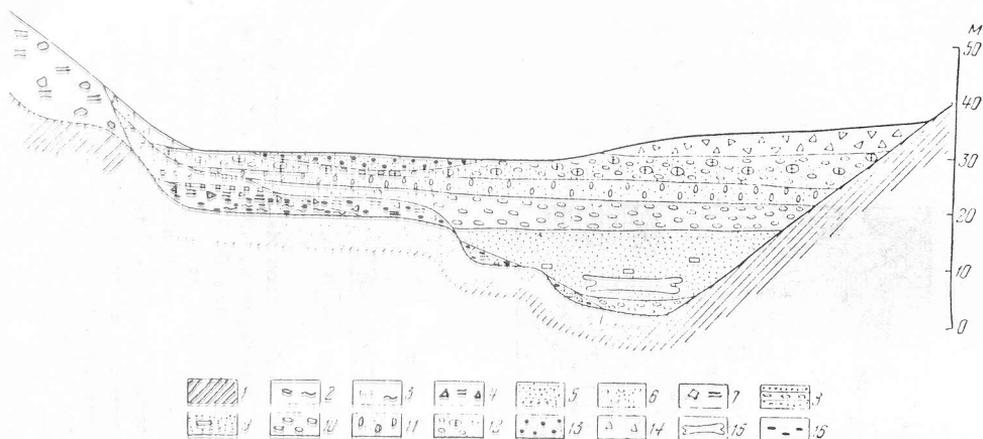


Fig. 23b. Perfil de una terraza aurífera sepultada y placeres de cauce bajo depósitos de soliflucción y aluviales. 1. Lecho rocoso; 2. Guijarros y arcillas del cuaternario inferior; 3. Gravas de talud con relleno arcilloso, del cuaternario inferior; 4. Depósitos de soliflucción del cuaternario inferior con gravas, guijarros y lentes de turba; 5. Arenas del cuaternario inferior; 6. Guijarros con arenas del cuaternario medio; 7. Morrena. 8. Capas delgadas de arena y guijarros; 9. Arenas sin estratificar con gravas y detritos; 10. Guijarros grandes; 11. Horizonte de guijarros; 12. Guijarros y cantos grandes; 13. Arenas holocénicas; 14. Sedimentos de soliflucción actuales; 15. Huesos de mamut tipo tardío; 16. Horizonte aurífero.

libro, 1973): Simonov, Lukashov, Lijacheva, Koncheva, Anañev y otros. Un denominador común de los métodos geomorfológicos que se aplican en la búsqueda de yacimientos minerales es que se realizan esencialmente en gabinete, con el fin de determinar, a partir de muy diversos parámetros, las zonas más recomendables para realizar estudios de detalle. El trabajo de campo, aunque no excluye a la geomorfología, es esencialmente geológico, geofísico y geoquímico.

Los métodos geomorfológicos de exploración se aplican en grandes territorios con perspectivas de yacimientos minerales. De acuerdo con las investigaciones realizadas por diversos autores se han desarrollado los siguientes métodos principales.

#### **Análisis de bloques.**

Los bloques son porciones de la corteza terrestre delimitados por fallas que en el relieve se expresan con frecuencia a través de distintos elementos: valles fluviales, escarpes, escalones, límites rectilíneos (pie) de elevaciones montañosas y otros más, como tipos determinados de la red fluvial. Un mapa de bloques puede ser un buen apoyo en los trabajos preliminares de exploración y también en zonas mineralizadas donde se busca la extensión de las vetas conocidas.

De lo anterior resulta importante conocer las fracturas mineralizadas y su extensión en el sistema de bloques. La mineralización se produce en condiciones de actividad tectónica, por lo que son comunes dos fenómenos: uno, ésta es más frecuente en los bloques superiores que en los inferiores, y dos, las zonas mineralizadas se caracterizan por un incremento de fracturas con respecto a las zonas vecinas. Los criterios geomorfológicos que se aplican en estos casos son indirectos, o sea, elementos del relieve asociados a las fracturas y los bloques.

Las configuraciones de la red fluvial permiten inferir los sistemas principales de fractura, lo cual se puede apoyar en otros tipos de análisis: la carta de órdenes de corrientes (las de mayor orden con frecuencia corresponden a fracturas), la de densidad de disección, que puede asociarse

con otra de grietas; la carta hipsométrica es fundamental en la interpretación de los bloques, etc.

Es conveniente realizar el análisis de bloques en escalas de uno a cincuenta mil a uno a cien mil, representando las fallas y fracturas principales. Con el apoyo de las cartas topográficas se determinan las alturas absolutas, así como de la profundidad de los cortes erosivos.

El trabajo de campo se orienta fundamentalmente a reconocer las formas disyuntivas interpretadas en gabinete, observando las grietas y fallas directamente en el terreno, o por elementos indirectos, cuando las condiciones topográficas y la cobertura suelo-vegetación no favorecen su reconocimiento.

#### **Análisis de estructuras dómicas.**

La expresión en el relieve de este tipo de estructuras puede ser directa o indirecta. Es fundamental aplicar los conceptos geomorfológicos, como la configuración de la red fluvial (anular y radial), aunque esto exige muchas veces un análisis detallado de las corrientes y profundidad de los valles, así como estudios de sus perfiles longitudinales y transversales; otros elementos que facilitan el reconocimiento de las estructuras circulares (domos o calderas antiguas) son las divisorias, escarpes, valles antecedentes, formas alineadas como montículos, etc. Una carta geomorfológica general puede ser un buen auxiliar en estas exploraciones, incluso, en muchos casos proporcionan una información más variada que una carta geológica, por ejemplo, cuando se trata de homogeneidad en las rocas, por su composición y edad, en un relieve complejo de valles, mesas, montañas, etc.

El estudio de estructuras tipo domo y caldera se realiza por medio del análisis de cartas topográficas en escala 1: 500 000 a 1: 50 000, dependiendo de las características de la región y de los problemas que haya que resolver. Se apoyan en el estudio de fotografías aéreas en escalas grandes, uno a cincuenta mil y uno a veinticinco mil, además, en muchos casos, en las imágenes de satélite.

Un índice de actividad en una estructura dómica puede ser el incremento de la profundidad del corte por erosión. En estos casos el perfil del valle es generalmente asimétrico, en forma de "V" o trapezoidal. Otro rasgo geomorfológico característico es la presencia de terrazas en los valles.

Los perfiles longitudinales hacen resaltar las rupturas de pendiente, mismas que se deben analizar en función de su origen: tectónico, exógeno, litológico o por formas del mesorrelieve. Visto el valle en planta se pueden reconocer en él cambios bruscos en la orientación. En el caso de una estructura dómica, uniendo las sinuosidades del río se obtiene una línea circular u ovalada.

Algunos rasgos índices de estructuras activas ocultas son los siguientes: meandros fijos, ramificaciones en porciones del valle, migración de corrientes desde el centro de la estructura hacia el exterior, desecación de corrientes, disección de conos de deyección y otras.

En otra etapa del estudio de las estructuras dómicas se procede a delimitar los bloques principales y a analizar el sistema de fracturas.

Otro procedimiento en el análisis es observar los sistemas de escalones de la estructura, así como la deformación de ellos. Estos escalones (superficies de nivelación) formados durante la orogenia por las velocidades alternas de los procesos de levantamiento y erosión, son un elemento clave en la reconstrucción de la historia de desarrollo de los conjuntos montañosos. Un levantamiento rápido da lugar a escalones reducidos y deformados; un levantamiento lento favorece su conservación en la porción central de la estructura, de acuerdo con Kostenko (1985).

#### Análisis de fracturas.

El análisis de la tectónica disyuntiva es de importancia por la relación que guardan las zonas de incremento de fractura con los yacimientos hidrotermales en condiciones geológicas favorables. Asimismo, en la mayoría de los casos la red fluvial está controlada por los sistemas de fractura,

tanto primarios como secundarios. Es común que los grandes ríos sigan zonas de fractura profundas, aunque es frecuente que la erosión domine a aquellas que se apoyan (aproximadamente transversalmente) en las principales. Es así como el análisis de las formas disyuntivas permite una aproximación a la localización de yacimientos hidrotermales, o, bien, el estudio de la red fluvial y lineamientos tectónicos.

Los lineamientos regionales son zonas favorables para ser estudiadas, en especial donde se producen intersecciones. Es bien conocido que la zona de sutura entre un orógeno y el cratón contiguo con frecuencia se relaciona con yacimientos minerales.

Yacimientos hidrotermales se asocian a grandes fallas, cabalgaduras y fracturas menores. Hay fallas sin expresión directa en el relieve, pero que se han inferido y muchas veces comprobado, por alineaciones de yacimientos hidrotermales. Asimismo, el incremento de fractura en la superficie es en muchos casos reflejo de fallas del basamento. Es más frecuente el caso en que los yacimientos se localizan no en la falla principal, sino en las fracturas secundarias asociadas.

Las formas disyuntivas pueden tener una expresión débil en el relieve, lo que puede ser provocado por: 1) fractura de desarrollo escaso; 2) poca permeabilidad de las rocas; 3) relleno de las fisuras por soluciones hidrotermales tales como cuarzo. Así, cuando las rocas son homogéneas en su constitución y la influencia de los dos primeros factores es débil, se debe dar una atención especial a las grietas rellenas de cuarzo. En este caso las rocas se vuelven más resistentes a la denudación, originando un relieve débilmente disecado. Por cuanto a las vetas de cuarzo, con frecuencia tienen relación con mineralizaciones auríferas.

Este análisis permite, a través de las anomalías geomorfológicas de la disección, orientar la búsqueda de oro, lo que puede ser un apoyo en la exploración de placeres.

El análisis de la red fluvial y las grietas de las rocas se realiza como se explicó en el capítulo Morfometría. Esto se hace con el fin de

establecer anomalías positivas y negativas; complementando el estudio con otros elementos, geológicos, climáticos, fisiográficos, etc. se pueden recomendar, a partir de algunas anomalías, las zonas más favorables para la exploración de yacimientos minerales hidrotermales (figura 24).

Las escalas para la representación cartográfica que más se recomiendan para este tipo de estudios son uno a cincuenta mil y uno a cien mil.

#### **Yacimientos asociados a formas volcánicas.**

Las chimeneas de los volcanes antiguos presentan en ocasiones yacimientos minerales en las zonas de brechas volcánicas. También se forman filones y vetas en las grietas. Estos yacimientos pueden ser: hierro, mercurio, estaño, fluorita y otros.

Las calderas pueden presentar mineralización en la superficie de la zona desplomada y en las zonas de fractura asociadas a la misma. Se han reconocido, entre los minerales valiosos, oro, platino, cobre y otros.

Las calderas antiguas se reconocen inicialmente por el estudio geomorfológico. Son las configuraciones anulares de la red fluvial, de crestas semicirculares, alineación de montículos y otros criterios las que permiten recomendar zonas para estudios de mayor detalle.

Todos los criterios geomorfológicos expuestos son de mucha importancia en México. Muchos yacimientos antiguos corresponden a casos como los que se han mencionado: bloques tectónicos, incremento de fractura, lineamientos, calderas. Por esto, los criterios de exploración mencionados son válidos para estudios preliminares, sobre todo en regiones todavía poco conocidas y potencialmente ricas, como la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur.

Este tema exige el complemento de la geología de yacimientos minerales.

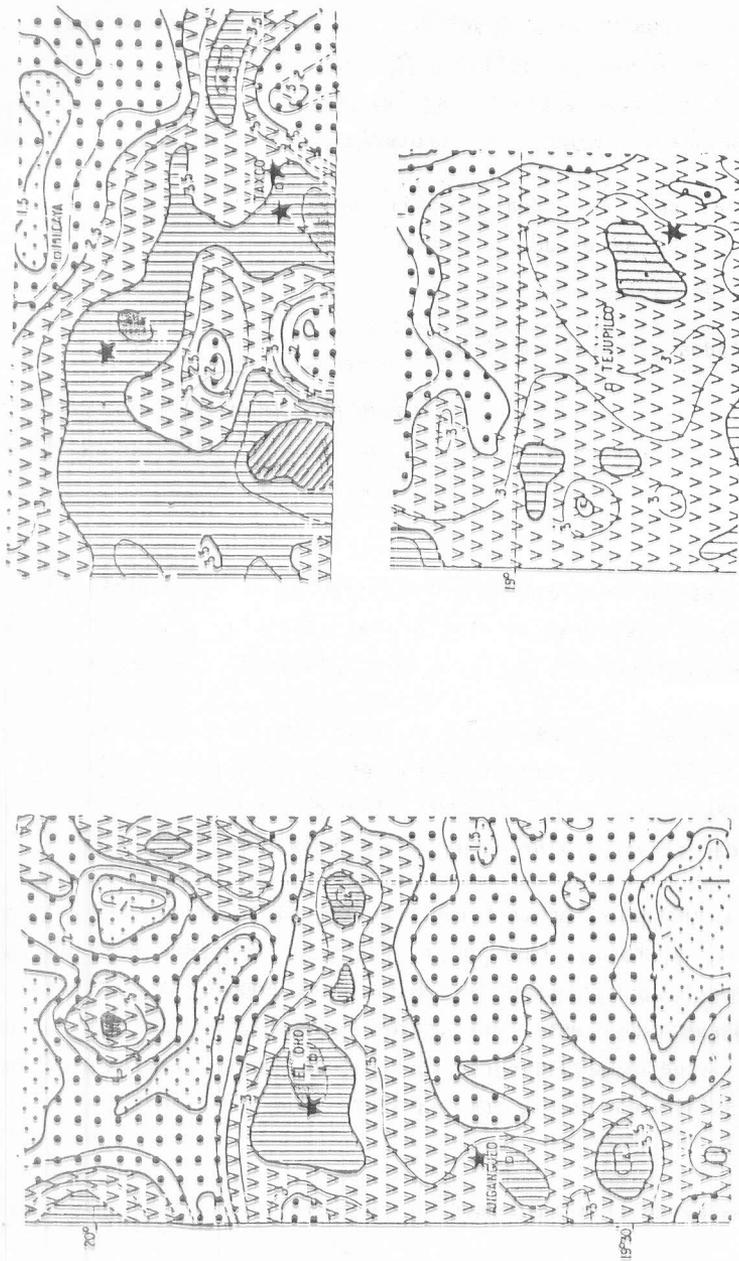


Fig. 24. Relación de yacimientos minerales con anomalías positivas (sombreado) de densidad de la di-  
 sección del relieve en algunas localidades de la República Mexicana (Lugo, 1991). Las isolíneas re-  
 presentan valores de densidad de talwegs en  $\text{km}/\text{km}^2$ , las estrellas señalan los yacimientos minerales  
 principales.

## Estructuras petrolíferas.

Los métodos geomorfológicos en la búsqueda de petróleo y gas han tenido un importante desarrollo en la Unión Soviética, donde se aplican como estudios preliminares para señalar las zonas más recomendables para exploraciones geológicas y geofísicas de mayor detalle. L. Aristarjova (1979) y otros autores se han ocupado del problema complejo de relacionar la estructura geológica profunda con el relieve. Por esto, los métodos que se utilizan son los geomorfológico estructurales y paleogeomorfológicos.

39 Los objetivos de los estudios geomorfológicos, en el caso que nos ocupa, son tres principales: a) interpretar la estructura geológica actual y trampas estructurales; b) inferir movimientos neotectónicos y estructuras asociadas; c) interpretar el paleorrelieve, la paleogeografía y paleotectónica.

La paleogeomorfología es una de las disciplinas geomorfológicas más importantes en la actualidad, que seguramente tendrán un gran desarrollo en el futuro. Los estudios para la reconstrucción del relieve anterior al actual, en distintas etapas, se realiza lo mismo a partir de estudios en la superficie terrestre, con apoyo en los cortes naturales, que con la información resultante de las perforaciones profundas que permiten interpretar el relieve lo mismo del jurásico temprano que del pleistoceno tardío, cuestiones que tienen un gran interés científico y práctico.

Las estructuras geológicas y los movimientos neotectónicos se estudian con apoyo en los métodos geomorfológicos estructurales, mismos que consisten en definir las relaciones directas e inversas del relieve, los rasgos litológicos y estructurales y los sedimentos neogénico-cuaternarios. Las formas estructurales pueden ser trampas (acumulación de petróleo y gas).

Estos estudios permiten, en el futuro, planificar con detalle los trabajos de exploración, incluyendo perforaciones y geofísica. En la etapa de investigaciones detalladas el papel del análisis geomorfológico estructural es especialmente importante para una evaluación cuantitativa de los

movimientos neotectónicos, incluyendo la actividad de fallas como factor que influye en la formación y conservación de trampas.

El estudio geomorfológico estructural comprende una amplia variedad de mapas, como el del mismo nombre y otros: de lineamientos, morfogenético, morfoisohipsas, de superficies de nivelación y morfométricos. Estos se han explicado en páginas anteriores. Para cada región y problema específico habrá que elegir los mapas convenientes de elaborar para resolver un problema dado, en general; en primer lugar, para determinar las estructuras geológicas ocultas y la actividad neotectónica.

El análisis paleogeomorfológico se aplica principalmente en los trabajos de exploración de detalle con el fin de reconocer trampas no estructurales relacionadas con el paleorrelieve. Pero el estudio de éste sólo es posible por perforaciones que permiten el estudio de facies, espesores, litología e hipsometría. Se elaboran mapas de paleorrelieve y otros afines.

Son importantes los estudios sobre facies, espesores y composición mineralógica, lo cual contribuye a aclarar la historia del desarrollo geomorfológico y tectónico de un territorio, lo que es necesario para definir los tipos del relieve y los sedimentos correlativos. Los sedimentos reflejan el ambiente en que se originaron; el espesor, la magnitud del proceso en el tiempo. En seguida se expone una serie más de conceptos de Aristarjova (op. cit.).

Los sedimentos modernos son de interés por las anomalías que presentan sus espesores. Por ejemplo, el aluvión; los contactos entre facies de cauce y de llanura de inundación son claros cuando hay influencia tectónica, así el contacto se encuentre en posición alta o baja.

El estudio del aluvión incluye el espesor en las terrazas, que puede ser normal o anómalo. Esto se determina con perforaciones someras, cada kilómetro, en sentido longitudinal.

Por el estudio mineralógico y granulométrico se puede inferir la presencia de estructuras locales, lo que se basa en el estudio de fracciones pesadas y material grueso. Ante movimientos diferenciales se produce

una redistribución de fracciones de sedimentos; en las estructuras positivas en levantamiento se concentran las más grandes y pesadas.

Las muestras se toman en la ribera erosionada -200-400 g-, de tamaño de 0,5 mm o menos de 1 mm. En el laboratorio, de un peso de 50-100 g, se eligen minerales pesados y se determina el contenido; se establecen los porcentajes de minerales índices (magnetita, cromita, rutilo, circón); se calcula el volumen de los granos mayores (0.5 a 0.25 mm) de fracciones pesadas y de minerales índices; se construyen gráficas de fracciones de minerales pesados, de minerales índices y otros en la porción estudiada del valle.

En la interpretación de los datos sobre la composición del aluvión de cauce se determina la porción del valle fluvial con contenido anómalo de grandes fracciones de aluvión, pero en el análisis de minerales pesados y minerales índices pertenecientes a una estructura tectónica activa positiva se requiere de no menos de 50-60 muestras de aluvión.

En las planicies de acumulación donde la cobertura de sedimentos oculta las estructuras, se aplican en el estudio métodos de perforación. El trabajo se inicia con el análisis litoestratigráfico, con datos de todos los pozos, y se elaboran mapas temáticos. Para cada pozo se señala el espesor de sedimentos modernos (formaciones), litología, facies, alturas, etc. Posteriormente se realizan cartas de isopacas, litofacies y relieve actual de piso de las formaciones. Todo esto permite reconstruir los ambientes antiguos y la historia evolutiva.

En las planicies denudatorias donde la sedimentación moderna tiene un carácter interrumpido, el estudio de espesores y composición de las formaciones continentales tiene un significado geomorfológico estructural menor. En estas condiciones, el análisis de las cartas de isopacas de cuerpos genéticos homogéneos de sedimentos no consolidados facilita el reconocimiento de las formas estructurales modernas, en especial las negativas; un incremento local significativo del espesor de sedimentos en planicies denudatorias, como regla, corresponde a porciones de hundimiento o a zonas de dislocación tectónica.

Los resultados de la interpretación geomorfológica estructural de una carta de espesores y litofacies de sedimentos modernos son base para la elaboración de cartas neotectónicas. Estas dan una idea de las dimensiones de las formas estructurales activas.

#### Metodos paleogeomorfológicos y su aplicación.

Las cartas de isopacas elaboradas considerando la profundidad absoluta de los techos de las formaciones geológicas reflejan el paleorrelieve, pero éste se puede estudiar también elaborando los mapas de profundidades relativas, a partir de un horizonte determinado (capa de apoyo). El método expuesto por la autora mencionada se explica a continuación.

1. La capa de apoyo se elige con base en la geología del subsuelo; es conveniente que sea de extensión regional, fácilmente reconocible, homogénea en su composición, encontrarse cerca de la superficie de discordancia que va a estudiarse y que no haya entre ellas discordancias.

2. Por datos de perforación se determina la distancia vertical del techo de la superficie de discordancia al de la capa de apoyo. El espesor medido en distintos puntos permite elaborar una carta de isopacas que reflejan el paleorrelieve. Las reducciones de espesor corresponden a formas positivas y el engrosamiento a negativas. Este es el primer mapa de una serie para la reconstrucción paleogeomorfológica, y expresa formas equivalentes a depresiones, elevaciones locales, divisorias, etc.

3. Se determinan las alturas absolutas del paleorrelieve, de lo que resulta una carta de elevaciones relativas. M. Pronicheva (op. cit.), recomienda el método siguiente para realizar la carta paleohipsométrica.

Se establece la inclinación general regional de la superficie de discordancia, por medio del análisis de espesores de sedimentos marinos litorales que cubren la porción superior del paleorrelieve. El espesor aumenta gradualmente de la fuente de depósito hacia el territorio deprimido, de acuerdo con la fórmula:

$$i = \frac{M - m}{l}, \text{ donde:}$$

$i$ , es la inclinación regional en m/km,

$M$ , máximo espesor de sedimentos costero-marinos,

$m$ , mínimo espesor,

$l$ , es la distancia (km) entre las fuentes en donde se midieron los espesores.

Se obtiene una inclinación general en grados ( $i^\circ$ ). Posteriormente, por datos de perforaciones se define la posición de la línea de costa de la cuenca marina estudiada, la cual equivale a la curva de nivel cero. En la carta de alturas relativas del paleorrelieve se trazan isolíneas de inclinación general regional.

Se puede continuar por un método gráfico sobreponiendo las cartas de inclinación general regional y la de elevaciones relativas. Se restan los valores coincidentes en ambas para obtener otros de paleoisohipsas. Por otro método, numérico, se obtienen los valores por la fórmula:

$$H = l \operatorname{tgi} + M - m, \text{ donde los equivalentes son:}$$

$H$ , incremento en  $m$  sobre el nivel del mar original,

$l$ , distancia de la costa al punto dado (km),

$M$ , espesor regional máximo de sedimentos, a partir de la capa índice del relieve cubierto,

$m$ , espesor de sedimentos de la capa índice al punto dado.

Si en la carta de alturas relativas del paleorrelieve se tienen residuos no cubiertos por sedimentos que descansan por encima de la capa de apoyo, se aplica la fórmula:

$$h = a - b \text{ y } H_r = H + h, \text{ donde:}$$

$h$ , es la altura relativa del residuo,

$a$ , el espesor de la capa índice superior,

$b$ , el espesor de los sedimentos en la cima del residuo.

Cuando la posición de la línea de costa de una cuenca no se puede determinar (o se localiza a una gran distancia de la región en estudio), se

calculan aproximadamente las paleoalturas de otros puntos. Así, la carta paleohipsométrica es aproximada y algunas veces no se elabora.

4. La geología del subsuelo, en especial en lo que se refiere a las superficies de discordancias y a las facies que cubren el paleorrelieve, son métodos importantes necesarios en los estudios de paleogeomorfología.

Durante la investigación se analiza con detalle el cuerpo de rocas de la porción superior del paleorrelieve en función de los antiguos procesos de la morfogénesis. Se realiza por medio del estudio de perfiles de sedimentos, dando especial importancia a propiedades como el color, granulometría, estructura, inclusiones y edad. Todo esto complementa los estudios de litología y facies y contribuye al conocimiento del relieve antiguo.

5. Posteriormente se definen las características de los sedimentos en relación con las formas del relieve sepultado. Para esto se elaboran cartas de rocas sedimentarias que cubren el paleorrelieve, incluyendo tipo de sedimentos, espesores (midiendo respecto al techo de la capa de apoyo), utilizando la carta paleohipsométrica como ayuda. Para esto es indispensable definir la paleogeografía de la discordancia estudiada, así como las condiciones de la sedimentación de la cuenca marina.

El estudio de la disposición de los complejos de litofacies que cubren el paleorrelieve, permite el reconocimiento de grandes elementos morfológicos. El análisis de la comparación litológica y de la posición altimétrica de los sedimentos que cubren el relieve, correlativos a él, permiten reconstruir formas individuales del paleorrelieve y caracterizar el mismo desde un punto de vista genético.

6. Se realiza toda esta cadena de métodos de elaboración de la carta paleogeomorfológica y la expresión de trampas no estructurales, relacionadas con las formas del paleorrelieve. La carta se construye por el principio morfogenético y sobre una base paleohipsométrica. Esto permite expresar las propiedades de morfología y génesis del relieve antiguo y dar una evaluación

cuantitativa, lo que es importante en el pronóstico de trampas petrolíferas.

Para la reconstrucción del paleorrelieve se utiliza la carta geológica de la superficie de discordancia y se analizan las litofacies que cubren y subyacen el paleorrelieve.

Se explican las características y subordinación de los sedimentos con respecto a las formas del relieve sepultado. Para esto se elaboran cartas litológicas de los cuerpos superior e inferior, con tipo de extensión de espesores de sedimentos.

Se elaboran cartas paleogeomorfológicas.

Un método simple de reconstrucción paleogeomorfológica consiste en el análisis de cuatro cartas básicas que caracterizan la superficie de la discordancia estudiada:

1. Posición altimétrica actual.
2. Complejos de litofacies que cubren el paleorrelieve y los correlativos al mismo.
3. Isopacas de sedimentos de la superficie de la discordancia.
4. Paleogeología de la superficie de la discordancia continental.

Los métodos de análisis paleogeomorfológico no sólo tienen una aplicación muy grande en geología petrolera, sino, también, proporcionan una rica información que permite reconstruir condiciones antiguas, para distintas épocas geológicas, sobre el relieve existente, las condiciones climáticas y los ambientes geomorfológicos.

Recursos hidrológicos.

Los mapas topográficos y las fotografías aéreas son en sí un magnífico auxiliar en los estudios de las aguas superficiales e, incluso, de las subterráneas. Los métodos cartográficos (v. Morfometría) de densidad y profundidad de disección del relieve, así como los de órdenes de corrientes

proporcionan una idea sobre la relación del escurrimiento con la infiltración. La morfología señala una serie de elementos relacionados con este proceso: en las zonas de divisoria se produce la precipitación mayor, pero es en la parte media de las vertientes donde se concentra mayor cantidad de agua en escurrimiento. En las laderas inferiores se produce la descarga del agua de la superficie y el subsuelo.

Las corrientes fluviales pueden clasificarse, en un mapa, con diversos criterios: permanentes e intermitentes; por la morfología del valle es conveniente señalar valles colgantes y ciegos, resurgencias, manantiales, capturas realizadas y futuras, etc.

Hay formas del relieve que son excelentes receptáculos para las aguas subterráneas, tales como: conos de deyección, superficies de tefra. Las zonas cárnicas son de actividad del agua en el subsuelo; en las mesas cárnicas de las montañas las dolinas son indicios de infiltración. El relieve en su conjunto puede ayudar a inferir las direcciones en que se produce el escurrimiento subterráneo.

Es conveniente que estos estudios partan de la delimitación de la cuenca hidrológica. Así como es favorable contar con la mayor cantidad de información posible para resolver un problema, así también hay que evitar hacer tipos de mapas o análisis que no conduzcan a una solución o que repitan una información ya conocida, equivalente a los conceptos innecesarios de las etapas de juventud, madurez y senectud. Un mapa como cualquiera de los morfométricos puede ser fundamental para resolver un problema -con la enorme ventaja del costo-, pero el mismo método, en otra situación, puede dar sólo una ayuda muy escasa.

#### Estudios arqueológicos.

La geomorfología y la arqueología han sido muy buenos complementos en muchas investigaciones. La primera permite recomendar exploraciones con base en algunas formas del relieve, tales como las terrazas fluviales, marinas o lacustres; la segunda ayuda a datar las edades de ellas por la presencia de restos de culturas antiguas en los sedimentos.

Antiguos asentamientos humanos han sido cubiertos por fenómenos catastróficos: erupciones volcánicas, corrientes de lodo, lahares, tormentas de arena; otras lo han sido por procesos más lentos: ascensos del nivel del mar, de ríos y lagos. Por esto, a partir del estudio de las formas del relieve y de los sedimentos cuaternarios (tipos genéticos) es posible recomendar las zonas más favorables para las exploraciones. Esto se combina con el factor más importante para los asentamientos, el agua. En el transcurso del cuaternario ha habido cambios climáticos sustanciales y también fisiográficos. El estudio del relieve actual y los sedimentos cuaternarios permite reconocer lo que en alguna otra etapa fueron conos de deyección; riberas de ríos, lagos y mares.

Todas estas formas permiten orientar los estudios arqueológicos; otras, como las cuevas, son también elementos importantes; pueden tener desarrollo en zonas cárnicas, en laderas rocosas de fuerte inclinación, en derrames basálticos y en otras condiciones.

Un relieve semioculto (cubierto de vegetación), de construcciones humanas, puede ser reconocido porque las formas del relieve (por ejemplo, pequeñas pirámides con aspecto de colinas) a primera vista dificultan su clasificación genética: una verdadera anomalía geomorfológica.

En este tipo de estudios es importante elaborar una carta geomorfológica general y otra de sedimentos cuaternarios para una zona de interés y su entorno. Posteriormente es conveniente estudiar con más detalle algunas porciones elegidas, en escala más grande, procurando reconstruir la historia pleistocénica del relieve. Los cambios de las riberas de los ríos, lagos y mares, avances y retroceso de glaciares, acumulaciones volcánicas (lavas, piroclastos, lahares), procesos gravitacionales y otros fenómenos pueden ser clave para localizar restos de culturas antiguas o para explicar migraciones.

Una información complementaria puede encontrarse en un artículo de Gladfelter (1977).

## Cuestiones militares.

La geomorfología se ha aplicado también en este campo, aunque por el asunto de que se trata es algo expuesto en forma escasa en las publicaciones diversas. En la época posterior a la Primera Guerra Mundial adquirió mucha importancia el estudio del relieve durante los conflictos bélicos. Algunos ejemplos se señalan en seguida.

Una de las causas que motivó el estudio del relieve de las cuencas oceánicas fue la aparición de los submarinos y su circulación por todos los mares y océanos.

En los desplazamientos por tierra es conveniente calcular velocidades de tanques, camiones y otras máquinas, lo que depende, en parte, de las condiciones del relieve.

El conocimiento del relieve y las rocas ha sido aprovechado para provocar potentes derrumbes o aludes por medio de bombardeos aéreos.

El relieve que por sus condiciones hace inaccesible el movimiento de máquinas ha favorecido, hasta nuestros días, a la parte que lucha con elementos más rudimentarios, pero con la ventaja de la facilidad del desplazamiento en un medio al que están habituados: desfiladeros, montañas de laderas empinadas, malpaíses, pantanos, planicies deltaicas, carso y otros.

Las cartas topográficas en escala grande (uno a cien mil y mayor) se realizaron en la segunda mitad de este siglo en grandes territorios de todos los continentes, con fines militares. Por esto fueron y siguen siendo en muchos países material confidencial, aunque esto ya ha perdido sentido por las imágenes de satélite. El uso que se ha dado a estas cartas ha sido interpretando la información topográfica, o sea la geomorfología en sí, aunque reducida a aspectos morfológicos.

## CONCLUSIONES

En las páginas que constituyen este volumen se han expuesto algunas cuestiones muy generales sobre la geomorfología aplicada, en especial en lo que se refiere a los métodos cartográficos. Aunque el autor considera que los temas tratados son de utilidad, lo mismo a estudiantes que a diversos profesionistas, también es necesario considerar que queda un enorme vacío. La geomorfología ha avanzado mucho en el penúltimo decenio del siglo veinte. Son varios los libros recomendables para profundizar en los conceptos generales, en los métodos de cartografía o en cualquier tema específico que es en sí una verdadera especialidad.

Se ha señalado una serie de métodos cartográficos y sus aplicaciones, pero hay que insistir en que no pueden resolverse problemas a partir de recetas. Se pretende que los interesados en estas cuestiones conozcan una serie de procedimientos para estudiar porciones del relieve terrestre, más como criterios que como fórmulas aritméticas que conducen siempre a un resultado que no puede ser erróneo.

En el proceso del estudio de una disciplina como la geomorfología debemos tener presente que nada de lo que aprendamos es suficiente, y estas cuestiones de geomorfología aplicada deben tomarse solamente como un pedacito del conocimiento. El trabajo independiente se va facilitando en la medida que se avanza en el estudio. El interesado en estos temas puede continuar por sí solo eligiendo área o áreas de trabajo y consultando literatura adecuada.

Otra cuestión importante es combinar las lecturas con trabajo de gabinete y campo. El conocimiento lo da la práctica de analizar cientos de fotografías aéreas, imágenes de satélite y mapas temáticos y topográficos, así como realizar observaciones en el campo. Los cursos especializados son solamente una orientación para profundizar en un área determinada del conocimiento. Depende del asistente al curso continuar por sí mismo o abandonarlo.

En México tiene una enorme aplicación la geomorfología. Por lo expuesto en el capítulo de Aplicaciones de la Geomorfología se entiende la conveniencia y necesidad de apoyar diversos tipos de estudios con métodos geomorfológicos. En realidad esto se hace permanentemente, muchas veces desconociendo la disciplina que se aplica, y es muy frecuente que se realicen estudios de mucho detalle, ignorando el entorno que influye en la pequeña zona, sin considerar cómo puede ser afectada por la transformación que se realice.

Difícilmente puede hablarse de un método, especialidad geomorfológica o escala de cartografía ideales. La relación estrecha existente siempre entre los elementos naturales que estudia la geomorfología nos hace entender que el aislamiento de elementos es un procedimiento erróneo. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, lo mismo todas las escalas, grandes y pequeñas.

Es importante considerar en el estudio de una porción determinada de la superficie terrestre, aplicar los métodos que a juicio del responsable del trabajo conduzcan a resolver el problema planteado.

Agradecimiento.

El autor agradece la colaboración de sus compañeros de trabajo, Carlos Jaso en la revisión del texto y Bárbara Hernández en la mecanografía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar Pérez L.A., Palacios González E. Geología y geotecnia del proyecto hidroeléctrico San Juan Tetelcingo, Gro. Tesis profesional, Ing. Geol. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1983.
- Akifíeva K.V. Leguendi krupnomashtabnij kart otsenki lavinnoy opasnosti. En: Gueomorfologuicheskoe kartirovanie v siemochnij mashtabaj, p. 248-252. Universidad de Moscú, 1975.
- Akifíeva K.V. Volodtscheva N.A., Kondakova N.L., Konstantinova G.S., Kravtsova V.I., Loseva V.G., Troshkina E.S., Tushinsky G.K., Karta otsenki reliefa territorii SSSR kak uslovia lavinoobrazovania. En: Gueomorfologuicheskoe kartirovanie y melkij mashtabaj, p. 183-191. Universidad de Moscú, 1976.
- Anańev G.S. Analiz raschlenennosti reliefa pri poiskaj guidrotermalnovo orudnenia, En: Voprosi Gueografii, Poiskovaya Gueomorfologuia, p. 132-142. Ed. Misl, Moscú, 1973.
- Araña Saavedra V., López Ruíz J. Volcanismo. Ed. Istmo, Madrid, 1974.
- Aristarjova L.B. Gueomorfologuicheskie issledovania pri poiskaj нефти y gaza. Universidad de Moscú, 1979.
- Bashenina N.V. Gueomorfologuicheskoe kartirovanie. Ed. Visshaya Shkola, Moscú, 1977.
- Bilibin Y.A. Osnovi gueologii rossipey. Academia Nauk SSSR, Moscú, 1955.
- Chemekov Y.F. Metodicheskoe rukovodstvo po gueomorfologuicheskim issledovaniyam. Ed. Niedra, Leningrado, 1972.
- Cooke R.U. Doornkamp J.C. Geomorphology in environmental management. Oxford University Press, Oxford, 1974.

- Coque R. Geomorfologĳa. Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- Demek J. (responsable). Manual of detailed geomorphological mapping. Academia, Praga, 1972.
- Derrau M. Geomorfologĳa, Ed. Ariel, Barcelona, 1981.
- Engeln O.D. Geomorphology, sistematic and regional. McMillan, Nueva York, 1942.
- Gerard A.J. Rocks and landforms. Unwing Hyman, Londres, 1988.
- Gladfelter B.G. Geoarchaeology: the geomorphologist and archaeology. American Antiquity, 42 (4): 519-538. 1977.
- Guerasimov I.P. Opit gueomorfolguicheskoy interpretatsii obschey sjemi gueologuicheskovo stroyeniya SSSR. Problemi Fizicheskoy Gueografii n. 12. Moskva, Akademia Nauk SSSR, 1946.
- Gutiérrez Briones J. Breve estudio geológico-geomorfológico de la zona de Santa Catarina, S.L.P., en escala 1:50 000. Tesis profesional, Ing. Geol. Facultad de Ingenierĳa de la UNAM, México, 1986.
- Guerra Peña F. Fotogeologĳa. UNAM, México, 1980.
- Hernández Adame S. Geomorfologĳa de las delegaciones Cuajimalpa y Miguel Hidalgo, D.F. Tesis profesional, Lic. en Geografĳa. Facultad de Filosofĳa y Letras, UNAM, México, 1987.
- Hills E.S. Elements of structural geology. John Wiley and Sons, Nueva York, 1963.

Horton R.E. Erosional development of streams and their drainage basins. Bull. Geol. Soc. Am., 56: 275-370, 1945.

Jain V.E. Geotectónica general 2 t. Ed. Mir, Moscú, 1980.

Kazakevich Y.P. Uslovia obrazovania y sojranenia slozhnij pogrebennij rossijskij zolota. Ed. Niedra, Moscú, 1972.

Koncheva N.T. Gueomorfologicheskie metodi viyavlenia kupolnij struktur pri poiskaj endoguenovo orudnenia, En: Voprosi Gueografii 92, p. 124-131. Misl, Moscú, 1973.

Kostenko N.P. Gueomorfologua. Universidad de Moscú, 1985.\*

Leontiev O.K. Gueodinamika planetarnij morfostruktur dna okeanov na noveishem etape razvitia zemnoy kori en: Kolebania urovnia mirovovo okeana i voprosi morskoy gueomorfologii, p. 72-76, Nauka, Moscú, 1975.

Lugo H.J. La relación con la geomorfología de algunos yacimientos hidrotermales mexicanos. Memoria XIV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, p. 255-263, Acapulco, 1981.

Lugo H.J. Morfoestructuras del fondo oceánico mexicano. Boletín del Instituto de Geografía, 15: 9-39. UNAM, México, 1985.

Lugo H.J. Los métodos geomorfológicos. Revista de Geografía, 1 (1): 13-26. INEGI, SPP, México, 1986.

\* La primera parte del libro se ha traducido al español para su publicación.

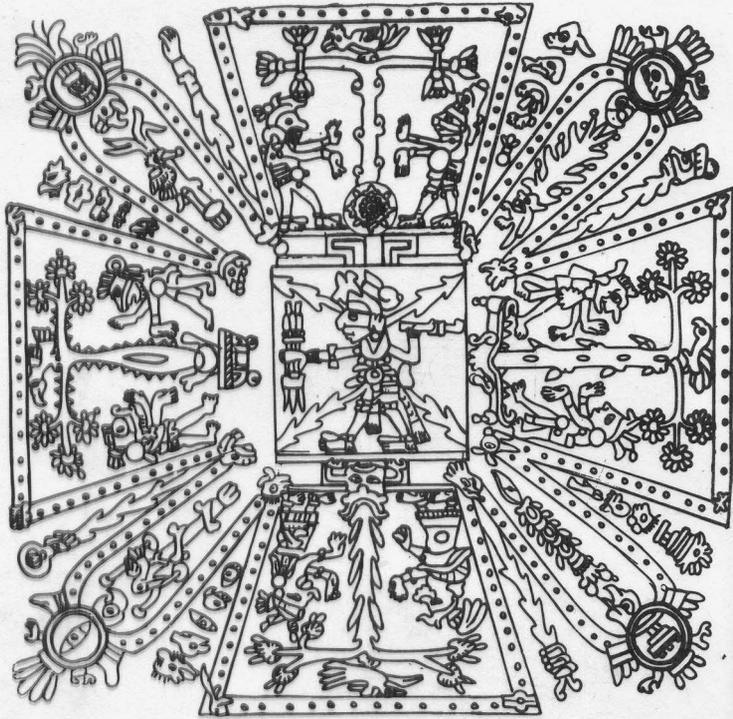
- Lugo H.J., Ortíz P.M.A. Análisis de la densidad y frecuencia de fracturas en el conjunto montañoso marginal al Océano Pacífico, entre Bahía de Banderas y Punta Penitas. III Reunión Nacional de Geotecnia y Geotermia, Memoria, T.I. Comisión Federal de Electricidad, México, 1980a.
- Lugo H.J., Ortíz P.M.A. Análisis geomorfológico estructural del conjunto montañoso de la región de Cabo Corrientes, Jal. Bol. Soc. Geol. Mexicana, T. XLI, Nos. 1 y 2, p. 1-13, 1980b.
- Lukashov A.A., Lijacheva E.A., Analiz seksii neotektonicheskij blokov pri izuchenii endoguennij rudnij mestorozhdenii, en: Voprosi Gueografii 92, Poiskovaya gueomorfologuia, p. 112-123. Ed. Misl, Moscú, 1973.
- Miller A.A. La piel de la Tierra. Ed. Alhambra, Madrid, 1970.
- Ollier C. Tectonics and landforms. Ed. Longman. Londres, 1981.
- Palacio Prieto J.L. Análisis geomorfológico de la región de Cuernavaca-Tenancingo-Ixtapan de la Sal, estados de Morelos y México. Tesis de maestría en geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 1982.
- Polkanova L.P. O teoriticheskij osnovaj metodiki strukturno gueomorfologuicheskij issledovanii. En: Osnovi metodoki strukturno gueomorfologuicheskij issledovanii pri neftegazopiskovij rebotaj. Ed. Niedra, Moscú, 1978.
- Riabkov N.V. Siagaev N.A., Gueomorfologuicheskie karti dlia tseley gidroenergueticheskovo stroitelstva v dolinaj ravninij rek. En: Gueomorfologuicheskoe kartografirovanie v siemochnij mashtabaj, p. 244-247. Universidad de Moscú, 1975.
- Rice R.J. Fundamentos de geomorfología. Ed. Paraninfo, Madrid, 1983.

- Sánchez Pérez J. Bosquejo geológico-geomorfológico de la zona de Tizayuca (noroeste de la cuenca de México). Tesis profesional, Ing. Geol. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN. México, 1980.
- Simonov Y.G. Printsipi poiskovoy gueomorfologuii, En: Voprosi Gueografii 92, Poiskovaya gueomorfologuia, p. 8-17. Ed. Misl, Moscú, 1973.
- Simonov Y.G. Inzhenernaya gueomorfologuia, osnovnie zadachi y puti razvitiia, en: Voprosi Gueografii, 111, Gueomorfologuia i Stroitelstvo, p. 14-21. Ed. Misl, Moscú, 1979.
- Smirnov V.I. Geologíia de yacimientos minerales. Ed. Mir, Moscú, 1982.
- Sparks B.W. Rocks and relief. Longman, Londres, 1971.
- Spiridionov A.I. Gueomorfologuicheskoe kartirovanie. Ed. Niedra, Moscú, 1985.
- Strahler A.N. Dynamic basis of geomorphology. Bull. Geol. Soc. Am., 63: 923-938, 1952.
- Talskaya N.N. Gueomorfologuicheskoe kartografirovanie odnovo iz gornij raionov Rudnovo Altaya v mashtabe 1: 50 000. En: Gueomorfologuicheskoe kartografirovanie v siomochnij mashtabaj, p. 122-126. Universidad de Moscú, 1975.
- Thornbury W.D. Principios de geomorfologíia. Ed. Kapelusz, Buenos Aires, 1958.
- Tricart J. La epidermis de la Tierra. Nueva colección Labor N. 91. Ed. Labor, Barcelona, 1969.
- Tricart J. Cartographie géomorphologique. Memoires et Documents, Cartographie géomorphologique, travaux de la R.C.P. 77. Editions du Centre de la Recherche Scientifique, París, 1972.

- Tricart J. Un problema de géomorphologie appliquée: le choix des sites d'habitat dans une région sismique (Andes centrales, Pérou). Annales de Géographie n. 82, 449: 8-27, 1973.
- Tricart J., Cailleux A. Traité de géomorphologie, t. I: Introduction a la géomorphologie climatique. SEDES, Paris, 1965.
- Verstappen H. Th. Applied geomorphology. Elsevier, Amsterdam, 1983.
- Vapstarov I., Mishev K. Osnovnie zakonomernosti formirovania morfostruktur Bolgarii. Gueomorfologuia N. 1, p. 16-31, 1978.
- Voskresenskii S.S. Gueomorfologuia rossipey. Ed. Universidad de Moscú, 1985.
- Williams H., McBirney A.R. Volcanology. Freeman, Cooper Co. San Francisco, 1979.

El contenido y forma de esta publicación  
es responsabilidad del autor.

Instituto de Geografía,  
UNAM.  
Circuito de la Investigación Científica.  
Ciudad Universitaria  
04510 México, D. F.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Dr. Jorge Carpizo  
Rector

Dr. José Narro Robles  
Secretario General

Dr. Abelardo Villegas  
Secretario General Académico

C.P. José Romo Díaz  
Secretario General Administrativo

Lic. Mario Ruíz Massieu  
Secretario General Auxiliar

Lic. Manuel Barquín Alvarez  
Abogado General

Dr. José Sarukhán Kermez  
Coordinador de la Investigación Científica

Dra. María Teresa Gutiérrez de MacGregor  
Directora del Instituto de Geografía