

2ej



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

"APLICACION DE LOS METODOS GEOMORFOLOGICOS EN PROBLEMAS
GEOTECNICOS"

TESIS PROFESIONAL

Para la obtención del Título de:
INGENIERO GEOLOGO
p r e s e n t a

JOSE FERNANDO ACEVES QUESADA



México, D. F.

1986



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA

Dirección
60-I-023

Señor ACEVES QUESADA JOSE FERNANDO.
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Prof. Dr. -- José Lugo Hubp, para que lo desarrolle como tesis para su --- Examen Profesional de la carrera de INGENIERO GEOLOGO.

"APLICACION DE LOS METODOS GEOMORFOLOGICOS EN PROBLEMAS GEOTECNICOS"

INTRODUCCION.

I LOS METODOS PARA EL ESTUDIO DEL RELIEVE.

- a) Morfométricos.
- b) Morfogenéticos.
- c) Morfodinámicos.

II APLICACION DE LOS METODOS GEOMORFOLOGICOS.

- a) En la construcción de presas.
- b) En el trazo de vías de comunicación.
- c) En los asentamientos humanos.

CONCLUSIONES.
BIBLIOGRAFIA.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar -- Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como -- requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así -- como de la disposición de la Coordinación de la Administración -- Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los -- ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., Enero 27 de 1984.
EL DIRECTOR

Dr. Octavio A. Rascón Chávez

DM
OARCH'MRV:gtg

I N D I C E

Introducción	3
Cap. I	
Los métodos para el estudio del relieve	
A) Morfometría	6
B) Morfogénesis	46
C) Morfodinámica	65
Cap. II	
Aplicaciones de la geomorfología a la geotecnia .	76
A) En la construcción de presas	78
B) En el trazo de vías de comunicación	92
C) En los asentamientos humanos	110
Conclusión	119
Bibliografía	122
Mapas	

Introducción

Para la construcción de infraestructura en nuestra sociedad, como son: la planeación urbana, las vías de comunicación, las presas; el trabajo de investigación y el anteproyecto son la base sobre la cual se fundamentan dos decisiones: la primera como premisa para intentar llevar a cabo el proyecto, y la segunda, si es aceptado, elaborar los planes para la investigación detallada de la obra.

La investigación requiere del conocimiento exacto de los factores físicos y sociales de la zona donde se proyecta la obra. Entre los primeros tenemos el clima, los suelos, la litología y el relieve. Este último es el objeto de estudio de la geomorfología, que lo considera en función de su génesis, morfología, edad y dinámica actual. Un estudio geomorfológico implica el análisis de todos estos factores y su representación en cartas especiales.

Por su morfología, la superficie terrestre posee caracte-

rísticas cualitativas o morfográficas y cuantitativas o morfométricas. Las primeras se refieren a la semejanza de las formas del relieve con cuerpos geométricos, como cuencas --- elipsoidales, conos volcánicos, etc. Las propiedades morfométricas del relieve son valores matemáticos que definen longitudes, áreas, volúmenes, ángulos de pendiente, etc.

En su origen, las formas del relieve son el resultado de la interacción de dos tipos de procesos: los endógenos (creadores) y los exógenos (niveladores). Ambos actúan con intensidades variables, jugando un papel importante los endógenos que controlan (junto con el clima), en intensidad a los exógenos.

En cuanto a la edad, está se refiere al tiempo transcurrido desde su formación, y se representa por los mismos símbolos que se utilizan en geología.

Aunado a estos tres factores es necesario conocer la dinámica que presentan estos factores, es decir la intensidad y velocidad con que se está transformando el relieve.

El conocimiento adecuado de estos cuatro factores, nos -- permite conocer todo aquello que modela el relieve y su relación con el subsuelo, por el estrecho nexo que guardan estos factores con la estructura geológica, la hidrología y el --- clima.

En este trabajo se pretende dar a conocer una serie de -- métodos para el estudio del relieve y su relación con la estructura geológica, y la manera de aplicarlos a la solución de problemas geotécnicos.

Para la realización de este estudio, se ha procedido a dividirlo en dos partes. En la primera se presentan los métodos para realizar un trabajo geomorfológico, el cual consta de tres tipos de métodos: morfométricos, morfogenéticos y morfodinámicos. En la segunda, su aplicación a la geotecnia y de manera especial a la construcción de presas, vías de comunicación y asentamientos humanos.

Finalmente, hay que decir, que la utilidad de estos métodos es múltiple, y no se reduce sólo a resolver problemas geotécnicos o una investigación científica, sino que es posible aplicarlos a otros campos como son la búsqueda de yacimientos minerales, depósitos petrolíferos, búsqueda de agua subterránea, cuantificación de erosibilidad en campos de cultivo y mejoras del suelo agrícola, etc.

A) Morfometría

La morfometría se refiere al estudio cuantitativo de las formas de la superficie terrestre, mediante una serie de métodos gráficos y matemáticos. Se trata así, de medios mecánicos para obtener información sobre el relieve terrestre, que por la gran cantidad de métodos existentes, ésta, puede ser de un extraordinario volumen.

La morfometría del relieve terrestre se obtiene por medio de mediciones directas en el campo o en gabinete, a través de la utilización de fotografías aéreas y mapas topográficos, mismos que permiten hacer una serie de mediciones precisas, teniendo la ventaja de obtener suficiente información preliminar en el gabinete, en un breve tiempo, lo que significa una reducción en el costo.

A partir de un mapa topográfico preciso, se pueden obtener directamente valores de:

1. Dimensiones: longitud, superficie, volumen.
2. Orientación: azimut, rumbo, exposición, etc.
3. Alturas absolutas y relativas.

4. Pendiente.

5. Densidad y frecuencia de determinados elementos del relieve.

Los métodos morfométricos pueden aplicarse para resolver directamente un problema dado, o bien, pueden ser un apoyo a otros métodos no cuantitativos. La morfometría hoy día, tiene una gran aplicación en problemas de geotecnia, geohidrología, hidrología, agricultura, etc. y para esto se cuenta con múltiples y variados métodos. A continuación se describen -- algunos de los más importantes y su utilidad.

El más importante de los procesos que modelan la faz de la tierra es el escurrimiento superficial, que forma, desde los canales menores, hasta los grandes valles. En conjunto -- forman una red de canales que incluyen desde los tributarios efímeros hasta los de aguas permanentes. El agua proviene -- principalmente de las lluvias, de los manantiales y del deshielo. El agua toma tres caminos que son: la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento sobre la superficie; lo cual está regulado por el clima y la permeabilidad -- del suelo.

El uso de los métodos descriptivos implica la organización de la red de una manera que permita su fácil interpretación. Las descripciones cuantitativas del drenaje, tiene -- por objeto explicar en números y caracteres fácilmente relacionables, los parámetros de una cuenca para su estudio. Y -- esto se facilita debido a que la red de drenaje está íntimamente relacionada con la geometría hidráulica de los canales

de las corrientes, y con los cortes longitudinales, que permiten observar al perfil de los ríos. El estudio de estas -- redes, proporciona las características principales de cada -- terreno, como su permeabilidad, resistencia del lecho rocoso, cantidad de material que acarrea, etc. (Leopold, 1964).

Una de las formas más adecuadas para reconocer las redes fluviales, es con la ayuda de mapas topográficos, en los cuales se encuentran marcadas las corrientes principales. Si-- siguiendo los contornos de las curvas de nivel podemos encon-- trar el resto de los canales menores, los cuales son efíme-- ros y generalmente sólo activos durante la época de lluvias. La exactitud del trabajo depende de la calidad del mapa to-- pográfico que se utilice. En México contamos con las cartas elaboradas por la Secretaría de Programación y Presupuesto, a través del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, las cuales ofrecen la exactitud necesaria para la realización de un trabajo de alta calidad. Las escalas -- más utilizadas para estos trabajos son: 1: 250 000 y 1: 50 - 000.

Las fotografías aéreas ofrecen una precisión mayor, ya -- que todos los talwegs son observables, excepto aquellos pe-- queños en extremo para la escala utilizada. En muchos casos en que se requiere completar la información sobre la red flu vial del mapa, se lleva a cabo un trabajo de fotointerpreta-- ción, en apoyo al anterior.

"La naturaleza a menudo revela una serie de patrones sen-- cillos, los cuales se reflejan en los diversos procesos en -

estudio, mismos que se reducen a leyes físicas y químicas. Aunque muchas características cualitativas de la disección -- expresan las diferencias entre zonas distintas, su uso es -- limitado, y por lo tanto, se necesita de una investigación -- completa sobre el origen y evolución de cada terreno. Los es -- tudios cuantitativos recientes, nos proveen de las herramien -- tas necesarias para conocer de una manera más exacta los pro -- cesos que modelan el relieve" (Leopold, 1964).

Los análisis morfométricos del relieve se orientaron ori -- ginalmente a cuencas hidrológicas, o sea, a territorios con límites naturales bien definidos. Sin embargo, la morfome -- tría ha ido encontrando una mayor aplicación en los estudios geomorfológicos, al grado que hoy día, son practicamente in -- dispensables.

Una cuenca hidrológica se define como el área que ocupa -- una corriente principal con todos sus afluentes. Los límites quedan definidos por los parteaguas principales.

Los elementos a describirse de una cuenca hidrológica, -- Horton (1932) los clasifica de la siguiente manera:

1. La morfología, la cual depende de la topografía y del ti -- po de suelo sobre el cual se ha desarrollado la red fluvial.
2. La composición del suelo. Este grupo incluye la descrip -- ción de los materiales que componen el suelo y sus propieda -- des físicas y químicas.
3. La estructura geológica. Se refiere en especial a la pro -- fundidad y a otras características diversas de las rocas y -- al tipo de estructura que forman, lo cual en algunos casos --

se encuentra íntimamente relacionado con el agua subterránea.

4. La vegetación. Sea natural o cultivada, es de interés por la alimentación hídrica que puede tener en la cuenca en que se presenta.

5. Factores climáticos-hidroclimáticos. Los factores hidroclimáticos se relacionan especialmente con el ciclo del agua, particularmente con la superficial y subterránea; mientras que -- los factores climáticos incluyen la temperatura, humedad, régimen de lluvias y evaporación. Los factores del clima y del ciclo hidroclimático se presentan en relación estrecha, por lo cual son inseparables (Horton, 1932).

Los métodos geomorfológicos cuantitativos presentan, según Strahler (1957), dos tipos de números descriptivos: 1) -- Los números de escala lineal, donde las medidas son geométricamente similares a las topográficas, las cuales permiten -- comparar tamaños. Las principales medidas lineales son la -- longitud de las corrientes, orden de las corrientes, densidad de drenaje, perímetro de la cuenca, etc.; además, a dos cuencas geométricamente similares, de longitudes diferentes, se les puede calcular su razón.

2) Los números dimensionales, usualmente ángulos y razones, incluyen la longitud de las corrientes y su relación con el coeficiente de bifurcación, ángulos de unión, pendientes máximas de las paredes de los valles, pendiente media en la -- base de las vertientes, gradiente de los canales, razón del relieve, curvas hipsométricas, etc.

Si geométicamente son similares dos cuencas, todos sus números dimensionales deberán ser idénticos, aunque entre ellas exista una gran diferencia de tamaño. Las propiedades dimensionales pueden ser correlacionadas con los datos hidrológicos y con la deposición de capas de sedimento, así como los volúmenes o masas por unidad de área, independientemente del área total de la cuenca (Strahler, 1957).

El análisis dimensional y la similitud geométrica se pueden explicar con el apoyo de la figura A-1, en la que se observa en primer término la topografía. Se ha considerado que las cuencas A y B son geométicamente similares, difiriendo únicamente en el tamaño. La más grande puede ser designada como el prototipo, y la pequeña como el modelo. Todas las medidas de longitud entre los puntos correspondientes de cada cuenca, se utilizan para determinar la relación de escala (λ).

Además, si se orienta con respecto a un centro común, las bocas de las cuencas Q' y Q, estarán localizadas a una distancia r' y r respectivamente del centro C; donde la razón de r' a r será " λ ". En suma, todas las medidas correspondientes de longitud, cualquiera que sea, el perímetro de la cuenca, la longitud y extensión de la misma, longitud de corriente, altura del relieve (h' y h), que se observan en la parte baja de la figura, tendrán la misma relación, si existe similitud.

Por lo que corresponde a sus ángulos, las relaciones entre ellos, también deberán ser iguales, si hay similitud, --

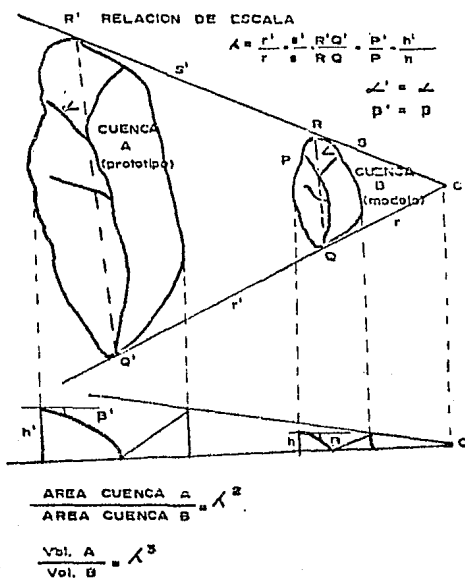


Fig. A-1.
 Principios del análisis dimensional
 y similitud geométrica aplicado a
 las cuencas (STRAHLER 1957).

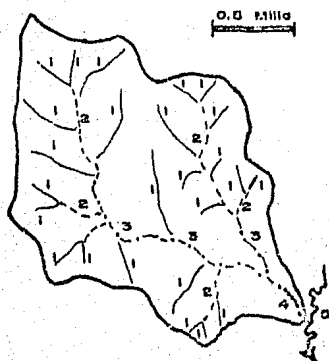


Fig. A-2a
 Descripción de los órdenes de las
 corrientes de acuerdo a Strahler
 (1957).

siendo α' y α ángulos de unión de las corrientes y β' y β pendientes del terreno. De acuerdo con las propiedades de los ángulos, podemos generalizar que para dos sistemas con números dimensionales iguales, sus productos geométricos también deberán ser iguales.

Estudios recientes sobre cuencas muestran que, si presentan entre sí una homogeneidad en cuanto a su composición rocosa, los resultados serán muy similares, pero si no existe esta homogeneidad, estos resultados serán completamente diferentes. Las ventajas de utilizar los principios de similitud son que, las diferencias en la escala lineal son independientes de la forma o perfil de la cuenca y que pueden presentar diferencias de forma, independientemente de las diferencias de tamaño (Strahler, 1957).

El orden de las corrientes se refiere a la posición que ocupa cada una y su relación con las otras dentro de una cuenca.

Hay varias maneras para definir los ordenes de las corrientes. En Europa se acostumbra designar a la corriente principal como de primer orden, al tributario más largo, de segundo orden, y así bajando de importancia, hasta llegar a las pequeñas escorrentías que ya no tienen afluentes.

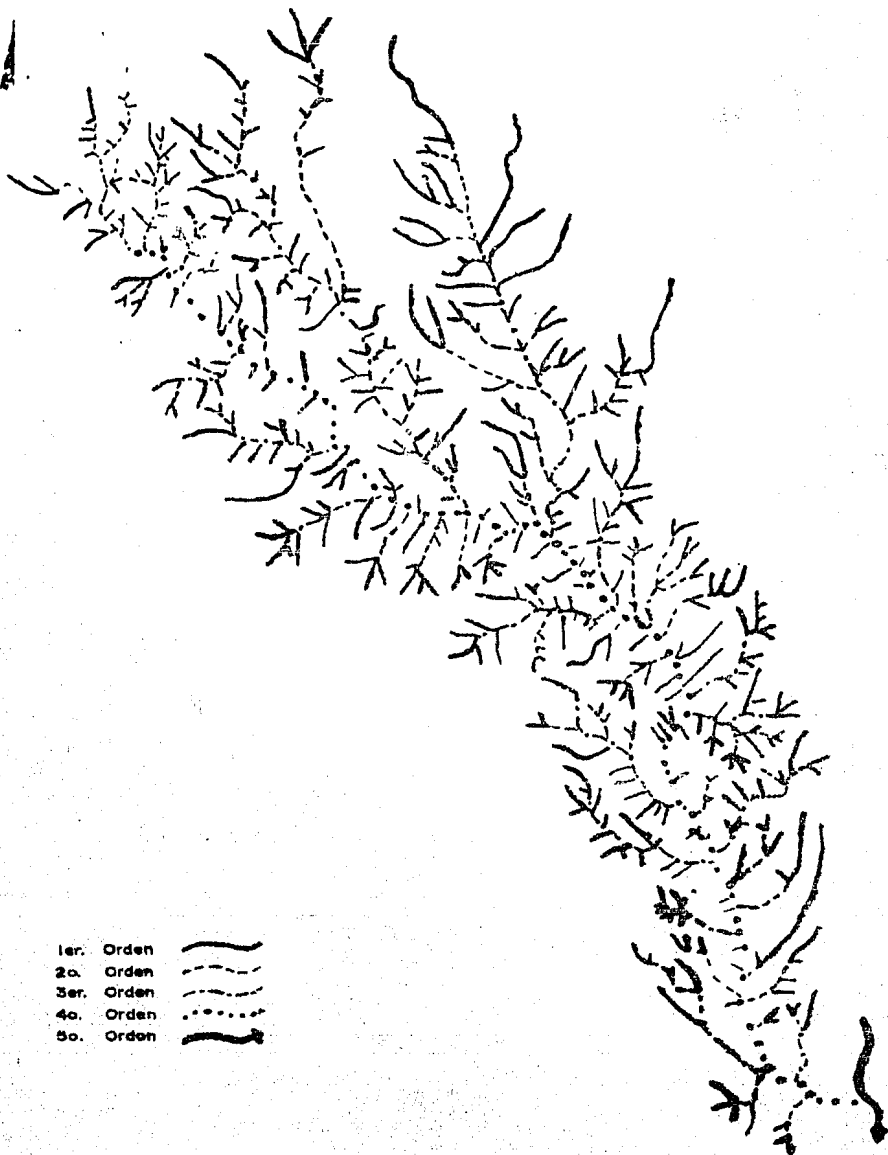
Horton (1932) las clasifica de un modo inverso y prefiere designar al tributario que no posee afluentes como de primer orden, a la corriente que solo recibe afluentes de primer orden la denomina de segundo orden, y las que reciben afluentes de primero y segundo orden como de tercer orden, y así -

sucesivamente hasta llegar a la corriente principal.

Strahler (1957) a su vez los clasifica, de una manera similar a Horton, pero en vez de obtener el orden de las corrientes de todo el sistema fluvial, desde la cabecera de los ríos hasta su desembocadura, propone que se haga por segmentos, la obtención de las corrientes (Fig. A-2.a.). Esto simplifica la compilación, aunque acorta la longitud de la corriente principal. Sin embargo, esto no afecta las leyes que relacionan el orden de las corrientes y sus números, y desde luego no se afecta la manera en que Horton designa los órdenes de las corrientes (Fig. A-2.b.).

Con la obtención de los órdenes de las corrientes, se pueden elaborar gráficas, para observar la relación que existe entre el orden y la longitud, el área y el número de corrientes, como se observa en la figura A-3 (Leopold, 1964).

Cualquier uso o valor que se le dé al sistema de órdenes de corrientes, dependerá del promedio que se obtenga, ya que necesita ser lo más completo posible, debido a que el número de orden es directamente proporcional a las dimensiones de la cuenca. También porque el número de orden es dimensional, y si dos cuencas difieren grandemente en la escala lineal, pueden ser igualadas o comparadas con respecto a los puntos correspondientes en su geometría, a través del uso del número de orden. El primer paso en el análisis de una red fluvial, es el conteo de los segmentos de corrientes de cada orden. Esto es, siguiendo un análisis de los caminos en que el número cambia en los segmentos de las corrientes al incre








- 1er. Orden 
- 2o. Orden 
- 3er. Orden 
- 4o. Orden 
- 5o. Orden 

Fig. A-2b
 Descripción de los órdenes de las corrientes
 en la cuenca del río Jostán.

mentarse el orden (Leopold, 1964).

Es evidente que el número de tributarios de un mismo orden en una cuenca, se incrementa en progresión geométrica, así como el número de orden de las corrientes se incrementa en progresión aritmética. Tratado como una serie geométrica de razón r , la suma de las series de todos los números de las corrientes podría ser:

$$N = (r^p - 1) / (r - 1)$$

donde p es el orden de las corrientes. Si N_1 es el número de corrientes de primer orden, tenemos:

$$r = \sqrt[p-1]{\frac{N-1}{N_1}}$$

y a esta relación se le conoce como la relación de bifurcación, la cual nos da una constante que indica la magnitud y la complejidad de la cuenca (Horton, 1932).

La ley de Horton para el número de corrientes dice que los números de corrientes de los segmentos de cada orden forman una secuencia geométrica invertida con el número de orden. Esto se verifica con la recopilación de datos, y elaborando una gráfica, como la que se observa en la figura A-4, donde la ordenada es el logaritmo del número de corrientes y donde el valor disminuye al aumentar el valor de la abscisa que representa el número de orden. Aún considerando que la relación de estas variables está definida solamente por la integración de valores de una variable independiente, con los cuales se obtiene la recta de la gráfica que nos señala la regresión lineal, la pendiente de la recta nos representa el coeficiente de regresión. Si además obtenemos el antiloga

ritmo de esta pendiente (b en la gráfica), obtendremos el -- valor de la relación de bifurcación r , obtenido por Horton -- mediante fórmula. En el ejemplo, el valor de r es de 3.53, -- lo cual significa que cada orden tiene 3.5 corrientes más, -- que el siguiente orden y obtenido de una manera más sencilla (Strahler, 1957).

Podemos pensar que la relación de bifurcación podría constituir un número dimensional de gran utilidad para expresar la forma del drenaje de una cuenca. Actualmente los números son muy estables y muestran pequeños rangos de variación de una región a otra, o de una composición a otra, excepto donde domina una actividad geológica muy alta.

La distancia que el agua debe recorrer en la superficie -- antes de encontrar su cauce definitivo es de suma importancia en la hidrología, especialmente en relación con la intensidad de flujo en pequeñas áreas.

Además, la infiltración tiene una estrecha relación con -- el régimen general de flujo en la cuenca y en menor grado -- con el flujo de aguas subterráneas.

La longitud de los canales por los que corren las corrientes son una medida dimensional propia que puede ser usada -- para revelar la escala de las unidades de las redes fluviales. La manera de aplicar este método para el análisis de la longitud de las corrientes consiste en medir todos los canales o talwegs de un mismo orden. Para una vertiente, estas -- longitudes pueden ser estudiadas mediante el análisis de la distribución de frecuencia. Las longitudes de las corrientes

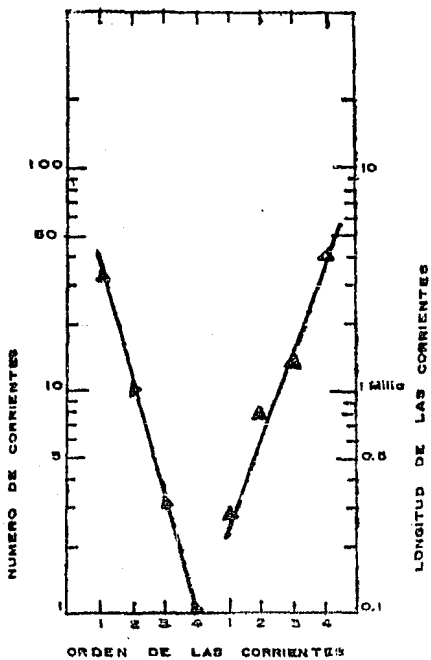


Fig. A-3.

Gráficas de la comparación del orden de las corrientes contra el número de corrientes por orden, longitud y áreas. (LEOPOLD 1964).

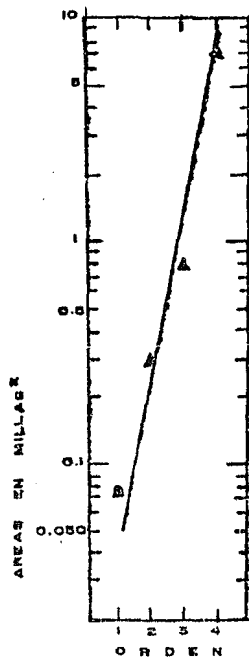


Fig. A-3.

Gráficas de la comparación del orden de las corrientes contra el número de corrientes por orden, longitud y áreas. (LEOPOLD 1964).

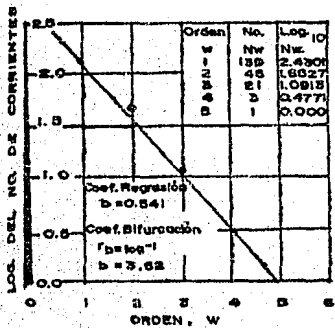


Fig. A-4.
Obtención gráfica del coeficiente de regresión y de bifurcación.
(SMITH 1953)

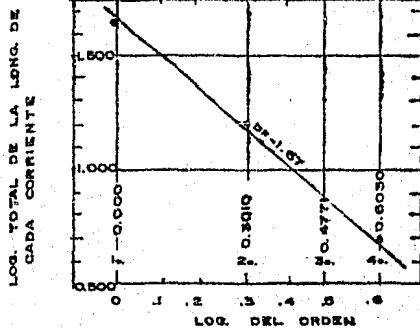


Fig. A-5.
Relación de la long. de las corrientes con su orden.
(STRAHLER, 1957)

varían mucho por lo que para poderlas graficar se utiliza una escala logarítmica. La media aritmética, la estimación de la variación en la población y la desviación estándar, sirven como modelos para la descripción de cualquiera de las diferentes redes de drenaje y las cuales pueden ser comparadas entre sí, con la ayuda de sus valores estadísticos (---- Strahler, 1957).

Otra manera de evaluar y medir la longitud de las corrientes en una cuenca se logra al relacionar la longitud con el orden de las corrientes. La manera de hacerlo es por una regresión logarítmica con los valores del orden y la longitud. Estos se grafican colocando sobre el eje de la "x" los valores logarítmicos del orden y sobre el eje de las "y" los valores logarítmicos de la longitud. La pendiente b representa una función lineal relacionada con dos variables (Fig. A-5). Las diferencias observadas en el valor b sugieren que puede proveer de una útil medida en los cambios de longitud de los segmentos de los canales, así como cambios en los ordenes. Debido a que esta variación no es lineal, esta suposición implica que la similitud geométrica no se preserva con el incremento del orden en el drenaje de la cuenca (op. cit.).

El área de una cuenca hidrológica, es propiamente el cuadrado de la longitud, donde es un factor determinante el total de sedimento transportado o depositado y que es normalmente eliminado como una variable por reducción de unidad de área, como una pérdida anual de sedimento, medida en cm-m por kilómetro cuadrado. Si el orden lo comparamos con las áreas-

de las cuencas, es necesario comparar cuencas con iguales -- magnitudes. Además, si medimos áreas de drenaje de segundo orden, podemos conocer la mayoría de los elementos del sistema. Si existe una similitud geométrica aproximada, el área obtenida será indicadora del tamaño de las formas del relieve, porque áreas de formas similares están relacionadas con el cuadrado de la razón de la escala (op. cit.)

El área de una cuenca se incrementa exponencialmente con el orden de la corriente, como lo establece la ley de las -- áreas, conocida también como la ley de Horton para la longitud de las corrientes.

Shumm (1956/cit. por Strahler, 1957) ha presentado varios histogramas referentes a las áreas de las cuencas de primero y segundo orden y partes de pequeñas superficies con sus respectivos canales. La distribución del área de la cuenca se presenta fuertemente sesgada, por lo cual es necesario realizar algunas correcciones con el uso del logaritmo del área. El área se obtiene con un planímetro de un mapa topográfico, de aquí que representa, una proyección, más que una área verdadera. La estimación del área verdadera se obtiene conociendo la pendiente del terreno.

El factor de la forma es una razón del área entre la longitud al cuadrado:

$$F = M/L^2$$

donde M es el área y L la longitud. Este factor ayuda a conocer algunos datos de la cuenca, como por ejemplo, si esta se encuentra ocupando un valle sinclinal; además, el factor-

de la forma se haya relacionado con la fórmula de máxima descarga de flujo, que nos señala el régimen de flujo de las -- corrientes. Para cuencas de forma irregular y suelos permeables, el factor de la forma no será un buen indicador de las características hidrológicas (Horton, 1932).

El factor de compactación fue definido por Gravelius, y es la razón del perímetro (P) de la cuenca por un círculo de igual área:

$$C = P/2\sqrt{\pi M}$$

donde M es el área de la cuenca. Donde el valor mínimo que puede tomar es uno. El principal uso de este factor es para comparar dos cuencas de igual área (Horton, 1932).

El método de la longitud del contorno consiste en la suma de diferentes puntos donde se ha medido la longitud (l) y la altura (h), con lo cual se obtiene una elevación media de la cuenca:

$$E = \sum(lh) / \sum(l)$$

Este método es útil para pequeñas cuencas, ya que es un trabajo muy laborioso (op. cit.)

El método de intersección se aplica para evitar la excesiva labor que significa el medir el contorno o el área de los canales intermedios en cuencas de gran extensión. La cuenca puede subdividirse por unidades cuadráticas espaciadas perfectamente en líneas y con la elevación media tomada del porcentaje de elevaciones en la intersección de las líneas (op. cit.).

El método del perfil medio de la cuenca se utiliza apli--

cando el método de intersección de líneas trazadas transversalmente al eje de la corriente con la altura media. Cada punto de la intersección se grafica desde la boca del cauce. La realización de estos diagramas nos servirá para estudiar el efecto de la erosión a lo largo de la cuenca (op. cit.).

Un importante indicador escalar de los elementos del relieve en una cuenca hidrológica es la densidad de drenaje, la cual fue definida por Horton como la longitud de todas las corrientes por unidad de área, o sea:

$$D_d = \frac{\Sigma L}{A}$$

donde A es el área de la cuenca y ΣL es la suma total de la longitud de las corrientes. Además, la división de la longitud entre el área nos da un número de dimensión inversa al de la longitud. En general, entonces, como el valor de la densidad de drenaje se incrementa, el valor de las unidades de drenaje, como en las cuencas de primer orden, decrece proporcionalmente. Este factor es un excelente indicador de la permeabilidad del suelo de la cuenca, así tenemos que valores de 1.5 a 2.0 nos indican suelos saturados impermeables, en regiones de alta precipitación, en cambio, valores menores o cercanos a cero, nos indican suelos permeables, donde la mayor parte del agua se filtra. El recíproco de la densidad de drenaje nos da el porcentaje de distancia entre corrientes (op. cit.).

La relación entre la densidad de drenaje y razón de textura fue definida por Smith en 1950. Este autor desarrolló una medida que él llamó relación de textura, con que designa

la descripción de la cercanía o proximidad de un canal a otro. Para definir la relación de textura Smith usa el contorno de la cuenca con todas sus crestas, dividiendo cada una entre la longitud del perímetro de la cuenca hidrológica. Está claro que las crestas del contorno hipotético o del cruce de los canales. Y esto es, debido a que las inflexiones del contorno indicadas en un mapa topográfico, son indicadores de la existencia de pequeños canales, que se deben tomar en cuenta, y su frecuencia es una medida de la cercanía de los canales, y por lo tanto, otra razón de su relación con la densidad de drenaje.

La densidad se grafica en una escala logarítmica como se puede observar en la figura A-6. El grupo de puntos localizados abajo a mano izquierda de la gráfica representa un basamento resistente, que puede ser una arenisca masiva. En estos puntos las corrientes están ampliamente esparcidas y la densidad es baja. El siguiente grupo de puntos representa una densidad típica de rocas ígneas y metamórficas sumamente intemperizadas. En el extremo superior a la derecha son puntos de tierras malas donde la densidad es de 200 a 900 millas de canales por milla cuadrada.

El por qué de esta amplia variación, en la densidad de drenaje, es por la sensibilidad del método, lo que nos proporciona un número de gran importancia en el análisis escalar de las formas del relieve. Así, de acuerdo al tipo de sedimentación será mayor su relación con la densidad de drenaje. Una teoría lógica en relación a la densidad de drenaje -

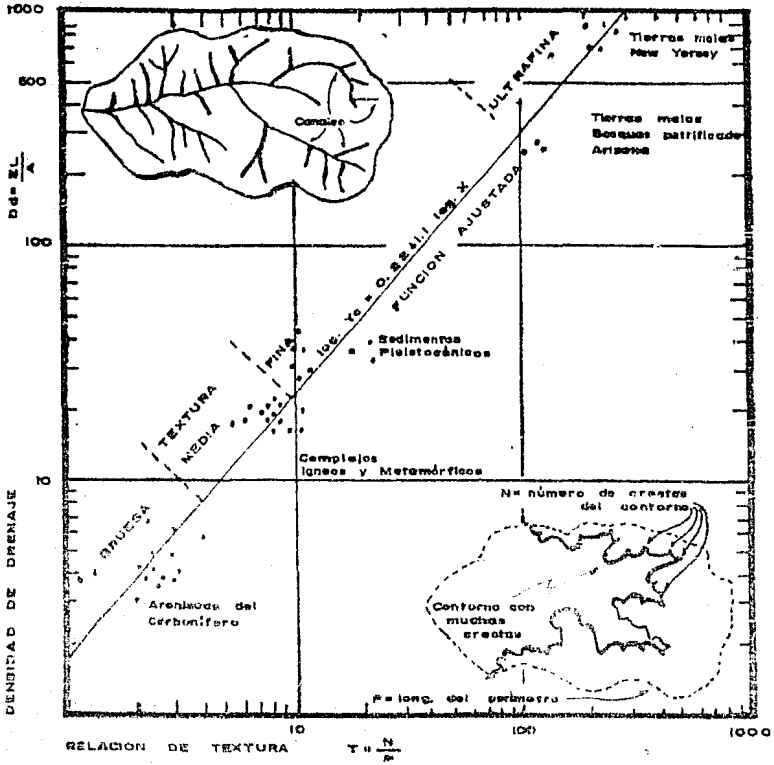


FIG. 4-5 Gráfico que nos muestra la correlación de la densidad de drenaje— y relación de textura, y la presentación de los datos en escala logarítmica. (STRAHLER 1957).

Los valores más altos (4.0 a 6.5) se localizan en la parte sur de la carta, que corresponde a laderas volcánicas y - zonas cubiertas por material piroclástico intemperizado, que han estado expuestos un mayor tiempo a la acción de los agentes exógenos. Lo cual ha permitido una mayor ramificación de los canales.

Hacia el centro se localizan valores intermedios, de 2.5 a 4.0, correspondientes a planicies aluviales y de piroclásticos más jóvenes, que están siendo trabajados rápidamente por las corrientes.

Los valores bajos (2.5 a 1.5) se encuentran hacia el norte de la carta, que es una zona cubierta por coladas de lava y material piroclástico reciente, producto de la erupción--- del Parícutín en 1943.

Los factores que controlan el modelado del relieve son el clima, la litología y el vulcanismo. Siendo este último el - más importante, por la gran actividad que presenta en la zona, lo que ha dado origen a un relieve joven, cubierto en su mayor parte por material piroclástico y algunos derrames de lava. Esta actividad ha provocado que los agentes exógenos - actúen de una manera menos decisiva en el modelado del relieve.

El mapa de la densidad de la disección del relieve contempla sólo en el plano horizontal el proceso de la erosión fluvial. Un complemento del anterior, es el mapa de profundidad de la disección, que considera los valores máximos de corte vertical por la acción de las corrientes fluviales.

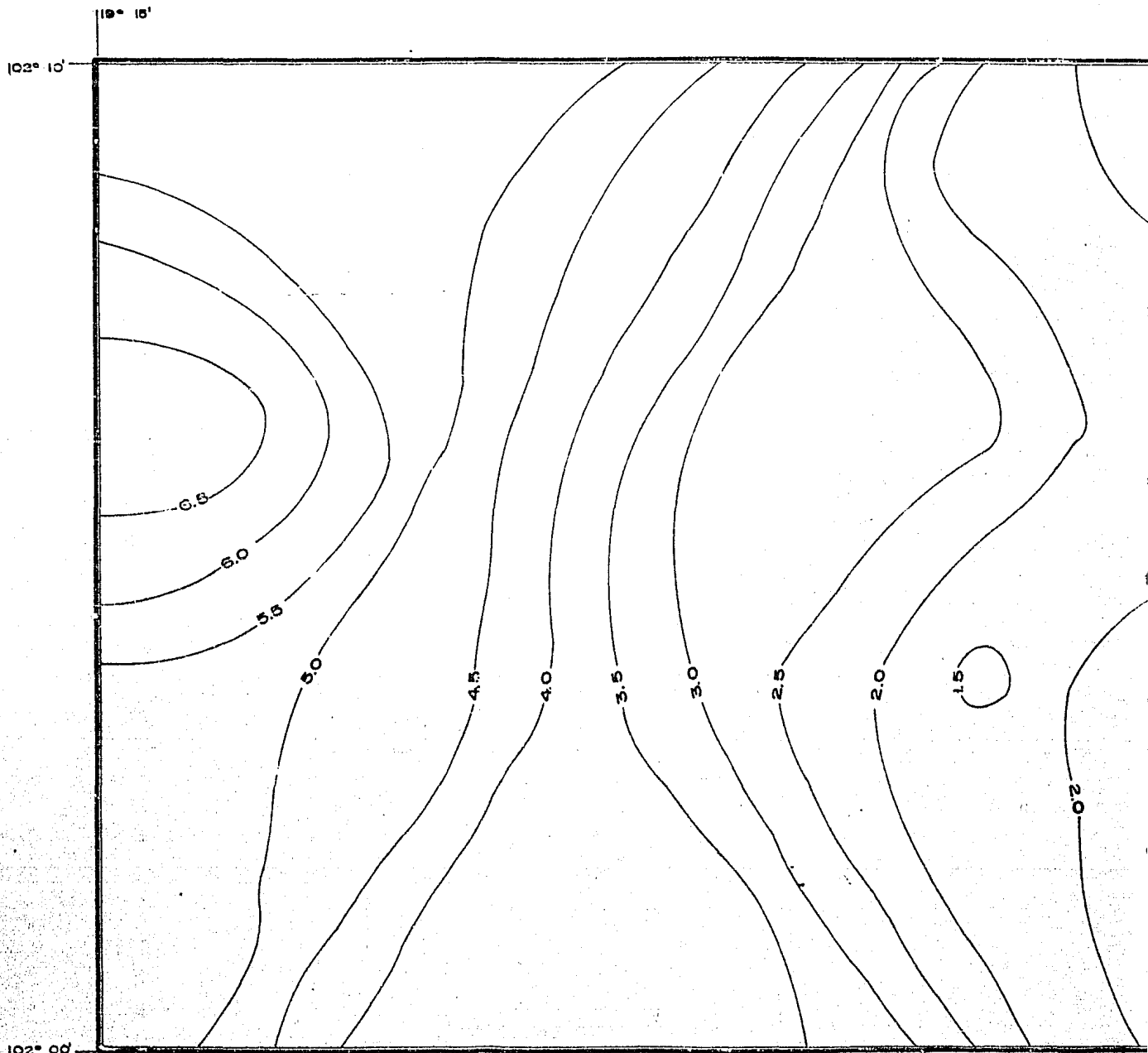
es la predicción de la intensidad de erosión y los cambios - morfológicos que pueden esperarse de acuerdo a la resistencia de las formas del relieve (Strahler, 1957).

Este método de densidad de drenaje fue utilizado originalmente para el estudio de cuencas hidrológicas. Posteriormente se ha aplicado en estudios geomorfológicos en general, no solamente con criterios hidrológicos-geomorfológicos, sino - con otras orientaciones, a la neotectónica, estructura geológica, etc. La longitud de corrientes fluviales por unidad de área expresa no solamente el desarrollo de la red fluvial, - sino además, el proceso de erosión fluvial en el tiempo pasado y el actual.

Por esto, aplicando el método de la densidad de drenaje - con otros fines, recibe el nombre de la densidad de la di- - sección del relieve.

Para ilustrar mejor este caso, se elaboro un mapa de este tipo para la zona de Uruapan, Michoacán (Fig. A-7). El procedimiento fue el siguiente: a) Se marcaron todos los talwegs-reconocibles en el mapa; b) Se dividió éste en figuras geométricas iguales (cuadrados) de 20 km^2 cada una; c) Se midió la longitud total de los talwegs en kilómetros, el valor resultante se dividió por la superficie (20 km^2), y el resultado se anotó en el centro del cuadro; d) Se realizó una interpolación para obtener valores complementarios; e) Se unieron valores cada 0.5 km/km^2 con isolfneas, con lo que el mapa de densidad de disección del relieve queda terminado.

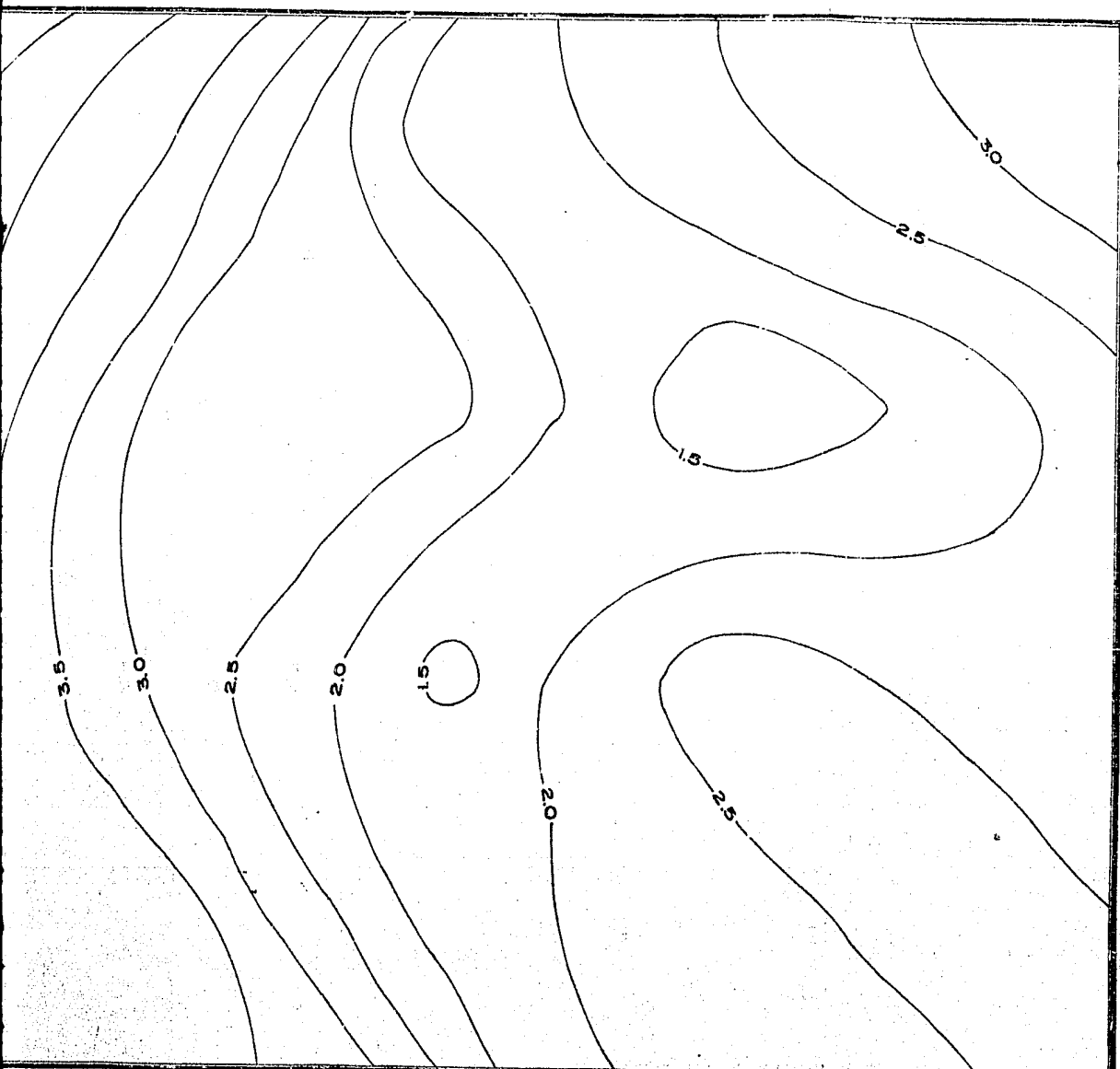
Una breve descripción del mapa es la siguiente.



MAPA DE DENSIDAD DE TALWEGS. (Vq. km. / km²)

19° 30'

102° 10'



n. / km²)

fragmento de la carta 1: 50,000 (SPP 1000)

102° 00'

FIG. A-7

Esta carta se elaboró para la misma zona de Michoacán de la siguiente manera: a) Se subdividió el mapa topográfico en cuadros de área igual a 5 km^2 ; b) En cada cuadro se determinó el valor máximo (en metros) de corte vertical por erosión y se anotó en el centro de cada cuadro; c) Se unieron valores para definir zonas de una categoría determinada. Con esto queda terminado el mapa como se observa en la figura A-8.

Es importante hacer notar que las divisiones utilizadas en los mapas de densidad de la disección y profundidad de disección, en áreas de 20 y 5 km^2 respectivamente, es siguiendo los trabajos realizados por el doctor José Lugo Hubp y el maestro Victor Martínez Luna, investigadores del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

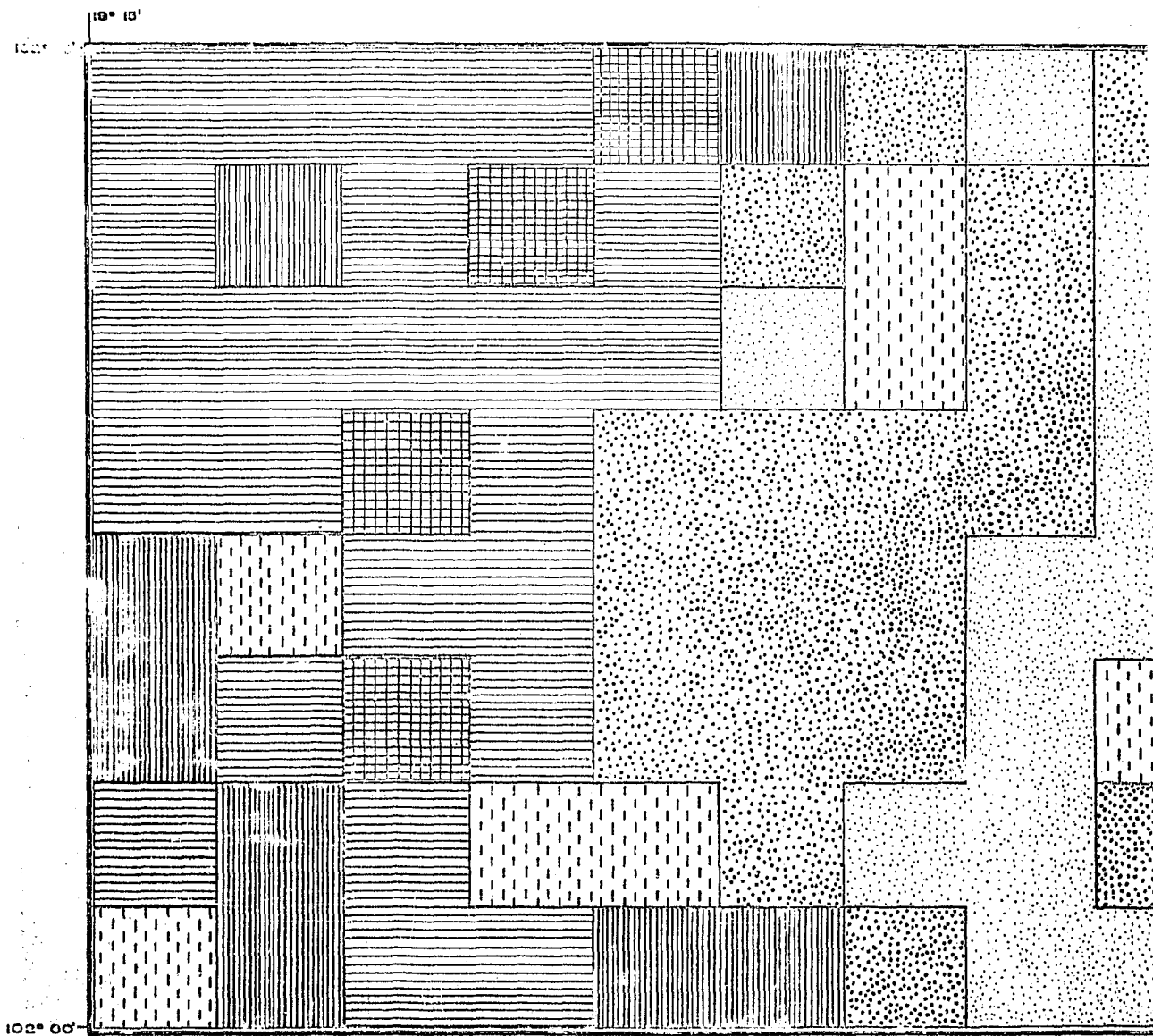
La elaboración del mapa de profundidad de disección de la zona de Uruapan, Michoacán muestra lo siguiente.

Se presentan seis zonas, predominando las de valores menores de 40 m y luego los valores de 100 a 200 m.

La primera zona (0 a 20 m) se localiza en la porción media superior de la carta y representa planicies aluviales y de piroclastos, que apenas disecan las corrientes.

La segunda zona (20 a 40 m) destaca aún mas que la anterior, y ocupa principalmente la parte superior de la carta, también es una zona de material piroclástico, que presenta una mayor densidad de talwegs.

La tercera (40 a 60 m) presenta zonas jóvenes, que debido a la poca resistencia del material piroclástico, y a la alta pluviosidad, están siendo trabajadas con mayor intensidad.



MAPA DE PROFUNDIDAD DE EROSION (Valores en mts.)

fragmento de la cart.



≤ 20



20 - 40



40 - 60



60 - 100



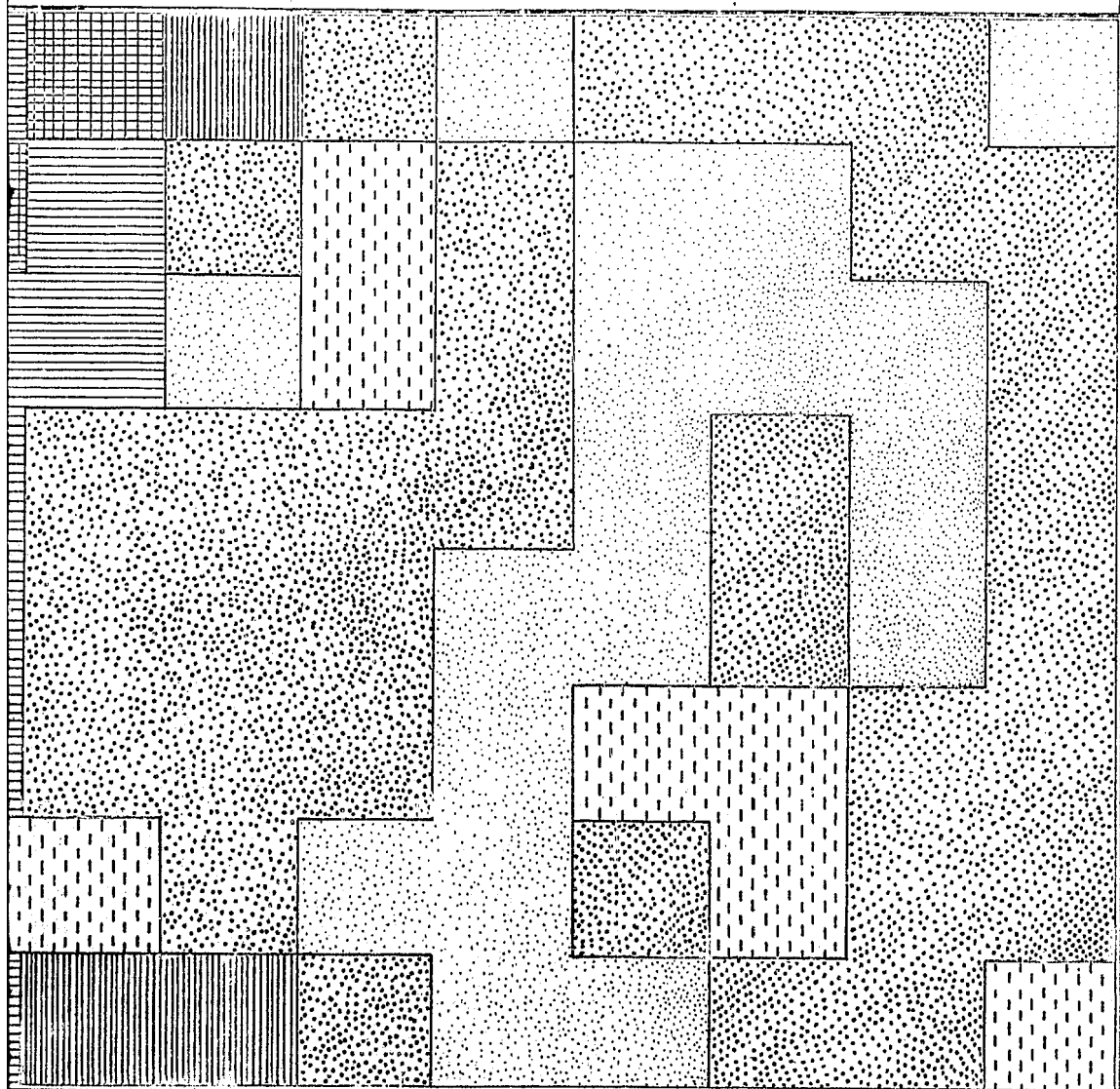
100 - 200



> 200

19° 30'

102° 10'



en mts.)

fragmento de la carta "Urucapan"

Ech. 1:50,000 (SPP 1980)

102° 00'



Δ 200

FIG. A-8

Los valores de 60 a 100 m corresponden a una zona más trabajada, de laderas volcánicas, un poco más antiguas.

La quinta zona de 100 a 200 m, se presenta principalmente hacia la porción inferior de la carta, y que representa zonas más antiguas, trabajadas con mayor intensidad por las corrientes, y que se han visto menos afectadas por las recientes erupciones volcánicas.

Los valores mayores de 200 m son escasos y solo se presentan en algunos puntos aislados en el sur de la carta, donde se han formado barrancas y cañadas.

En esta carta igual que en la anterior, los factores más importantes que controlan la disección son: el vulcanismo, el clima y la litología.

El factor más importante es el vulcanismo, por la gran intensidad con que se ha presentado desde el terciario tardío hasta nuestros días (como puede observarse en la carta geológica), cubriendo el relieve con derrames de lava y material piroclástico, de una manera casi continua.

El clima es otro factor de gran importancia por controlar, en gran parte, las numerosas corrientes que modelan el relieve, debido a la alta pluviosidad de la zona.

Todo esto presenta una zona muy joven, con un relieve de escasos cortes erosivos profundos, pero debido al clima lluvioso, están siendo rápidamente trabajados.

El inverso de la densidad de drenaje es conocido como la constante de mantenimiento del canal, siendo Shumm (1956/cit. por Strahler, 1957) el que por primera vez obtuvo esta cons-

tante. Este trabajo consiste en que una vez obtenidos los -- puntos, se pueden graficar colocando en la ordenada, los valores logarítmicos del área contra los valores logarítmicos de la longitud de las corrientes en la absisa; la pendiente de la recta obtenida representa la constante de mantenimiento del canal. Las longitudes de las corrientes son acumulativas de acuerdo al orden dado e incluyendo los de menor orden; además, de la longitud total de los canales de la cuenca con su orden. La longitud en este caso es proyectada en el plano horizontal del mapa; las verdaderas longitudes deben ser obtenidas aplicando la corrección de la pendiente. Un punto individual dibujado en la gráfica, representa un orden dado de la vertiente. La constante de mantenimiento del canal, junto con las dimensiones de la longitud, además de indicar el tamaño relativo de las unidades del relieve, ayuda a conocer -- un poco acerca de su génesis.

Hidrológicamente, la pendiente general de una superficie dentro de la cuenca, tiene una gran importancia por su relación con los fenómenos de infiltración, escurrimiento, formación de suelos y aguas subterráneas. Este es uno de los factores que más controlan el flujo y concentración del agua de la lluvia en los canales y sobre todo en la magnitud del flujo.

La pendiente puede ser de dos tipos: a) La pendiente general, que puede ser considerada como aquella que se obtiene a partir de una hipotenusa trazada entre los puntos más altos y los más bajos de la cuenca; b) La pendiente media.

De los métodos existentes para calcular pendientes, están los de Justin y Landreth (Horton, 1932).

El primero está basado en la suposición de que la cuenca sea cuadrada, y se obtiene un porcentaje de la diferencia entre el punto vertical más alto y el más bajo, divididos entre el área:

$$S_g = (H_g - H_L) / 5280 M$$

El método Landreth es útil cuando se trata de corrientes encajonadas en cañones estrechos y que desembocan en lagos, se trata de una suma obtenida con relación a diferentes niveles y áreas con respecto a un nivel fijo H_0 y al área total A:

$$S_g = ((H_1 - H_0) / d_1) (a_1 / A) + ((H_2 - H_0) / d_2) (a_2 / A) + \dots$$

Otra medida para conocer el drenaje de la cuenca y su pendiente es a través de la curva de la pendiente media. Este método requiere el uso de un buen mapa topográfico en el cual se pueda determinar con la mayor exactitud el contorno de la cuenca, y una vez obtenido, el problema será determinar el porcentaje o pendiente media de una franja de tierra que se encuentra yaciendo entre contornos sucesivos. Esto puede hacerse midiendo el área de cada contorno con un planímetro y dividiendo esta área entre la longitud del contorno multiplicada por su anchura media.

Entonces, la pendiente media será el ángulo que es la tangente al contorno obtenido, dividido entre su anchura media. Luego, el valor de la pendiente media de cada contorno es anotado en un punto localizado en la cima de la boquilla de-

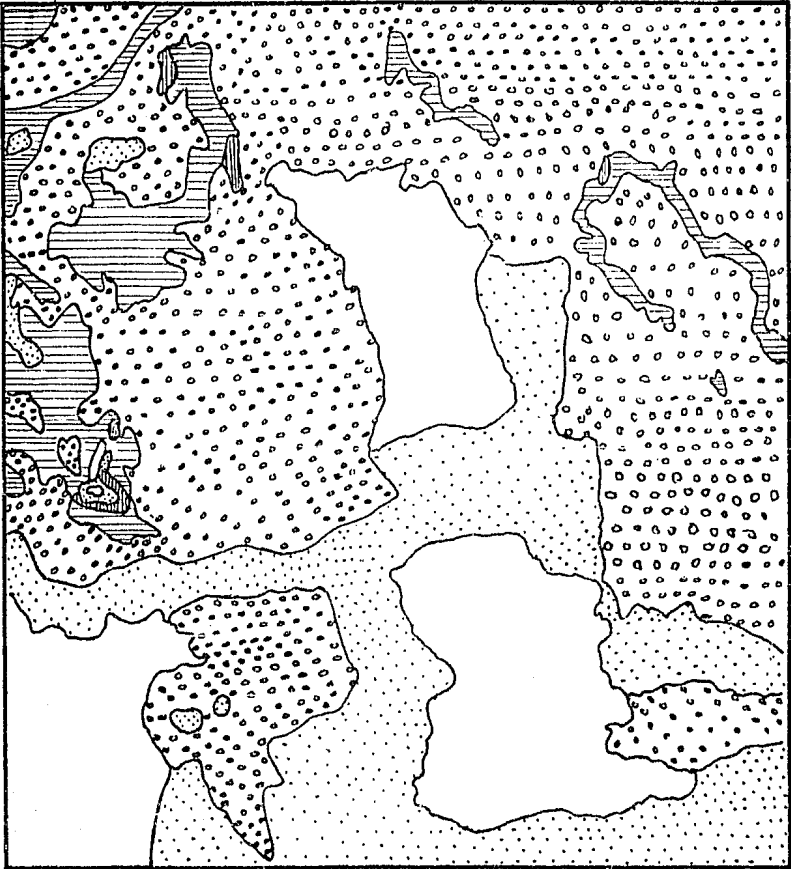
la cuenca. Las curvas de este tipo difieren de una región a otra, dependiendo de la estructura geológica y la etapa de desarrollo del sistema de drenaje. Esta pendiente media de cada contorno se toma en por ciento del total de la superficie del área de la cuenca (Strahler, 1957).

Otra manera de determinar las pendientes sobre la superficie de una cuenca es, a través del mapa topográfico, para elaborar el mapa de pendientes, de la siguiente manera: 1) En el mapa topográfico la pendiente será una línea corta, normal a la dirección del contorno (curvas de nivel), la cual estará determinada por varios puntos alineados. Estas líneas pueden ser marcadas como seños o tangentes, dependiendo de la clase de mapa que se desee. 2) Los puntos obtenidos se unen con isolíneas, obteniéndose una serie de curvas llamadas isotangentes. 3) Las áreas obtenidas entre las isotangentes se miden y se suman las que tienen la misma categoría de pendiente. 4) Se clasifican los límites del porsen taje de frecuencia de la pendiente. Esto se hace con el objeto de obtener las características estadísticas de la pendiente, como son la media, la variación y la desviación estandard, para comparar los resultados con pequeños ejemplos tomados al azar de la misma área. Como ejemplo de este método podemos ver la fig. A-9.

A las líneas sinoidales de igual pendiente de les llama isosinoidales, las cuales también pueden ser dibujadas. Las áreas localizadas, entre las curvas isosinoidales, también pueden ser medidas y obtener sus límites para sacar sus cla-

101°40'

101°35' 18°45'

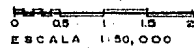


CARTA DE PENDIENTES (FRAGMENTO DE LA CARTA LA HUACANA).

VALORES DE PENDIENTE



Fig. A-9



ses estadísticas, y en base a ellos obtener sus histogramas.

Los valores isosinoidales son designados como los valores g , porque el seno de la pendiente representa la proporción de aceleración gravitacional, que actúa pendiente abajo en una dirección paralela al terreno (Strahler, 1957).

La construcción de mapas de pendientes y la obtención de sus áreas reales son muy laboriosos. Recientes experimentos han mostrado que la misma información puede obtenerse con la prueba de un tiro al azar. Dichos experimentos pueden hacerse al azar y ordenados, según el trato necesario. En el método coordinado al azar, la prueba se aplica con un cuadrado, dividido en 100 unidades de cada lado. De todos los números se toma uno al azar y se dibuja sobre el tamaño de la muestra deseada. Los puntos de prueba son fáciles de tomar, si lo comparamos con las medidas de distribución de frecuencia, obtenidas de los mapas de pendientes.

Chapman en 1952 (cit. por Strahler, 1957) desarrolló el método analizando al mismo tiempo el azimut y el ángulo de la pendiente de los contornos topográficos, aunque basado en métodos petrogenéticos y realizando un amplio análisis geológico; este método puede ser aplicado en la evaluación de cuencas, conociendo al mismo tiempo su pendiente y su orientación.

Shumm ha desarrollado y aplicado la estadística a la razón o coeficiente del relieve, que está definido como la diferencia de elevación entre la boca de la cuenca y su cima; y la longitud de la misma, que es la más larga del drenaje -

de la cuenca. En general, esto de la relación del relieve es sobre todo la pendiente que posee el piso de la cuenca. Este es un número dimensional, fácilmente correlacionable con las medidas que no dependen de todas las dimensiones de la cuenca. La relación del relieve es una simple compilación, que a menudo es fácil de obtener donde la información topográfica es escasa.

Shumm ha graficado la media anual de pérdida de sedimento en acre-pie por milla cuadrada como una función de la relación, en pequeñas cuencas del estado de Colorado, como puede observarse en la figura A-10. Esta regresión significativa - con pequeñas dispersiones, nos provee de un índice útil de la sedimentación y el tipo de roca, si los parámetros climáticos de la zona son establecidos (Strahler, 1957).

Si el incremento de las áreas entre pares sucesivos de contornos, que han sido determinados con un planímetro, es graficado, se formará una curva, que representará el área total de la cuenca, a esta curva se le denomina curva hipsométrica, con la que podemos además conocer el área bajo cualquier elevación. La media ordinaria representada como una curva, probablemente es la mejor determinación posible de elevación media de la cuenca, donde hay un relieve y en la determinación de su hidrología. De la curva hipsométrica la elevación de un 50%, indica un relieve alto, y menos del 50%, indica elevaciones reducidas y por tanto, un relieve bajo. La elevación media es probablemente el mejor indicador de varias condiciones hidrológicas, como la temperatura media y

la duración de las capas de nieve. Las características topográficas de diferentes cuencas hidrológicas, cuando son observadas como una distribución del relieve, pueden ser fácilmente comparadas si la curva hipsométrica es dibujada con las elevaciones en términos de porcentajes, con el total del relieve y las diferencias entre las elevaciones más altas y más bajas de la cuenca (Horton, 1932).

El análisis hipsométrico o relación horizontal de una sección cruzada del área de una cuenca hidrológica con la elevación, fue desarrollada en sus dimensiones modernas por Langebein. Considerando que siempre lo aplicó a grandes cuencas, posteriormente se ha dedicado a aplicarlo a cuencas pequeñas de bajo orden, para conocer mejor la distribución de los cuerpos rocosos desde su parte baja hasta su cima.

En la figura A-11 se observa la definición del análisis hipsométrico, el cual está referido a una escala de dos dimensiones. Hablando de la cuenca hidrológica puede ser limitada por un lado vertical y una base horizontal del plano, pasando a través de la boca con una altura relativa que es la razón de la altura dada en el contorno señalada con "h", que es parte de la altura total de la cuenca "H". El área relativa es la razón del área de la sección horizontal "a" entre el área total de la cuenca "A". El porcentaje hipsométrico de la curva se dibuja como una función continua, relacionada con la altura relativa 'y' y el área relativa 'x'.

Abajo a mano derecha del diagrama de la figura A-11, se muestran varias curvas hipsométricas que representan cada --

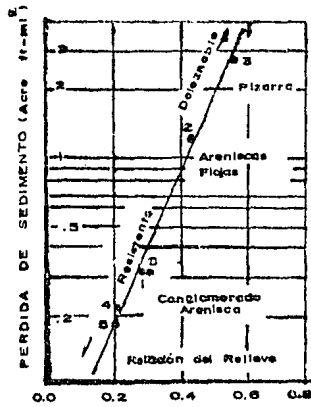
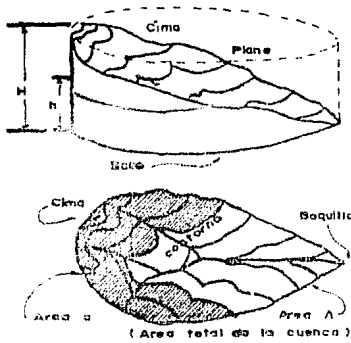
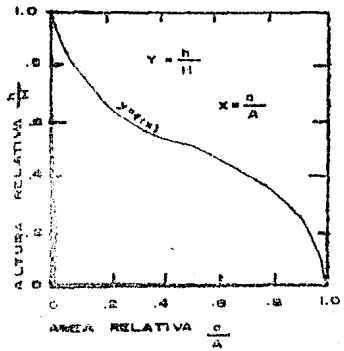


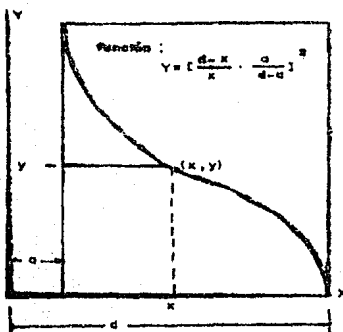
FIG. A-10 Regresión de la pérdida de sedimento en la relación del relieve (BRUMM 1954)



PORCENTAJE HIPSBOMETRICO CURVA:



MODELO HIPSBOMETRICO



CARACTERISTICAS DE LA CURVA DEL CICLO DE EROSION

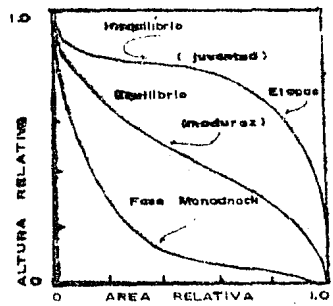


FIG. A-11 Método del Análisis Hipométrico (STRAHLER 1957)

una de las etapas geológicas por las que pasan las capas rocosas, en el desarrollo del drenaje de una cuenca, observando que se tiene un equilibrio en la etapa de madurez (la curva de enmedio de la gráfica) tiende a variar poco en los períodos subsecuentes. La curva hipsométrica posee varias propiedades dimensionales que pueden ser medidas y comparadas con varios propósitos. Esto incluye la integral o área relativa bajo la curva, la pendiente de la curva, el punto de inflexión, y el grado de sinuosidad de la curva. Se ha encontrado que muchas curvas están fuertemente relacionadas con modelos de funciones, como se observa abajo a la izquierda de la figura A-11.

Ahora que las curvas hipsométricas han sido graficadas para cientos de pequeñas cuencas y en una amplia variedad de regiones y climas, es posible observar el alcance de este método. Generalmente las propiedades de la curva tienden a ser estables en capas rocosas homogéneas y tienden a dar la misma curva aunque sean de diferentes ambientes climáticos y geológicos.

Considerando que el desarrollo de las formas bajo procesos exógenos, puede ser manifestado en cambios en la forma de las curvas hipsométricas, este es un índice útil en la descripción de la posible evolución del relieve (Strahler, 1957).

De gran utilidad son los perfiles, para el conocimiento más detallado de las pendientes del terreno. Para los geólogos e ingenieros, tan acostumbrados a manejar las gráficas -

en dos dimensiones, los perfiles son excelentes para dar una idea más clara de las alturas del terreno y su longitud con el perfil longitudinal, dibujado a lo largo del río (Leopold, 1964).

Otra forma de presentar los perfiles son las secciones -- transversales, las cuales nos muestran el corte que han formado, los gradientes de las paredes y la evolución de los valles. Además, el estudio de las diferentes secciones ayuda a conocer los diversos grados de erosión, de acuerdo a la resistencia de las rocas. En el dibujo de secciones se puede -- obtener una evidencia del depósito de materiales aluviales, -- que debe ser corroborado en el campo. Las secciones ayudan -- también a diagnosticar los procesos de corte, además, en algunos casos se pueden observar los restos de elevaciones. -- También se pueden apreciar los diferentes cambios de nivel -- de base de los canales y la reconstrucción de los perfiles -- originales.

La forma de presentar los perfiles de manera que den la -- mayor información posible, es construir el perfil longitudinal y luego trazar una serie de intervalos bien definidos, y obtener secciones transversales al río, como podemos observar en la figura A-12.

Los perfiles pueden ser arreglados de diferentes maneras, por sobreposición para observar de una manera gráfica el relieve que predomina (Figura A-13). El número que se aconseja de perfiles dibujados en la misma gráfica es de 5 ó 6, pues si se dibujan más, el resultado puede volverse confuso. Casi

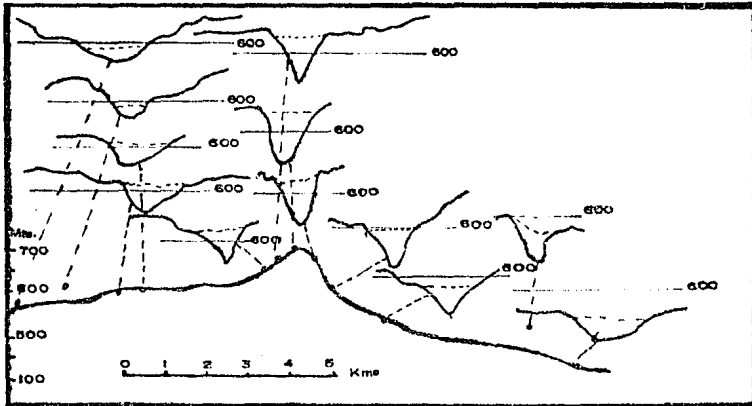


FIG. A-12 Perfil longitudinal y secciones transversales de Chernetz Valley Staffordshire (KING 1966).

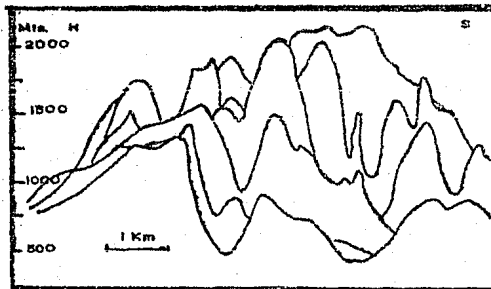


FIG. A-13 Superimposición de los perfiles para conocer el relieve (Newhill Gales Inland King 1966).

siempre resulta una vista panorámica del relieve y su disección. Todo perfil se hace con respecto a una línea horizontal imaginaria, de extensión indefinida, que normalmente corresponde al nivel del mar o a un nivel base (King, 1966).

Las partes más altas del relieve pueden ser el último resto de la formación de superficies de erosión, así como una última expresión de la disección de un valle, en casos como éstos, el relieve puede ser estudiado mediante el análisis altimétrico.

Este método consiste en determinar los puntos más altos y cerrar los contornos del mismo rango. En un mapa 1: 25 000 - las curvas de nivel pueden tener equidistancias de 10 metros, pero si se complica o las curvas se juntan demasiado, pueden tomarse cada 50 metros, siempre y cuando proporcionen una expresión clara del relieve. Los puntos también pueden dibujarse en una gráfica para obtener una curva de frecuencias - (Fig. A-14). La parte donde la curva presenta picos, indica restos de partes altas del relieve, que pueden inferirse al presentarse como un nivel de erosión.

Sin embargo, hay que tener cuidado con este método, pues en algunos casos puede dar resultados engañosos; por ejemplo en una planicie elevada, que sea larga y lisa, que es muy significativa morfológicamente, se contaría con un solo punto que indicará la altura, mientras que si se tiene una serie de cerros cuyos puntos altos pueden tener la misma altura que el de la planicie, el resultado será el mismo. Así -- pues se debe tener cuidado y conocer a fondo la composición-

y evolución de los valles. El principal problema que se presenta por el uso de este método, es su aplicación a áreas niveladas. También al seleccionarse los puntos, algunos no corresponden a la parte más alta de los cerros; además, si los puntos tienden a espaciarse, será una gran área en la que cualquier punto puede ser el más alto. Por eso, será preferible presentar los datos en forma gráfica como en el segundo diagrama de la figura A-14. Así, este método será preferible al primero y los resultados podrán compararse. La red del mapa proveerá de un método conveniente para obtener uniformemente espaciados los puntos. Este método consiste en anotar en cada cuadro los puntos más altos y dibujar el número de puntos contra la altura.

O.T. Jones (1951/cit. por King, 1966) llevó este método a una etapa más amplia. Él había notado que los puntos más altos en cada kilómetro cuadrado, y cada 10, eran trabajados sin la elevación media y la desviación estándar, por lo que al hacer sus estudios sobre Gales, decidió al obtener los datos, sacarles sus tendencias estadísticas, con lo que la altura media de los cuadros adyacentes variaba sistemáticamente, sugiriendo un combamiento de la superficie de la tierra, que resulto el dato más importante obtenido mediante este análisis. El cálculo de la desviación estándar de las alturas de cada cuadrado, sin fijar un nivel, tendía a incrementarse hacia arriba a la vez que la disección se hacía más marcada. Una de las obvias desventajas del método del análisis altimétrico, es que si se toman solamente en cuenta

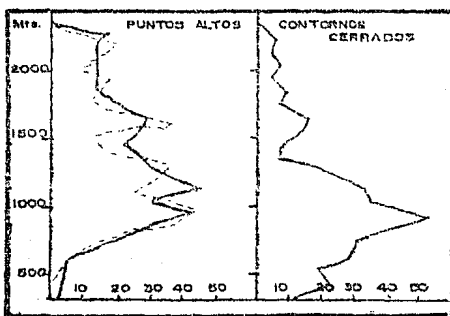
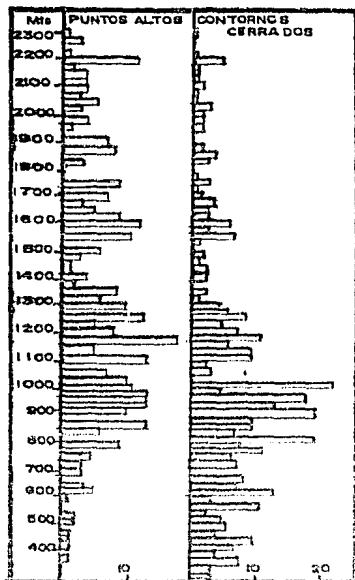


FIG. A-14 ANALISIS ALTIMETRICO
(HOWGILL FELS, KING 1968)

pequeñas porciones del total del área del relieve, puede dar mucho más prominencia a la disección de una superficie del relieve, siendo más incompleto al carecer de la dirección de la disección y no tomar en cuenta el área entre las alturas-dadas.

B) Morfogénesis

Para comprender el relieve actual es necesario clasificarlo en formas, definidas a la vez por su origen. Esto es la morfogénesis.

El relieve terrestre es el resultado de dos fuerzas contrarias, unas que construyen las formas y otras que las nivelan. De esta manera, se tienen los dos procesos que originan el relieve, los procesos endógenos o internos y los procesos exógenos o externos.

Los procesos endógenos producen las irregularidades fundamentales del relieve que son la fuente de energía potencial de los procesos exógenos. Bajo la influencia del campo gravitacional de la tierra tiene lugar un cambio de la energía potencial en cinética, que es usada en el acarreo del material detrítico, mediante los diversos procesos exógenos. El resultado final de la acción de los procesos exógenos es la nivelación debida al corte de las elevaciones y al relleno de las depresiones. Por esto, los procesos endógenos deben -

ser considerados como creadores de las irregularidades de la superficie terrestre, y los exógenos niveladores. En condiciones muy favorables la velocidad máxima de los procesos -- endógenos y exógenos no es igual, siendo mayor en los procesos endógenos que en los exógenos. Por esto, en los procesos exógenos existen velocidades críticas que al sobrepasar la -- de los procesos endógenos, alteran el estado de equilibrio -- dinámico de compensación, incrementando cambios cualitativos en el desarrollo de los procesos exógenos.

De acuerdo a la interacción de los procesos endógenos y -- exógenos, se pueden diferenciar los siguientes tipos de desarrollo del relieve: un desarrollo conacumulativo, de depresiones particulares, y un desarrollo consedimentario de elevaciones particulares, en una zona de hundimiento y acumulación regional. En condiciones de levantamiento regional aparece un desarrollo condenudatorio y conerosivo de elevaciones particulares (Kostenko, 1975).

La autora citada define condenudatorio como un proceso de levantamiento acompañado por una nivelación por erosión. Consedimentario significa la acumulación en el fondo marino que se encuentra en un período de levantamiento, o sea que es sinónimo de sinsedimentario.

La dirección y velocidad del movimiento determinan el carácter principal y la dirección de los procesos exógenos. -- Así, el hundimiento provoca la acumulación y la elevación la denudación; la denudación planar se produce cuando la velocidad de levantamiento es de poca magnitud durante un desarro-

llo condenudatorio. Un aumento en la velocidad crítica de de nudación planar conduce a una denudación lineal que tiende a condiciones de desarrollo conerosivo (op. cit.).

La mayor parte de las formas del relieve son el producto de uno o más agentes esculptores de la superficie, estos agen tes son principalmente el agua (en sus diferentes formas: su perfiacial, subterránea, oleaje y hielo), el viento y la gra vedad. Atacan las partes expuestas de las grandes masas ro-- cosas, formadas por la elevación y rompimiento de la corteza. No hay parte que sea inmune a este ataque. Tan pronto como -- la masa rocosa es expuesta, empieza a ser atacada por los -- agentes denudatorios. La mayoría de los productos de desinte gración va depositarse al piso del fondo marino, alrededor -- de los continentes, donde los depósitos se pueden llegar a -- consolidar y posteriormente, debido a movimientos tectónicos, pueden ser levantados y formar nuevas montañas, y así, repe tirse el ciclo de levantamiento--destrucción--acumulación-- levantamiento. Este proceso es extremadamente lento y sólo -- es posible concebirlo dentro del tiempo geológico. Así, las-- corrientes y oleajes, que actúan hoy en día, han actuado deg de hace millones de años, para modelar y originar las formas del relieve que conocemos (Leopold, 1964).

Existen tres procesos exógenos principales que son: 1. In temperismo, 2. Erosión (transporte), 3. Acumulación, y los -- agentes son: agua (superfiacial, subterránea, oleaje y hielo), viento, gravedad, temperatura y organismos. En la tabla 1 se resumen los procesos exógenos niveladores del relieve, en --

correlación con los agentes que los provocan y algunas formas resultantes.

El intemperismo, de acuerdo a Gorshkov y Yakushova (1977) es el proceso inicial del ciclo, ya que provoca la destrucción de las rocas en su lugar de origen. Si este proceso encuentra las condiciones favorables para actuar un tiempo prolongado (poca pendiente, clima húmedo, estabilidad tectónica) pueden llegar a formarse capas de materiales no consolidados de fuertes espesores, de decenas de metros, producto de la alteración, sobre todo química, de las rocas. En el caso contrario las rocas se desintegran, principalmente por procesos físicos, en las laderas montañosas y se precipitan por gravedad; no se forma una capa eluvial, lo que es característico de las regiones desérticas y semidesérticas.

Los materiales preparados por el intemperismo son removidos por los agentes (caen por gravedad, por el agua superficial y subterránea, el hielo, etc.). Estos son los procesos erosivos del transporte que se encargan de reducir el nivel de la superficie terrestre, aunque esto no sea siempre una realidad, como por ejemplo cuando hay una actividad endógena que se manifieste con mayor intensidad.

Los materiales transportados son depositados en la tierra firme o en cuencas lacustres o marinas. Así, se completa el ciclo de los procesos exógenos.

Los factores endógenos son aquellos que se encuentran relacionados con la actividad dentro de la corteza terrestre y en el manto superior, y en parte se expresan por la forma---

AGENTE	PROCESO	FORMAS EROSIVAS	FORMAS ACUMULATIVAS
Radiación solar, agua, organismos.	Intemperismo		Suelo, corteza de intemperismo.
Agua superficial	Erosión y acumulación fluvial.	Barrancas, valles erosivos.	Planicie aluvial, conos de deyección, terrazas y deltas
Agua subterránea	Karst o sufosión	Lapiaz, dolinas, uvalas, grutas	Terra rossa, estalagmitas, estalactitas.
Hielo	Erosión y acumulación glacial	Circos y valles glaciales.	Morrenas y Drumlins.
Oleaje	Erosión y acumulación marina.	Cantiles	Barras, playas, tomboles.
Gravedad	Erosión y acumulación coluvial.	Circos de erosión y escarpes.	Conos detríticos y mantos coluviales
Hombre	Erosión y acumulación entrópica	Minas, canteras y tajos	Jales
Agua superficial y hielo	Erosión y acumulación fluvioglacial	Canales fluvioglaciales	Esquers, delantal fluvioglacial.

TABLA I, Agentes y procesos que modelan el relieve y formas que originan. (Tomado de Lugo, 1979).

ción de irregularidades en la superficie terrestre.

Estos procesos se presentan en todas partes, pero su actividad varía de un lugar a otro, dependiendo del régimen tectónico.

Estos procesos que modifican la superficie pueden ser de dos tipos: los tectónicos y los magnéticos. Esta clasificación se usa sobre todo en geomorfología, y es un tanto convencional ya que la actividad magnética es parte de la tectónica, pero se separan porque originan relieves muy distintos.

Los procesos tectónicos originan los plegamientos, rupturas de rocas, así como levantamientos de la corteza terrestre. Los regímenes tectónicos conocidos son los de tipo geosinclinal, cratónico, orogénico y rift (Belousov, 1975), y a los cuales les corresponden determinados parámetros como velocidad, dirección, tipo de magmatismo y metamorfismo, así como desarrollo de formas globales del relieve.

La actividad endógena se manifiesta principalmente en las formas globales o de primer orden del relieve terrestre: los continentes y las cuencas oceánicas, así como en las formas subordinadas: superficies de cratones, sistemas montañosos continentales y oceánicos, etc.

La corteza terrestre se encuentra en una constante transformación, con mayor intensidad en determinadas regiones del planeta. Esto se manifiesta por actividad volcánica, formación de montañas (orogénica), levantamientos y hundimientos (epirogénesis).

La formación de grandes sistemas montañosos va acompañado de plegamientos y ruptura de las rocas, y frecuentemente de metamorfismo y granitización; en ocasiones vulcanismo.

Para explicar toda esta actividad se han presentado diversas teorías, siendo las más importantes: la teoría de la isostasia, la deriva continental y la tectónica de placas.

La teoría de la isostasia o elevación continua de las montañas, supone que éstas se encuentran en equilibrio isostático con relación a las partes circundantes de la corteza. Esto es, que las montañas no son sino las crestas de grandes masas de roca, que flotan en el sustrato, a semejanza de los témpanos de hielo que flotan en el agua. Tal situación requiere de un sustrato de roca, a poca profundidad, que fluya para ajustarse a sí mismo ante el exceso de carga. Esta roca, sin embargo, no necesita ser un líquido en el sentido estricto de la palabra. Podría ser una roca en estado plástico, semejante al de la plastilina, la cual ante un peso se deforma y ajusta al peso que tiene encima.

Así, tenemos que una cordillera con un peso específico en promedio de 2.7 (el del granito) puede hundirse dentro de una capa de roca simática con un peso específico de 3.1, hasta que la cordillera quede flotando con una raíz de aproximadamente nueve décimas de su volumen, mientras que a las montañas les corresponde la décima parte restante (Fig. B-1).

Otra prueba de la isostasia la da Leopold (1964) al hablar sobre los trabajos de Grieg (1954), el cual ha ido computando datos acerca del comportamiento de las montañas y el des-

gaste que sufren, relacionando la erosión y el balance hidrostático o isostático, que al desgastarse la superficie de las montañas las elevan, manteniéndolas a una altura, a semejanza del hielo en agua al irse derritiendo. Si este proceso no ocurriera Grieg nos dice que una elevación de 840 metros podría ser reducida a una planicie en un período de 3.1 millones de años, es decir 2.7 cm (1 pulg.) por cada 100 años.

Pero si por cada 2.7 cm de material retirado hay un levantamiento de 0.42 cm, entonces el total de tiempo requerido para obtener una planicie sería de 1.42 veces o sea 4.4 m.a.

Deriva continental. Ya por el año 1620, Francis Bacon -- discutió la posibilidad de que el hemisferio Oeste había estado unido a Europa y Africa. Unos doscientos años más tarde, Antonio Snider estaba admirado por las similitudes entre las plantas fósiles de América y Europa del período carbonífero (hace unos 300 m.a.), y propuso que todos los continentes -- fueron una vez parte de una única masa de tierra. Su trabajo de 1858 se llamó La création et les mystères dévoilés ("La creación y sus misterios revelados") (Tuzo, 1981). Al final del siglo XIX los geólogos del hemisferio sur colocaron juntos los continentes de este hemisferio de una y otra manera, intentando explicar las formaciones análogas, y es a principios del siglo XX, cuando el geólogo Austríaco Edward Suess los agrupó en una única masa de tierra gigantesca que llamó Gondwana.

La primera teoría general sobre la deriva continental fue elaborada por el meteorólogo Alfred Wegener en 1912. Argumen

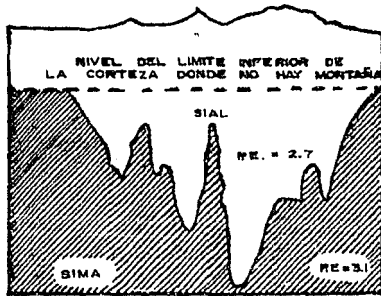


FIG. B-1 - Representación esquemática de las raíces de una montaña (LEET, 1977).

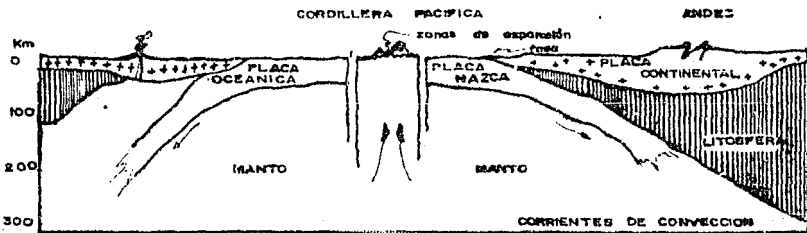


FIG. B-2 - Representación gráfica del comportamiento de las placas de acuerdo a la teoría de la Tectónica de Placas (James 1973 / cita por TUZO, 1981).

tó que si la tierra podía deslizarse verticalmente en respuesta a fuerzas verticales, también podría hacerlo lateralmente. De acuerdo con Wegener, todos los continentes han estado unidos en un único supercontinente hace 200 millones de años, con los continentes del hemisferio norte desplazados hacia el este y encajados contra las costas occidentales de Europa y África y con los continentes del hemisferio sur agrupados en la parte sur de esta "Pangea" (como la llamó). Bajo la acción de fuerzas asociadas con la rotación de la tierra, los continentes se rompieron y separaron, abriendo los océanos Indico y Atlántico (Hurley, 1968/ cit. por Tuzo 1981).

Tectónica de Placas. Este nuevo concepto ha surgido en los últimos años, a consecuencia de los estudios que se han realizado en el fondo de los océanos. Estos nuevos descubrimientos son: la formación constante de un nuevo fondo oceánico y su expansión, estos nuevos datos y las antiguas ideas de la deriva continental se han unido para constituir un solo cuerpo, al que se le ha denominado la teoría de la tectónica de placas. La parte geométrica de esta teoría nos hace ver la litósfera, o capa más externa de la tierra, como constituida por un conjunto de placas rígidas (Fig. B-3). La parte cinemática de esta teoría sostiene que están en continuo movimiento relativo que puede conseguirse porque las dos placas se deslicen una junto a la otra, o bien ambas pueden llegar a converger en cuyo caso una de las dos se destruye.

Las zonas de expansión en el fondo de los océanos se encuentran principalmente a lo largo de las grandes dorsales.

oceánicas, formando los valles de rift, a través de los cuales hay una constante expulsión de material magmático de tipo basáltico, que es la roca que se encuentra formando el fondo oceánico. En estas zonas el material magmático expulsado empuja la placa oceánica contra el borde de la placa continental; como la placa continental es más resistente, la placa oceánica al no poder empujarla, se desliza por debajo, llegándose a meter dentro del manto donde la placa se destruye y es absorbida por el manto, dentro del cual se forman una serie de corrientes de convección. Por un lado se expulsa el material (zona de expansión) y por el otro se absorve (zona de subducción) (Fig. B-2).

Esta teoría es la más aceptada actualmente y explica mejor la formación de los grandes accidentes topográficos, y cómo grandes transformadores del relieve, y a pesar de que aún presenta grandes deficiencias, es la que parece acercarse más a la verdad (Dewey, 1981/ cit. por Tuzo 1981).

El análisis morfogenético del relieve es de gran importancia en los estudios geotécnicos. Viene siendo un segundo paso, posterior a la morfometría, que permite una mejor comprensión del relieve. Se lleva a cabo correlacionando las formas del relieve con la estructura geológica, lo que se facilita mucho a partir de la interpretación de mapas topográficos y geológicos de la zona de estudio.

Los procesos y formas que se mencionan en la tabla 1, son estrictamente de origen exógeno, controlados (tipos e intensidades) por el clima y la topografía. Sin embargo, es muy -

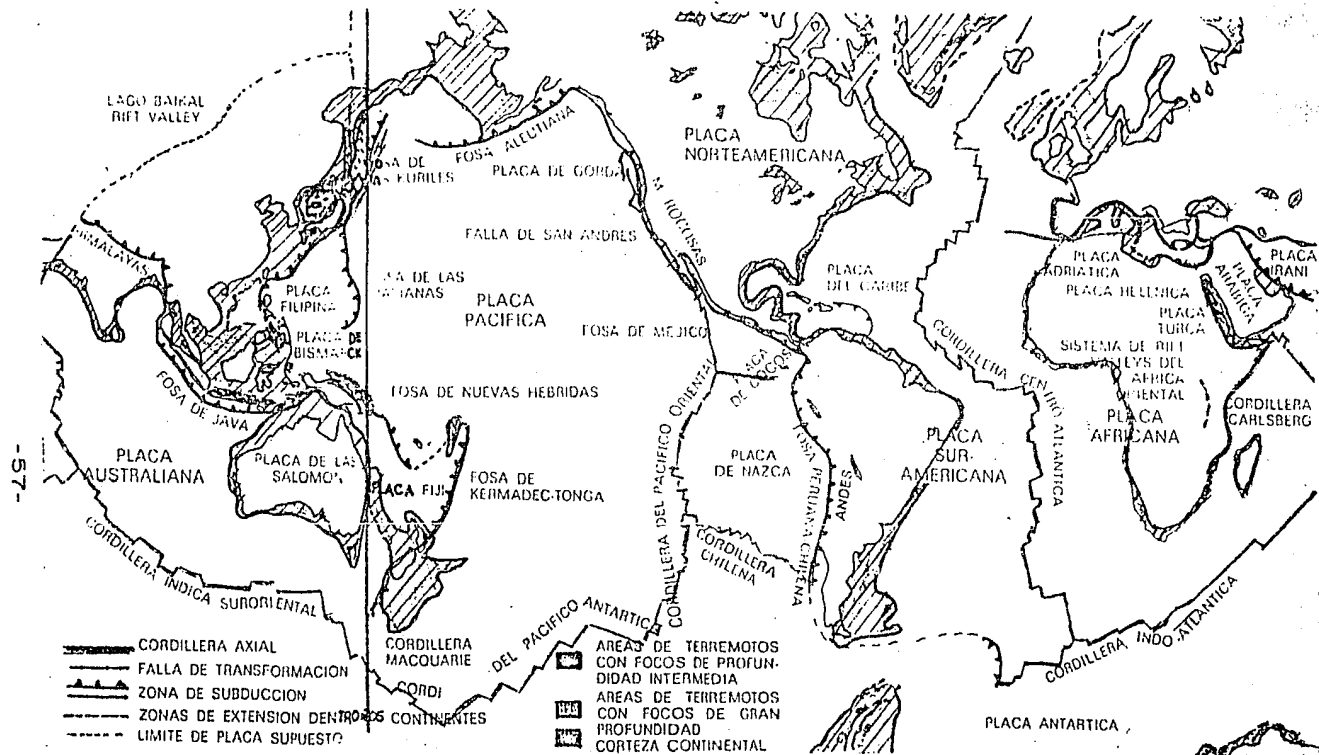


FIG. B-3 — Representación de la corteza de acuerdo a la Teoría de la Tectónica de Placas (S. Dewey 1972/cit. por TUZO, 1981).

común la influencia de la tectónica, que se manifiesta a través del magmatismo, movimiento de bloques, etc.

Si bien es fundamental el estudio de los procesos exógenos en la geomorfología, no deben considerarse en forma aislada, de los endógenos, sobre todo en México, donde la neotectónica ha influido considerablemente en el desarrollo del relieve del país.

En la cartografía geomorfológica se subdividen las formas de origen endógeno y exógeno, en función del proceso que ha predominado en su formación. Se usa también una categoría intermedia de relieve endógeno-modelado, en el cual las formas quedan comprendidas en los dos tipos genéticos principales.

En un mapa geomorfológico es necesario diferenciar los diversos tipos de relieve. En el caso exógeno, estos son:

- a) Fluvial
- b) Kárstico
- c) Glaciar
- d) Marino
- e) Erosivo (o denudatorio)
- f) Antrópico
- g) Lacustre
- h) Fluvioglacial
- i) Fluviomarino
- j) Glacialmarino
- k) Fluviolacustre

Los anteriores se subdividen en erosivos y acumulativos, o sea, destructivos y constructivos. En cada tipo de relieve

se va a encontrar más de una forma característica, por lo -- que es necesario también definir éstos.

La importancia que tiene definir a las formas del relieve en los estudios geotécnicos se puede ilustrar en los siguientes puntos.

1. Las formas del relieve representan bancos de materiales.

Son casos bien conocidos los skers, constituidos por arenas fluvio-glaciares bien clasificadas, muy útiles en la construcción.

Las llanuras de inundación constituidos por materiales finos, al igual que algunas terrazas fluviales son también formas del relieve que pueden explotarse como bancos de materiales. En otros casos pueden ser explotables los depósitos de planicies lacustres por la presencia de diatomita.

La capa eluvial (suelo) que yace sobre el sustrato rocoso puede ser útil también en función de su composición. Esta -- depende del tipo de roca madre y del grado de evolución del intemperismo.

2. Las formas del relieve pueden tener una utilidad en obras de ingeniería.

Toda obra importante de ingeniería exige estudiar el terreno en que se proyecta, con el fin de considerar la transformación que pueda hacerse sobre éste. Un ejemplo de formas del relieve útiles en las construcciones de vías de comunicación son las terrazas fluviales, que por su morfología y -- constitución pueden ser utilizadas en muchos casos. Es común que muchas ciudades se orienten sobre terrazas fluviales, --

frente a un río importante.

Las formas cuyo desarrollo ha terminado y se encuentran en una etapa de estabilidad, como algunos abanicos aluviales y dunas, pueden ser aprovechadas para el trazo de vías de comunicación y asentamientos humanos. El Puerto de Tampico, Tamps. ha crecido últimamente hacia un relieve de dunas inactivas, donde se han levantado importantes construcciones para vivienda.

Las antiguas planicies lacustres ofrecen un relieve que no exige transformaciones del mismo, para las grandes obras de ingeniería, como en la que se asienta la ciudad de Toluca, Edo. de Mex.

Las superficies relativamente amplias y más o menos rectas de parteaguas son favorables también para la construcción de vías de comunicación. Esto se puede observar al occidente de la ciudad de México (laderas arriba del anillo periférico), donde las calzadas fueron trazadas sobre las divisiones que delimitan barrancos profundos.

Son porciones resistentes donde se pueden construir, las antiguas terrazas marinas. Por otro lado, la presencia de formas kársticas puede ser un indicio de riesgo para la construcción.

Las presas se construyen normalmente en valles montañosos profundos y estrechos. Todas las grandes presas construidas con fines de generar electricidad en México son ejemplos claros, por ejemplo: Necaxa, Chicoasén, Itzantún, Cupatitzio, etc.

De acuerdo con lo anterior, la definición de las formas del relieve, es una información útil como estudio preliminar orientado a resolver problemas de geotecnia. Esto se complementa con el análisis de las formas de origen endógeno, y más aún, con el de la dinámica de los procesos.

Las formas endógenas del relieve que normalmente son de interés en los estudios geotécnicos, son las elevaciones y depresiones. Al igual que en el caso del relieve exógeno, son importantes por lo siguiente:

1. Relación con los bancos de material. Es muy común el caso de los conos volcánicos producto de explosiones que son aprovechados como bancos de material. La arena y escoria, también son aprovechados en la construcción.

Otros bancos de material son las masas de roca volcánica-maciza. Su disposición no es casual, sino que se presenta en volcanes, derrames de lava y mesas.

Son muy explotadas las calizas, tanto para la construcción como para la industrialización. Es más económica su explotación cuando se presenta en formas positivas (colinas, montañas, cuevas, mesas, etc.).

Las rocas intrusivas también se presentan en determinadas formas: lacolitos, diques, troncos, etc. Su expresión geológica y geomorfológica puede ser muy variable: un cuerpo intrusivo puede formar una elevación natural del terreno, puede ocupar una depresión o estar oculto.

El aprovechamiento de las rocas para bancos de material se apoya en observaciones geológicas y geomorfológicas.

2. La utilidad de las formas en las obras de ingeniería se relaciona principalmente con la morfología del relieve, lo que se complementa con la estructura geológica.

El tipo de forma y estructura geológica está íntimamente relacionado con la infiltración acuífera. En las regiones volcánicas donde dominan las formas constituidas de piroclastos y derrames de lava del tipo del basalto, la infiltración es intensa. Lo mismo en los relieves de mesas montañosas constituidas por calizas, donde se favorece el desarrollo del karst.

En la geomorfología se clasifican las formas del relieve de origen endógeno en dos tipos principales: las tectónicas y las magmáticas. A las primeras pertenecen aquellas relacionadas con el plegamiento y ruptura de las rocas; su expresión puede ser directa (elevaciones anticlinales, depresiones sinclinales, montañas horst, depresiones graben, escarpes controlados por fallas, etc.).

Las formas magmáticas se refieren a las de origen intrusivo (lacolitos, lopolitos, diques, batolitos, troncos, etc.) y las extrusivas, originadas por una actividad explosiva, extrusiva y efusiva. De cada una de estas, por separado o asociadas, surge una gran variedad de formas del relieve.

El relieve de origen endógeno puede clasificarse de la manera siguiente:

1. Tectónica.

a) Formas disyuntivas (fracturas y fallas con expresión en el relieve).

- b) Domos salinos.
 - c) Deformaciones plicativas.
2. Volcánico

- a) Explosivo (conos piroclásticos, superficies de tefra, ---maares).
- b) Efusivo (derrames de lava, mesas de lava, lagos de lava).
- c) Extrusivo (domos volcánicos).

Es conveniente agregar los tipos y formas del relieve que surgen por procesos endógenos y exógenos:

1. Estructural-erosivo.

- a) Formas del resultado del modelado de las estructuras geológicas (cuerpos intrusivos, pliegues).
- b) Formas originadas del modelado de contactos geológicos.
- c) Formas originadas por la erosión diferencial.

A partir de esta clasificación que complementa a la expuesta en el tema del relieve exógeno, se puede elaborar un mapa geomorfológico básico, sobre todo en escalas 1: 50 000 a 1: 200 000.

Se puede observar el ejemplo de un mapa geomorfológico preliminar elaborado para la zona de Uruapan, Mich.

En este predomina el relieve endógeno originado por volcanismo: coladas y laderas de lava (efusivo), volcanes céntricos, maares (explosivo), coladas de lava cubiertas de piroclásticos (efusivo-explosivo); barrancas (extrusivo: erosivo-fluvial), planicies aluviales y de piroclastos (acumulativo fluvial-volcánico explosivo).

Más que una información aislada, el mapa que se presenta-

expresa una serie de procesos y la secuencia de los mismos -- en la evolución del relieve. Se puede apreciar que una serie de erupciones volcánicas de tipo central, explosivo-efusivas han condicionado en el tiempo (cuaternario) la evolución del relieve. Acumulaciones continuas de lavas y piroclástos han impedido el desarrollo normal de la red fluvial; en la porción oriental del mapa.

En el extremo occidental de la región, domina un relieve de acumulaciones volcánicas, principalmente lavas, disectado por una densa red de barrancos, lo que atestigua que la actividad volcánica ha sido aquí de menor intensidad.

Los métodos morfogenéticos son sólo una etapa del estudio del relieve, la que se complementa con otros, el análisis -- morfodinámico principalmente.

C) Morfodinámica

A diferencia de la morfogénesis, que define el origen de las formas del relieve, la morfodinámica se refiere a los procesos que están actuando hoy en día, no sólo los tipos genéticos, sino las intensidades de los mismos. Esta diferencia es importante porque, una forma originada por un proceso determinado puede estar actualmente afectada por otro distinto.

Seguramente los procesos morfológicos actuales y sus intensidades, son más importantes en las obras de ingeniería que cualquiera de los antes mencionados (morfometría y morfogénesis), sin embargo, un buen conocimiento de los anteriores lleva a una mejor comprensión e interpretación de este último. Se trata en sí, de una secuencia en el estudio del relieve: morfología (incluyendo morfometría) -génesis- dinámica.

Normalmente se toman en cuenta los procesos exógenos como parte esencial de la morfodinámica. No es conveniente tratarlos por aislado de los endógenos, sobretodo cuando se trata de regiones con manifiesta actividad tectónica o volcánica, -

como ocurre en gran parte del territorio mexicano.

La actividad interna que llega a tener expresión o influencia en el desarrollo del relieve en tiempos históricos puede ser de los tipos siguientes:

1. Volcanismo.

El nacimiento de volcanes o su reactivación, es un fenómeno bien conocido por las observaciones que se han hecho tan solo en nuestro siglo en muchas zonas de la tierra, como el Pacífico Occidental, Estados Unidos (Santa Elena), México (Popocatepetl, Parícutín, Volcán de Fuego de Colima, Chichón), Centroamérica, Unión Soviética (Kamchatka), Islandia, etc.

Los procesos explosivos y efusivos, característicos de las erupciones volcánicas provocan cambios bruscos en el relieve terrestre, alteración de los procesos exógenos como disminución de la erosión fluvial, incremento de procesos gravitacionales y en ocasiones presencia de nuevos procesos como glaciares y lagos. Naturalmente el volcanismo es un verdadero riesgo para el hombre.

Un estudio geomorfológico aplicado a la geotecnia, en una región volcánica potencialmente activa, debe tener muy en cuenta el tipo de volcanismo dominante (basáltico, de nubes ardientes, freático-magmático, etc.), porque esto define la magnitud del riesgo.

Son bien conocidos en México los casos de las erupciones recientes del Popocatepetl, Volcán de Fuego y Chichón, además del Parícutín. Es importante que en México se dé más importancia a los fenómenos volcánicos, por las grandes exten-

siones en que se presenta y el riesgo permanente de erupciones o nacimiento de volcanes.

2. Movimientos tectónicos.

Actualmente se ha establecido que en amplias regiones de la superficie terrestre tienen lugar movimientos de levantamiento, hundimiento o desplazamiento horizontal. La península de Baja California es considerada como un bloque que se aleja del continente con velocidades de hasta 6 cm/año. En las regiones cratónicas de Norteamérica, Asia y Europa se han calculado movimientos de levantamiento de velocidades promedio de unos pocos milímetros a más de un metro por siglo. Estas son velocidades aparentemente insignificantes en relación con la geotecnia. Pero hay que considerar que un desplazamiento de esta magnitud puede alterar el gradiente de un canal, debilitar la cortina de una presa o provocar la migración de la línea de costa en el tiempo histórico.

La geomorfología es una herramienta fundamental para interpretar la presencia de movimientos de este tipo. Es precisamente a partir del análisis morfológico, morfológico y morfo-genético que se infieren estos procesos. Un ejemplo muy claro lo proporciona Jain (1980), como se observa en la Tabla 2.

Otro tipo de movimientos tectónicos son los que originan desplazamientos de bloques a lo largo de rupturas (fallas) en la porción superior de la corteza terrestre.

Las fallas son importantes en las obras de ingeniería, porque un desplazamiento puede afectarlas considerablemente. Especialmente son peligrosas en las cortinas de las presas y

TABLA 2

Indicios geomorfológicos de movimientos recientes y actuales (JAIN, 1960).

	Elevaciones	Hundimientos	Fracturas
V	Estrechamiento de los valles y de las terrazas hasta la desaparición de estas últimas.	Ensanchamiento de los valles y de las terrazas.	Troncos rectilíneos de los valles fluviales, - meandros bruscamente acodados.
N	Disminución del espesor del aluvión (en el lecho, hasta cero); la predominancia de las fractas de cauce. Aumento del contenido de grandes fracciones y de los minerales pesados. Aumento del número (desintegración) y - de las alturas relativas de las terrazas ero sionadas o de ascenso. Aumento del declive de el corte longitudinal del cauce. Disminución de la simetría (rectificación de los meandros). Meandros encañados.	Aumento del espesor del aluvión en comparación con el normal, preponderancia de las fracciones de valle somedado y aparición de las fractas de valle viejo. Disminución del contenido de las fracciones de granos gruesos y de los minerales pesados. Disminución del número (confusión) de la terrazas y de sus alturas relativas; las terrazas bajas se pueden ausentar más abajo del nivel del río; terrazas acumulativas. Disminución del declive del cauce. Intensificación de la simetría; meandros libres.	adelgazamiento representativo del estrato aluvial hasta su desaparición - absoluta.
L	Bajada de los niveles medio anuales del agua en el río.	Ascenso de los niveles medio anuales - del río.	Cambio brusco de las alturas relativas de las terrazas.
A	Valles entrecortados y suspendidos.	Dibujo centrípeta de la red fluvial (y de barrancos).	Aumento brusco del declive del cauce, cascadas (al no se concilian por la litología).
P	Diseño centrífugo radial de la red fluvial (y de barrancos).	Desbalanceo de los ríos en dirección de las depresiones en desarrollo.	Disposición de los afluentes en una sola línea.
C	Curvas fluviales, que conforman la elevación.	Disposición de las formas kársticas inferior a la base de elevación actual (karst espultado).	Fuertes resistencias del cauce del río a serrosos.
E	Deslizamiento del valle (el río derrubia la elevación a sus está continuando el mismo circunferencial local).	Ascenso del nivel de las aguas freáticas, causante del empantanamiento en condiciones de clima húmedo y de la formación de saladeros en condiciones de clima árido.	Desproporciones y desplazamientos del suelo - sincrónico.
S	Niveles de los huecos kársticos elevados por encima del nivel fluvial contemporáneo.	Los lagos y pantanos se desplazan en dirección de los hundimientos.	
O	Descaen el nivel de las aguas subterráneas, que contribuyen en las zonas de clima húmedo mojado a la repoblación forestal.	Posición baja anómala de las antiguas - líneas de nieve.	
I	Los lagos y pantanos se desplazan por las elevaciones.	Fusión de las superficies de afloramiento, transmutación de las de denudación en acumulativas.	
D	Alta posición anómala de las líneas de nieve antiguas.	Disminución de la profundidad de los encajes erosionales; rarefacción de la red de barrancos y reducción de la accidentalidad del relieve en su totalidad.	
S	Recalcomiento de las superficies de afloramiento.	Proeminencia de la abrasión intensiva, retrocediendo la línea costera tierra adentro (a condición de que existan bastantes fuentes de material detrítico y de que la costa está constituida por rocas de poca resistencia) con motivo de esto los risachuelos tienen desembocaduras colgantes.	
R	Abandono de los espacios erosivos, aumento de la densidad de la red de barrancos y de la accidentalidad del relieve en conjunto.	Costas acantiladas.	
O	Reducción de la acumulación, transgrediendo de la línea costera en dirección al mar (a condición de que existan suficientes fuentes de material detrítico y de que la costa está constituida por rocas no demasiado blandas).	Falta de terrazas abrasivas subacuáticas - micidantes expuestas.	
L	Disfusión de los acantilados desaparecidos o en desaparición con anchas playas delante de ellos.	Huellas del relieve (morfónico y otras) - y de la vegetación (turbales, bosques) inundados en la zona litoral del mar. Benches de bloques subterridos.	
T	Vasto desarrollo de las terrazas abrasivas subacuáticas.	Cordones costeros descendientes, de una manera consecutiva, tierra adentro.	
C	Nichos de abutamiento de las cotas elevadas sobre el límite superior del oleaje.	Terrazas (líneas costeras) subterridas bajo el actual nivel del mar.	
A	Cordones costeros sucesivamente ascendentes tierra adentro.	Estuarios y deltas fluviales de dimensiones decrecientes o estables (aunque como de dimensiones crecientes en caso de que el aporte de material detrítico supere el tamaño del hundimiento tectónico).	
S	Terrazas (el ascenso de las cotas relativas en tramos aislados del litoral indica una elevación diferencial).	Transgresión de las barras de arena a las costas lagunares, desecación de las lagunas.	Variedad brusca de las cotas relativas de las terrazas (fractura perpendicular a la costa).
N	Deltas fluviales de dimensiones crecientes - (en el caso de que este aumento no está originado por un aporte del material detrítico en proporción a la magnitud del hundimiento tectónico).		
L	Ensanchamiento de las barras de arena en las costas lagunares, desecación de las lagunas.		

puentes.

Por medio de la geomorfología también se pueden inferir la presencia de fallas (además de la información geológica y geofísica). Las relaciones principales entre las fallas y el relieve, de igual forma se pueden observar en la tabla 2.

3. Sismos

La sismicidad es otro de los fenómenos endógenos que no puede aislarse de los estudios geomorfológicos aplicados a la geotecnia. La información sismológica existente ha definido en todo el planeta zonas sísmicas, penisísmicas y asísmicas. Asimismo, en las dos primeras hay diversos grados de intensidad.

Para el ingeniero este es un problema fundamental, porque el grado de intensidad de los sismos potenciales, le permite calcular las obras. Tenemos el ejemplo de la ciudad de México, donde existe un reglamento para que las construcciones cumplan con mínimos requisitos de seguridad.

Los sismos han llegado a tener influencia en el relieve, en su morfología y sobre los procesos exógenos. En el primer caso han provocado la formación de grietas, levantamientos o hundimientos de bloques, de hasta 1-5 m. Sin embargo, esto ocurre en casos excepcionales.

Algunos sismos provocan derrumbes de grandes magnitudes, aludes, corrientes de lodo, etc. Por esto, desde el punto de vista geomorfológico es conveniente considerar la sismicidad en relación con la influencia que pueda ejercer en el relieve a través de procesos exógenos como los mencionados.

4. Tsunamis

Los tsunamis son olas marinas de gran magnitud con un alto poder de destrucción. Normalmente se originan por sismos o --volcanismo. Las zonas donde han sido relativamente frecuentes se encuentran en el océano Pacífico. Los tsunamis son proce--sos exógenos (marinos) provocados por un fenómeno endógeno.

Los procesos exógenos tienen un interés mayor en la geo--tecnia ya que representan una continuidad y expresión de mag--nitud distinta de los endógenos. Todos los procesos tienen --relación directa con la geotecnia y en los estudios de este --tipo es necesario determinar los siguientes parámetros.

a) La naturaleza del proceso actuante (fluvial, glacial, có--lico, etc.

b) Su expresión en el tiempo (permanente, estacional, ocasion--nal, etc.). Esto se determina con precisión a partir de obser--vaciones repetidas en el tiempo que permiten establecer una --secuencia aproximada. Por ejemplo, las crecidas normales de --los ríos se producen cada año en el verano y el otoño (caso --concreto, los de la planicie costera de México, hacia el ---Atlántico), pero las crecidas extraordinarias que llegan a --inundar ciudades se producen cada 10 ó 15 años.

c) Su intensidad. Todo proceso exógeno es actualmente medible de lo que se ocupa la geomorfología cuantitativa moderna --que se ha desarrollado en los Estados Unidos e Inglaterra. La velocidad del viento, de las corrientes fluviales, glaciares, etc. Esto no es del todo novedoso, como la determinación del proceso de erosión en sí, o sea, de dirección. Se han hecho --

numerosos estudios para establecer la velocidad del crecimiento de los barrancos (cárcavas), de profundización de los valles fluviales, de retroceso de la línea de costa, etc. Al mismo tiempo, los procesos contrarios de la acumulación se miden lo mismo en las planicies abisales de los océanos que en los conos de deyección y en los deltas.

Todo lo anterior es naturalmente fundamental en la geotecnia, ya que las modificaciones del relieve se producen a la vista del hombre. No siempre es posible evaluar matemáticamente un proceso, razón por la cual se clasifican en intensidades relativas (erosión fluvial débil, moderada, intensa, etc.).

A continuación se mencionan los principales procesos exógenos niveladores del relieve.

1. Fluviales. Tanto la erosión, como la acumulación fluvial son muy importantes en los trabajos geotécnicos. La erosión fluvial contribuye a la profundización de valles y al avance de sus cabeceras. Es de especial intensidad en los barrancos (cárcavas), donde alcanza incluso más de 10 metros por año el avance del escarpe de la cabecera.

La socavación que lleva a cabo el agua en la base de las laderas del valle fluvial puede conducir a derrumbes.

La acumulación fluvial es un fenómeno benéfico, ya que favorece el desarrollo de suelos para la agricultura. Por otro lado, las inundaciones que ocurren paralelamente, son un riesgo para los asentamientos humanos.

Los conos de deyección activos representan un alto riesgo

para las construcciones, ya que su crecimiento se produce normalmente a partir de corrientes de lodo potentes y súbitas. - En el caso de estas formas del relieve, al igual que los meandros, se producen con frecuencia cambios bruscos espaciales, - migrando unos y otros.

Los deltas tienen con frecuencia un avance considerable hacia el mar, al grado que construcciones portuarias han quedado aisladas de la tierra firme.

Sobre los procesos fluviales nos podríamos extender en forma muy amplia, hay que recordar un trabajo clásico sobre el tema, de Leopold et al (1964) y muchos más. Es suficiente con insistir que los procesos fluviales deben ser considerados meticulosamente en los estudios geotécnicos.

2. Gravitacionales. Al igual que los anteriores tienen una estrecha relación con la geotecnia, por lo que han sido objeto de estudios minuciosos, sobretodo en la segunda mitad de nuestro siglo. Los procesos lentos y los rápidos pueden provocar alteraciones considerables en el relieve, y en muchos casos, afectar obras de ingeniería como presas, vías de comunicación, poblaciones, etc.

Determinar el tipo de proceso gravitacional actuante o potencial, su magnitud y extensión espacial es un objeto de los estudios de geomorfología aplicada a la ingeniería civil.

3. Glaciales

La velocidad de desplazamiento de los glaciares, de la acumulación en sus frentes, de la relación diaria y anual de fusión-congelamiento, etc., son parámetros importantes en el --

estudio de los procesos glaciares. Con estos se relacionan los fluvioglaciares y fluviales. Estos últimos, son originados principalmente por el deshielo. Además los procesos gravitacionales siempre están asociados a los glaciares montañosos.

Las zonas afectadas por estos procesos son objeto de estudios constantes, por su aplicación, sobre todo en la geotecnia. No es el caso de México, donde los glaciares se forman en las cumbres de los grandes estratovolcanes y su proceso de erosión-acumulación se reduce lejos de todo núcleo humano. Sin embargo tienen importancia por ser una rica fuente de alimentación hídrica.

4. Éolicos. Se trata de otro tipo de proceso nocivo, sobre todo la acumulación que afecta considerablemente al hombre, ya que los depósitos éolicos a través de las formas móviles de los desiertos, de las playas, etc., cubren vías de comunicación, tierras de cultivo e incluso casas habitación. Es fundamental estudiar al proceso en función de su velocidad, dirección, volumen, área que cubre, secuencia, etc.

5. Kársticos. El fenómeno de la disolución de las rocas en el subsuelo tiene una estrecha relación con obras de ingeniería como presas y vías de comunicación, porque representa zonas de gran infiltración y en ocasiones de debilidad que pueden convertirse en colapsos.

6. Marinos.

Los procesos de erosión y acumulación marina son los más complejos de todos los exógenos. A esto se debe que en la

actualidad exista una gran cantidad de obras publicadas sobre este tema. Es natural que sea de importancia el conocimiento de la dinámica actual de la corteza, retroceso o avance de la línea de costa, erosión o acumulación en el litoral (velocidad y dirección), etc.

Estos son los principales procesos exógenos que se relacionan con la geotecnia. Su estudio hoy día ha rebasado el carácter puramente descriptivo que fue característico a principios de siglo y se ha pasado a la etapa cuantitativa y cartografía muy detallada. Además, es común que en el estudio de una zona sea necesario considerar una amplia gama de parámetros, además de los topográficos, geológicos, el tiempo, el clima, el suelo, la vegetación, el balance hidrológico, la influencia del hombre, etc.

Para el análisis de los procesos geomorfológicos actuales son convenientes los materiales cartográficos y fotográficos de distintos años, con el fin de evaluar la dinámica evolutiva del relieve. Asimismo, las observaciones de campo deben realizarse con mucho detalle. Por esto la cartografía debe realizarse a una escala 1: 25 000 a 1: 10 000, en algunos casos hasta 1: 5 000. En escalas más pequeñas que 1: 25 000 es posible definir zonas donde predomina un proceso determinado, pero que no es exclusivo. En este caso es conveniente diferenciar no sólo los tipos de procesos, sino sus intensidades relativas.

El análisis de los procesos morfogenéticos permite no sólo evaluar su magnitud actual, sino también dar un pronóstico

sobre su actividad futura. De aquí puede elaborarse una carta de riesgos que defina los tipos y alcances de éstos.

De acuerdo con todo lo anterior, la morfodinámica es el tipo más importante de análisis del relieve en los estudios de geomorfología aplicada a la geotecnia, pero éstos son la etapa final de los análisis morfométricos y morfogenéticos. Resalta aquí la importancia de la unidad y relación estrecha de una serie de métodos de estudio, al igual que todos los fenómenos de la naturaleza.

Aplicaciones de la Geomorfología a la Geotecnia.

Todo lo tratado en los temas anteriores pone en claro cuál es la importancia de la geomorfología en los estudios geotécnicos. Es importante considerar lo estrictamente geomorfológico, con métodos bien definidos, aparte de los geológicos, aunque siempre en estrecha relación.

La geomorfología y sus métodos son útiles en los trabajos de geotecnia, principalmente en lo siguiente.

1. En el análisis de la morfología del relieve.
2. En la determinación del origen de las formas del mismo (lo que se apoya en la geología).
3. En el análisis del tipo de procesos morfogenéticos actuales y sus intensidades.
4. En la interpretación de la evolución del relieve en el tiempo y el pronóstico de su futuro desarrollo.

Todo esto, junto con los estudios geológicos y de otro tipo llevan a las recomendaciones sobre el sitio elegido

para la construcción de una obra:

- a) Condiciones muy favorables que requieren pocas o ninguna - modificación del relieve.
- b) Condiciones desfavorables que no impiden la construcción - pero que exigen modificaciones sustanciales.
- c) Condiciones muy desfavorables que impiden la construcción.

A) En la construcción de presas

El proyecto y construcción de una obra hidráulica, implica una serie de problemas derivados de la realización de la estructura principal, la cortina, que en ciertos casos puede ser de importancia vital para el desarrollo del programa de ejecución, o bien, para la subsistencia del conjunto. Algunos de estos problemas, al no ser correctamente evaluados en la etapa de diseño, han generado retrasos importantes en la construcción; otros no previstos, como el deslizamiento masivo de laderas en el embalse, han puesto en peligro la presa, la carencia de un registro prolongado de escurrimiento fluviales y de precipitaciones pluviales, ha motivado obras de exedencias inadecuadas, causa algunas veces de la destrucción de la cortina, y en otras, más afortunadas, la ampliación posterior de la estructura.

El estudio correcto de estos problemas se puede lograr mediante un conocimiento exacto del comportamiento del relieve,

el cual nos dará los principales patrones de movimientos tectónicos, erosión, deslizamientos y patrón de drenaje, con lo cual se podrá planear la duración de la vida activa de la obra, los trabajos de mantenimiento a realizarse a corto y a largo plazo y los problemas de construcción que pueden presentarse en el terreno.

La presa es una obra construida a través del curso de un río para almacenar o derivar sus aguas. Se construyen presas para crear un lago artificial o derivar un río a una cota prefijada, con el objeto de almacenar o captar los escurrimientos y regar tierras o generar energía, o bien, dotar de agua potable a poblaciones o centros industriales. También sirve para regularizar el flujo de una corriente que provoca inundaciones en predios o poblados. Dichas estructuras no siempre responden sólo a una de las finalidades antes enumeradas, sino también se proyectan para funciones múltiples coordinando los servicios de riego, electrificación y regularización de avenidas, con miras a un desarrollo integral de la región (Marsal y Reséndiz, 1983).

De lo anterior se infiere que, la presa es el resultado de un estudio general, en el que intervienen las características del río, la geología de la región, la existencia de sitios apropiados para crear el embalse y cimentar la obra, de tierras de labor o necesidades de energía en la región, o bien, de poblaciones que proteger o dotar de agua. En lo que se refiere a la presa propiamente dicha, los estudios generales comprenden la selección del tipo de estructura, la disposi---

ción preliminar de las partes integrantes (cortina, obra de toma; vertedor, desvío, casa de máquinas, etc.), y una estimación global del costo. Finalizada la fase de planeación y anteproyecto se procede al estudio detallado de la obra, cuya finalidad es elaborar los planos de construcción. Tanto esta etapa como la primera, se apoyan en trabajos de diversa índole: topográficos, geológicos, hidráulicos, estructurales y de resistencia de materiales, incluyendo los de mecánica de suelos y rocas. La utilidad de la inversión depende del cuidado con que se realicen estas investigaciones. No son pocos los casos en que se ha tenido que abandonar una obra parcialmente terminada por falla fundamental en algunos de los aspectos -- antes citados, y es frecuente el incremento de las inversiones por cambios imprevistos en el proyecto durante la construcción; sin embargo, hay imprevistos que deben imputarse a lagunas en el conocimiento actual de los problemas que la naturaleza plantea a estas obras.

Los estudios geomorfológicos que se hacen, relacionados con la construcción de una presa son muy variados y dependen de la región donde se proyecta la obra. Hay que considerar también que los estudios pueden realizarse:

- a) Para definir el sitio más favorable para la construcción.
- b) Durante la obra, para apoyar el trabajo conforme avanza la construcción.
- c) Posterior a la obra, para conocer las alteraciones del relieve y sus procesos en el entorno de la presa.

Algunos de los estudios geomorfológicos más importantes --

son los siguientes:

1. Análisis de la red fluvial en conjunto y las cuencas de la misma. Esto es importante porque está relacionado con el volumen de escurrimiento.
2. La morfología de los valles fluviales. Es común que las presas se construyan en valles profundos y estrechos con un fuerte gasto.
3. Evaluar los procesos de erosión y acumulación fluvial en la zona donde se proyecta o se construyó la presa.
4. Evaluar los procesos gravitacionales presentes y en riesgo potencial.
5. Evaluar el grado de desarrollo del intemperismo en las paredes del valle donde se proyecta la construcción de la presa.
6. Evaluar los posibles procesos kársticos (frecuentes en presas de México), su intensidad y las formas (sobre todo del subsuelo) originadas.
7. En su caso, analizar otros procesos como los glaciales, marinos, etc.
8. Analizar la posible presencia de movimientos neotectónicos y sus efectos: levantamientos, fracturas. Así como el vulcanismo y sismicidad.
9. Estudiar los tipos de sedimentos y sus espesores.

Todo lo anterior y algunos otros factores pueden exponerse en diversos tipos de cartas: morfométricas, morfogenéticas, morfodinámicas, espesores de sedimentos (y tipos genéticos), de riesgos, etc.

La construcción de una presa altera sustancialmente el ---

relieve y los procesos naturales de una localidad. Normalmente un valle montañoso profundo y estrecho se convierte en -- una amplia planicie acumulativa; el proceso de erosión fluvial se transforma en acumulación. La planicie aluvial se va extendiendo paulativamente ledecas arriba, en las margenes -- del río cuyo régimen se vio alterado.

Las consecuencias de una alteración de este tipo pueden -- relacionarse con el equilibrio biológico y la actividad económica del hombre, por lo que en este tipo de construcciones deben intervenir numerosos especialistas que consideren los problemas ecológicos, socioeconómicos y otros más.

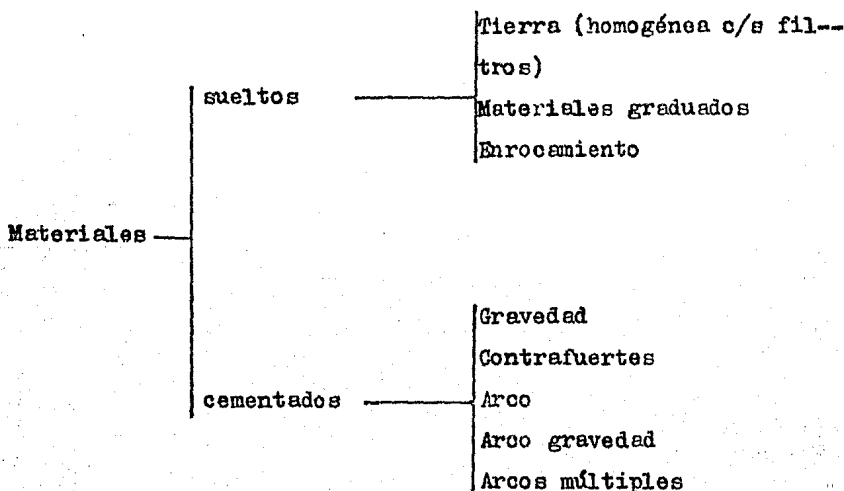
Algunas características de las presas.

Dadas las variaciones topográficas, geológicas e hidrológicas de un lugar a otro, las soluciones para almacenar o de rivar un río son muy diversas. Por lo que para escoger un -- tipo de presa responde, más que a una idea preconcebida, a -- la conveniencia de construir una estructura económica y se-- gura con los materiales que existen en la vecindad de la bo-- quilla, teniendo en cuenta las condiciones geológicas y de -- cimentación que en ella prevalecen. Por tanto, no es posible anticipar soluciones sin conocer las características del re-- lieve, en el fondo del río y en la zona del envalse, sus con-- diciones físicas y químicas, en especial sus propiedades me-- cánicas, y junto con estas, sus condiciones hidrológicas y -- sismológicas (Rosas y Prieto, 1978).

En suma, para la localización y la adopción del tipo de -- presa deben tomarse en cuenta los siguientes factores:

1. Topografía
2. Procesos gravitacionales
3. Geología
4. Localización de materiales para la obra
5. Disponibilidad de mano de obra
6. Costo

En cuanto a sus características físicas se tienen los si -- guientes tipos de presas:



Presa de tierra homogénea. Esta se construye casi exclusiva-- mente con tierra compactada, se le coloca por lo menos una -- protección en el talud, aguas arriba contra el oleaje. Con el objeto de que el flujo de agua a través de la masa de tierra--

no intercepte el talud de aguas abajo, y por lo tanto obtener mayor seguridad, se coloca en la base del terraplén un filtro formado con arena bien graduada. Cuando los materiales que se usan en la cortina son sensibles al agrietamiento y la presa se cimienta sobre suelos comprensibles o existen otras razones para prever la formación de grietas en el terraplén, se incluye en él un dren vertical o chimenea que se conecta al filtro horizontal (fig. D-I). Se interceptan así las grietas transversales a la cortina, para que el agua pueda circular por ellas, conducida por los drenes aguas abajo, sin correr riesgo de una peligrosa tubificación en la masa de tierra. Una condición importante en las presas de tierra homogénea es el vaciado rápido. En época reciente se ha recurrido a la colocación de filtros en el interior de la presa para reducir las fuerzas de filtración en el talud aguas arriba. (Reséndez y Marsal, 1983).

Fresas de materiales graduados. Se ha dado este nombre a las presas en que los materiales se distribuyen en forma gradual, con suelos finos en el corazón, pasando por los filtros y transiciones a los enrocamientos, en los que también se trata de colocar el material respetando la misma idea. Esto no siempre puede lograrse, pues depende de que se tenga en el sitio la serie de materiales antes numerados (Ob. Cit) (Fig. D2).

Fresas de enrocamiento. Las masas de roca en estas presas son voluminosas comparadas con el corazón impermeable. Este puede ocupar la parte central (fig. D3) o bien puede ser inclinado hacia aguas abajo (fig. D4). Se prefiere dicha forma por su -



D-1. Presa homogénea con filtros vertical y horizontal.



D-2. Presa de materiales graduados



D-3. Presa de enrocamiento, corazón vertical



D-4. Presa de enrocamiento, corazón inclinado



D-5. Presa de tierra y enrocamiento con trinchera
(Hc < 20 m)

(Dibujos tomados de MARSAL y RESENDIZ, 1983).

facilidad de construcción, pues disminuyen las interferencias del tránsito de equipo dentro de la cortina, y en algunos casos el programa respectivo se adapta mejor a las condiciones climáticas del lugar. Una variación de este tipo de presas de enrocamiento son las que tienen una pantalla impermeable, que puede ser de concreto o asfalto. También se han construido -- estructuras de mampostería o concreto para formar un muro. -- Las presas de enrocamiento con corazón de tierra compactada, -- son las más altas ejecutadas por el hombre. En la URSS, la -- presa Nurek tiene 300 m de altura, la de Oroville en EUA, y -- Mica en Canadá son de más de 200 m; en México las presas de -- el Infiernillo, La Angostura y Netzahualcóyotl alcanzan los -- 150 metros.

En algunos casos cuando se encuentran depósitos de aluvión permeables en el cauce del río, de un espesor de menos de 20 m, se prefiere llevar el corazón impermeable hasta la roca mediante una trinchera, como ha sido el caso de la presa del Infiernillo (fig. D5). Pero si tales depósitos son gruesos o -- muy permeables (más de 20 m) no sería económico excavar trincheras. Entonces, hay dos tipos de solución que son: a) el de lantal de arcilla compactada, que es una prolongación del núcleo hacia aguas arriba (fig. D6); b) la pantalla impermeable a base de inyecciones o bien con pilotes o muros de concreto simple colocados "in situ" (fig. D7), o por último sustituyendo la grava y arena del río por una trinchera de 3 m de ancho excavada a través del cauce y rellena de lodo (ob. cit.).

Algunos de los principales términos de las partes de una --

presa son :

Cortina o Presa. Ambos términos se emplean para designar la estructura que tiene por objeto crear un almacenamiento de agua o derivar el río. En algunos casos también se le denomina terraplén.

Boquilla o Sitio. Lugar escogido para construir la cortina.

Altura de la cortina. Se define como la distancia vertical máxima entre la corona y la cimentación, la cual no necesariamente coincide con la medida desde el cauce del río, por la presencia de depósitos aluviales.

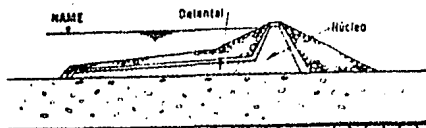
Corona o Cresta. Es la superficie superior de la cortina que, en ciertos casos, puede alojar a una carretera o una vía de ferrocarril; normalmente, es parte de la protección de la presa contra el oleaje y los sismos, y sirve de acceso a otras estructuras.

Talud. Es cualquier plano que constituye una frontera entre los materiales de la cortina o el medio circundante, se medirá por la relación de longitudes entre el cateto vertical y el horizontal.

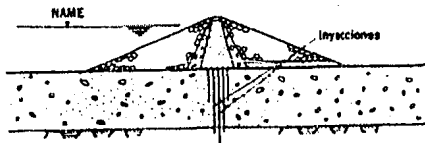
Corazón impermeable. También llamado "núcleo de tierra", es el elemento de la presa que cierra el valle al paso del agua contenida en el embalse o vaso.

Respaldo permeable. Son las masas granulares que integran con el corazón impermeable, la sección de la cortina. Pueden estar formados, en algunos casos, por filtros, transiciones y enrocamientos.

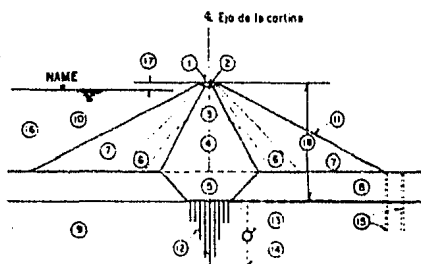
N.C.E. Abreviación del nivel de aguas máximo extraordinario.



D-6. Presa con delantal impermeable ($H_c > 20$ m)



D-7. Pantalla de inyecciones



NOMENCLATURA

- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| ① Cresta o corona | ⑩ Talud aguas arriba |
| ② Revestimiento de la corona | ⑪ Talud aguas abajo |
| ③ Filtros | ⑫ Pantalla de inyecciones |
| ④ Corazón o núcleo impermeable | ⑬ Galería |
| ⑤ Trincheras | ⑭ Drenas |
| ⑥ Transiciones | ⑮ Pozos de alivio |
| ⑦ Enrocamientos | ⑯ Embalse o vaso |
| ⑧ Depósito aluvial | ⑰ Bordo libre |
| ⑨ Roca basal | ⑱ Altura de la cortina |

D-8. Partes de una presa

(Dibujos tomados de MARSAL y RESENDIZ, 1983).

Es la elevación del agua en el vaso cuando la presa está ---
llena y además funciona el vertedor a su máxima capacidad. --
Hay otros niveles usuales en presas, como lo son el de las --
aguas máximas ordinarias (CV), el nivel medio de operaciones,
el mínimo de operación y el máximo de azolves. La diferencia-
entre la elevación de la corona y el NAME es el "bordo libre"
(En la figura D8 se pueden observar todas las partes de una -
presa ya mencionada) (Ob. Cit.).

Un problema especial que se presenta con mucha frecuencia
es el de los azolves, que ha provocado la cancelación de al--
gunas presas y a otras la ha hecho inútiles en poco tiempo. -
Un estudio geomorfológico detallado, permite conocer mejor el
comportamiento del área propuesta, conociéndose su evolución,
con la cual es posible determinar el movimiento de tierras,-
agentes de transporte, fuentes de origen, y aun determinar --
las épocas de máximo transporte, lo cual permitiría intercep-
tar mejor el transporte de material, o reconocer las áreas --
menos afectadas para la colocación de la obra. Las principa--
les formas de detener el material, es por medio de tratamien-
tos de control de erosión de suelos en la cuenca y realizando
campañas de reforestación. Muchas presas se han azolvado to--
talmente y en la actualidad ya no operan, con lo que se han -
perdido grandes inversiones.

El tipo de presa que se requerirá dependerá fundamentamen-
te de las características del valle, los tipos principales de
valles con respecto a la relación cuerda-altura son:

gargantas

menor de 3 m.

valle estrecho de 3-6 m.
valle amplio mayor de 6 m. y
terrenos prácticamente planos (Luig, 1979)

Efectos de la presa sobre las condiciones de la zona. Es importante considerar que la presa una vez construida, va a provocar cambios en las condiciones de la zona, que, en algunos casos, pueden ser negativos y de importancia.

Al llenarse la presa el nivel de las aguas freáticas asciende automáticamente en las cercanías. En zonas mineras esta situación puede ser delicada, puesto que los costos de extracción suben por el bombeo e inclusive puede volverse incosteable el trabajar la mina.

Las tierras que quedan cubiertas por el agua en la parte del vaso, normalmente son las mejores para los fines agrícolas, suelen estar habitadas y pueden existir obras de infraestructura que hay necesidad de construir, con el consiguiente costo. Los perjuicios que se van a causar deben anotarse como un costo social y económico contra el cual deben compararse las ganancias al tomarse la decisión de construir o no la obra. Además al formarse el lago en el valle, se modifican las condiciones hidrológicas del río y sus afluentes. Al alterarse el perfil de equilibrio, las corrientes comienzan a azolvlar el vaso y el fondo de su cauce aguas arriba de la presa, la que al formar una barrera, constituye un nivel de base de erosión local. Los aluviones o rellenos arenosos de los ríos fuera de sus cauces, causan serios problemas a los agricultores y pueden provocar el azolvamiento de las obras -

de drenaje en las vías terrestres (Ob. Cit.).

B) El trazo de vías de comunicación

Uno de los problemas actuales más importantes, es el desarrollo de vías de comunicación, que conecten de una manera más rápida y segura los centros de población con los centros de producción agrícola, forestal e industrial.

La ingeniería de carreteras trata principalmente con la superficie terrestre, expuesta constantemente a los elementos naturales. Dentro de los límites económicos, todas las construcciones deben ser planeadas para resistir con éxito el ataque de los procesos de intemperismo, erosión y acumulación.

Para determinar la ruta que debe seguir una carretera, el ingeniero tiene en cuenta tres factores principales:

- i) Importancia de la futura carretera propuesta.
- ii) La mejor localización geológica-topográfica.
- iii) El trazo que permita construirla y mantenerla económicamente.

La primera decisión es ajena a la geología. Pero para la -

segunda es indispensable contar con un mapa topográfico a una escala adecuada para el objetivo que se persigue. Las fotografías aéreas proporcionan una gran ayuda con la que se puedan elaborar mapas topográficos, geológicos y geomorfológicos, con lo que se obtiene un conocimiento básico acerca del relieve, además de una información general de la geología del área a través de la cual pasa el trazo, con lo que se consigue elegir fácilmente una ruta preliminar.

El conocimiento de la distribución de los elementos culturales es básico al planear la ruta que debe seguir la carretera o el ferrocarril que se proyecta construir. Es también de vital importancia la localización de cruces de ríos en los sitios más adecuados (Puig, 1955).

La elaboración de cartas geomorfológicas y fotogeológicas no excluyen de ninguna manera el trabajo de campo, pero sí es un apoyo fundamental que reduce considerablemente el tiempo que se le dedica.

A partir de los puntos extremos obligados para la ruta general, el trazo se realiza teniendo en cuenta las características morfológicas, con lo que puede ser escogida la faja de terreno apropiada para utilizar en el proyecto preliminar. Además de los lugares principales para los que se ha planeado la vía de comunicación, deben ser considerados todos los sitios que se encuentren dentro del área contigua a una recta que una a los extremos y cuya importancia económica puede hacer conveniente una desviación de la ruta principal o bien construir simplemente un ramal, si el estudio económico así -

lo dictamina. Estos sitios de importancia comercial, pueden ser poblados pequeños, zonas agrícolas, bosques, minas, campos petroleros, parques de recreo, lugares turísticos, etc.

Al trazar la ruta, se debe hacer un reconocimiento exacto, de las formas que presenta el terreno, para la construcción y los yacimientos de materiales que hay para la obra. La interpretación se hace con fotografías aéreas y cartas topográficas, de las que se pueden elaborar las cartas geológicas y geomorfológicas, con las que se elaboran los planes de trabajo de verificación primero y posteriormente los de construcción.

Las estructuras tales como pliegues, fallas, diaclasas, intrusiones, etc., tienen una influencia decisiva sobre las propiedades mecánicas de las masas de roca. Generalmente la presencia de algunas estructuras es un factor que reduce la capacidad de resistencia de las rocas; fractura y plegamiento. En otros casos las intrusiones y algunas fracturas selladas con sílice y otros materiales, mejoran las condiciones de resistencia de las rocas.

Las condiciones estructurales son, en muchos casos, las que determinan el grado de estabilidad que puede soportar una ladera al hacer el corte; son las que definen el sitio en donde ha de construirse un túnel y los procedimientos de construcción que deben adoptarse para hacerlo. También pueden obligar a hacer modificaciones en el trazo, para evitar las zonas de fractura o contactos que hagan peligrar las obras.

La descripción de las formas superficiales, deben hacerse-

de una manera precisa, como es el caso de la orografía y la hidrografía, para una planeación correcta o sea la parte descriptiva del estudio geomorfológico.

Además de el estudio morfológico detallado del relieve -- para el trazo de la vía de comunicación, es importante considerar la génesis del mismo. Las terrazas fluviales presentan condiciones favorables; poca pendiente, resistencia, etc. Los conos de deyección inactivos también son formas favorables. -- En algunos casos como laderas de piedemonte disecadas por barrancos profundos, se utilizan los parteaguas paralelos a estos para los trazos.

Hay asimismo formas que por sí mismas son desfavorables, -- como las planicies de inundación de los ríos, conos de deyección activos, etc.

Los procesos exógenos son fundamentales en la construcción de vías de comunicación, por los riesgos que pueden presentar y el costo de mantenimiento. Durante el transporte de material intemperizado por los chorros pequeños y arroyos del deshielo y la precipitación pluvial tiene lugar una erosión de superficie. Este material arrastrado por el arroyo en la ladera se denomina derrubio. Como resultado surgen hoyos o surcos que, en lo sucesivo, se transforman en barrancos. El encespado de los taludes es la medida más simple y segura para proteger a éstos contra la destrucción. En las excavaciones a cielo abierto, además, se recurre a la construcción de colectores de alivio y cunetas colectoras (Ianiukov, 1981).

La lucha contra los barrancos es un poco más difícil, ---

según la etapa en la que se halle; al principio con allanar los surcos y hoyos y cubrirlos con un manto vegetal es suficiente, pero si el barranco ya presenta taludes detríticos, se recurre a la construcción de diques reforzados, cuando la destrucción es muy intensa se recurre a un trenzado con taponamiento de tierra y plantación de árboles (Paniukov, 1981).

Las riadas de barro, o dicho de otro modo, los torrentes de rocas y fango que surgen durante los aguaceros fuertes en las montañas son también un riesgo. Las riadas de barro surgen en las siguientes condiciones;

- a) Pendientes consideradas en los lechos, pueden superar los 3° y a veces alcanzan los 21° .
- b) Desarrollo en los cursos superiores de los cauces montañosos de arcillas y esquistos arcillosos y de otras rocas inestables a causa del intemperismo, que dan un material abundante en detritus pequeños.
- c) La precipitación de una gran cantidad de lluvia durante un breve período, o un brusco deshielo.

Las principales medidas para evitar las riadas de barro son la conservación y restablecimiento de la vegetación en la región de su alimentación. Entre las medidas ingenieriles existe la organización de tabiques (diques de represa) que atrapan los cauces montañosos.

Para la protección de las carreteras contra su destrucción se construyen canalones de hormigón, por lo que se deja pasar la riada de barro por encima o por debajo de la carretera (Paniukov, 1981).

Las orillas escarpadas y abruptas de los ríos, que se derrubian intensamente, se destruyen con frecuencia, formando derrumbamientos y taludes detriticos. En las condiciones de los ríos de llanura las pendientes sometidas al derrubio se destruyen como resultado de los desplomes de las cornisas colgantes y de los despeñaderos abruptos de rocas. Tanto en uno como en otro caso, éstos van acompañados de un acarreo intenso, erosión fluvial, formación de barrancos y a veces, corrimientos de tierra. La prevención de los pequeños derrumbes inesperados, a veces se logra volando las rocas colgantes o separándolas del macizo con trabajos de cuña. En algunos casos resulta más efectivo la cimentación del macizo fracturado, y a veces la retención de los bloques con ayuda de grapas de acero, troncos de sostén, muros (contrafuertes), etc. También se recurre a plataformas de captación. Sin embargo, no siempre es posible evitar los derrumbamientos, por lo que si la obra da un margen para trasladarla es lo mejor, ya que resulta más económico y seguro, aunque este problema es particularmente difícil en vías de comunicación, ya que una vez trazada, el margen para trasladarla es muy escaso, por lo que es de vital importancia un estudio que revele los sitios de posibles derrumbes o zonas con huellas de antiguos derrumbes que pueden activar, así como la magnitud de la dispersión de los materiales. Por lo que para estos trabajos es de una ayuda invaluable la elaboración de las cartas geomorfodinámicas que indican la forma en que se está transformando el relieve (op. cit.).

Los desplazamientos de los fragmentos y granos de roca --- que se separaron como resultado de la intemperización se llama desmoronamiento. Como resultado, el pie de la ladera se --- acumula el material detrítico. En las regiones montañosas los taludes detríticos frecuentemente contienen bloques grandes - (flujos de rocas).

Los taludes detríticos pueden representar un peligro en --- las laderas montañosas que se encuentran en las regiones sísmicas, ya que bajo el influjo de las sacudidas sísmicas son --- capaces de ponerse en movimiento. Las masas de los taludes --- detríticos también pueden ponerse en movimiento como resultado de la saturación de agua después de una precipitación pluvial muy fuerte.

En las regiones montañosas, en donde los taludes detríti--- cos son --- estables y se ponen en movimiento al cortar la la dera para hacer el camino, es recomendable mover la ruta so--- bre otra ladera segura en materiales detríticos. Cuando no se tiene posibilidad se recomienda excavar la carretera en semi--- túnel, desalojando el material detrítico a través de su recu--- brimiento, o en túnel (Paniukov, 1981).

Los procesos fluviales y los gravitacionales son los que --- presentan los riesgos mayores para las vías de comunicación, --- por lo que deben analizarse con detalle. Aunque son mínimos --- en México, en otros países son de la misma importancia los --- procesos glaciales y fluvioglaciales.

Otros procesos que afectan a las vías de comunicación son los eólicos, sobretudo la acumulación. Esto es propio de ---

zonas costeras o desérticas, lo que ocurre en algunas regiones del país. El karst subterráneo debe también tomarse en cuenta, ya que una vía puede trazarse sobre terrenos inestables.

A continuación se mencionan algunas de las características generales sobre las vías de comunicación en sí y su construcción.

La subrasante es la superficie terminada de la terracería que recibe el pavimento. Puede estar constituido por materiales in situ, como en los cortes o bien por material acarreado como los terraplenes (Fig. B-1).

El terraplén es un macizo artificial de tierra que se levanta para la construcción de vías de ferrocarriles y carreteras o en lugares para embalsar agua. Estos se proyectan generalmente basándose en la experiencia, a menos que las alturas sean superiores a los 10 ó 12 m. El talud normal es usualmente de 1.5 (horizontal) a 1.0 (vertical o de 2 a 1), a menos que el terraplén esté sometido a inundaciones. Los terraplenes de carreteras se construyen cuidadosamente con los suelos seleccionados, compactados para evitar asentamientos y una superficie mal acabada; pero los terraplenes para ferrocarril rara vez se compactan intensamente, porque la terminación defectuosa de la superficie puede obstaculizar el apropiado mantenimiento del balasto (Sowers, 1978).

Las dificultades mayores de los terraplenes provienen de cimentaciones defectuosas. No es difícil construir un relleno que sea fuerte, que no tenga cambios de volumen y que sea --

incompresible; pero si el suelo debajo de él es pobre, puede fallar a pesar de lo cuidadosa que haya sido la construcción. La falla comienza debajo del terraplén y en algunos casos se extiende dentro del mismo (op. cit.).

Los terraplenes colocados sobre suelos profundos de poca resistencia fallan por falta de capacidad de carga (Fig. B2a). Si el suelo blando está cubierto por una costra dura no debe confiarse en la resistencia de ésta para soportar una carga. Las fallas de este tipo se pueden evitar de varias maneras. - El empleo de materiales ligeros para el terraplén, como escorias, o anchos taludes de poca pendiente, pueden reducir los esfuerzos del suelo debajo de la estructura. Una berma de -- grava junto al pie del talud actúa como un contrapeso que impide la combadura del suelo y puede de esa manera impedir fallas. Si el suelo está normalmente consolidado, se puede mejorar su resistencia por consolidación con el propio peso del terraplén; en estos casos la construcción debe hacerse lenta para dar tiempo a que el suelo se pueda consolidar. Los drenes verticales de arena o los pilotes de arena pueden reducir el recorrido del drenaje y aumentar así la velocidad de consolidación. Si el estrato blando es relativamente delgado (de 1.5 a 3.0 m) es más económico excavar el suelo en el área -- que se vaya a rellenar y reemplazarlo con mejor material.

En algunos casos el suelo puede ser lo suficientemente resistente para soportar el peso del terraplén sin fallar, pero tan compresible que se asiente mucho e irregularmente (Fig. - B2b). Esto es particularmente propio de los limos y arcillas

orgánicos y en grado extremo de las turbas. Las carreteras -- que atraviesan áreas pantanosas tienen frecuentemente un perfil ondulado, debido a las irregularidades del asentamiento.

Un asentamiento exoesivo debido a la compresión se puede -- corregir preconsolidando el suelo, lo cual se logra haciendo la construcción lenta, usando pilotes de arena o excavando el suelo compresible (Sowers, 1978).

Los terraplenes sobre estratos relativamente delgados de -- arcilla blanda, fallan por deslizamiento horizontal a lo largo de una compleja superficie de falla que se extiende hacia-arriba a través del relleno, como se indica en la Fig. B2c. -- Las fallas de este tipo ocurren generalmente durante la construcción o poco tiempo después, antes que el estrato de arcilla haya tenido la oportunidad de consolidarse por efecto de la carga. Los drenes verticales dentro del estrato blando aceleran en algunos casos, la velocidad de consolidación. Si el estrato está cerca de la superficie es más económico quitarlo completamente (op. cit.).

Cuando aumenta la presión del agua en los estratos delgados no cohesivos situados debajo del terraplén, puede producirse una falla súbita sin ningún aviso. Aunque el esfuerzo neutro es generalmente mayor debajo del centro del terraplén, también es así el esfuerzo de confinamiento, debido al peso del mismo. La falla comienza por un movimiento hacia afuera de una cuña de suelo adyacente al pie del terraplén, seguido por una falla de pie de talud del empeinado del frente que dejó la cuña al moverse, como se ve en la Fig. B2d. La falla de

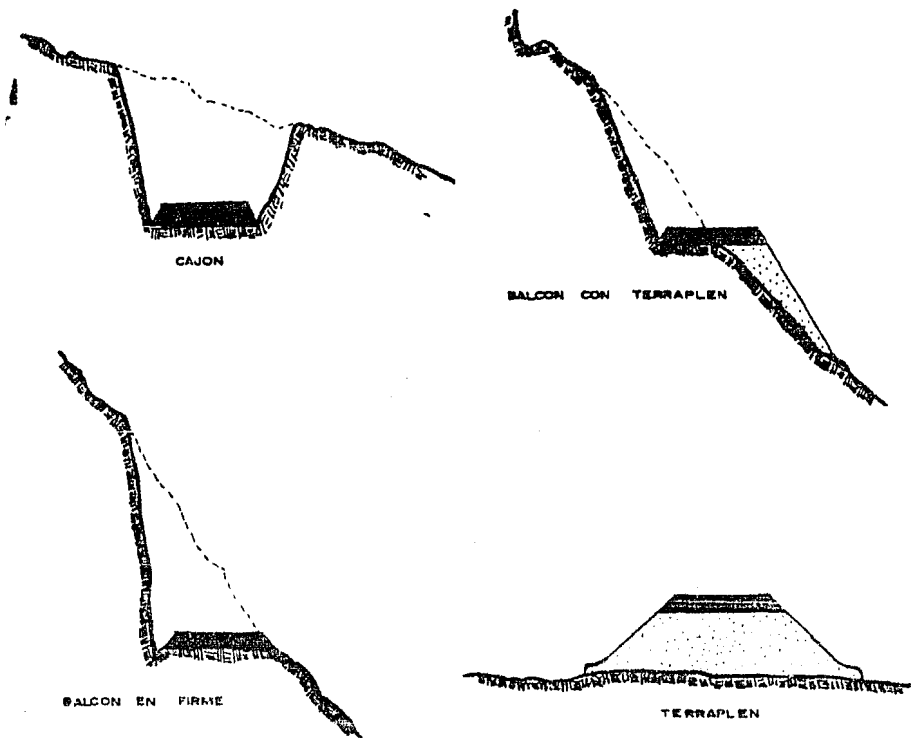


Fig. B-1 SECCIONES TÍPICAS DE SUBRASANTES (PUIG, 1979).

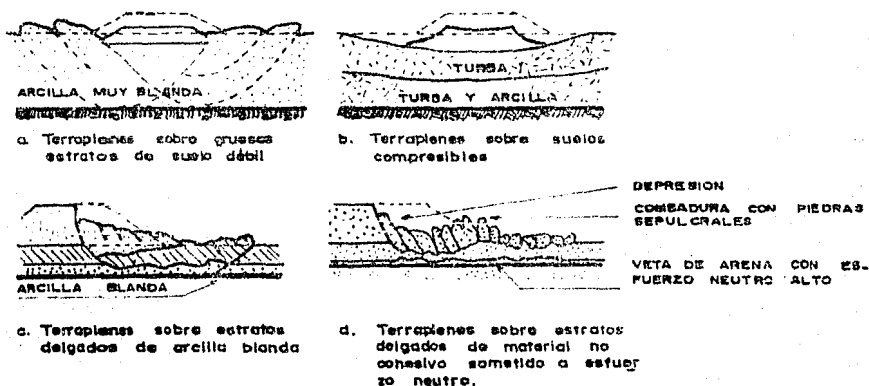


Fig. B-2 PROBLEMAS DE CIMENTACION DE TERRAPLENES (BOWERS, 1972).

pie de talud secundaria forma algunas veces una depresión semejante a una cubeta alargada, en la superficie de deslizamiento, con fragmentos enteros del suelo que se desliza que parecen filas de lápidas inclinadas.

Los rellenos en las laderas algunas veces cierran las salidas naturales de las filtraciones y esto hace que aumente la presión del agua en la cimentación del terraplén y en el talud natural. Las prosas y diques crean altas presiones debido a los depósitos de agua que forman. Algunas veces, se producen temporalmente altas presiones de agua durante la construcción, porque el peso del terraplén actúa sobre vetas discontinuas de limo y arena fina y el agua de esas vetas no se puede drenar. La seguridad se puede aumentar con drenes que intercepten los estratos permeable (Sowers, 1978).

El suelo, para propósitos de ingeniería de carreteras, puede definirse como un material no consolidado de la superficie terrestre. Los pavimentos o superficies de las carreteras, tienen un contacto íntimo con los suelos de una forma en otra (Fuig, 1955).

Es un axioma que el éxito de una carretera depende principalmente de las condiciones de la subrasante. Casi todos los problemas que se presentan al hacer la pavimentación de una carretera, tales como dislocaciones, abombamientos, fallas, fracturas y aun las llamadas bufas, pueden ser atribuidos a las malas condiciones de la construcción de la subrasante y pueden ser previstas y eliminadas si se hace el trabajo geológico y geomorfológico adecuadamente.

Fuentes y Túneles

Al seleccionar el sitio para la construcción de un puente el ingeniero no tiene mucho que escoger, ya que el lugar queda determinado por la ruta, con un mínimo de kilometraje. Además, para la localización del cruce debe tomarse en cuenta la conformación de los márgenes y que el agua no se desborde en el tramo; los procesos de erosión y de acumulación fluvial, tanto laterales como de fondo, así como las condiciones geológicas superficiales y las posibles condiciones de cimentación. En estas condiciones el ingeniero elige la zona para la construcción, donde ésta resulte más corta en el valle o vía fluvial que se pretende cruzar. La elección se facilita con el apoyo de cartas geomorfológicas de tipo morfogénico, morfodinámico, de riesgos y pronóstico. Lo anterior es importante porque una vez comenzada la obra, las pilas del puente colocadas, no pueden ser cambiadas. Antes de diseñar las pilas y estribos, debe alcanzarse un conocimiento completo de la geología y geomorfología local. Los puentes se construyen a través de depresiones del terreno, cuya existencia sugiere una discontinuidad en las condiciones estructurales normales. Además, los ríos por su naturaleza, pueden originar muchos tipos de depósitos, incluso de grandes bloques, y si no se efectúa un trabajo preliminar cuidadoso, teniendo en cuenta la capacidad de arrastre del río en las diferentes épocas, los bloques removidos pueden llegar a confundirse como rocas del lecho, lo que puede causar serios problemas en la cimentación (Ruig, 1955).

Un cuidadoso trabajo geomorfológico nos puede ayudar a encontrar la zona de donde provienen los grandes bloques y ---plantear soluciones para evitar que éstos lleguen al río y -afecte la obra.

El contar con fotografías aéreas, es una gran ventaja, ya que con ellas se puede elaborar un mapa fotogeológico y cartas geomorfológicas, en las cuales se discute la convenien--cia de hacer una estructura más grande y reducir el kilome--traje o viceversa; o bien hacer dos puentes pequeños en vez de uno de gran tamaño, y en general, cualquier problema de -caracter económico que se presente.

Una investigación superficial puede ser suficiente, aun--que a veces es necesario realizar una investigación más de--tallada, con sondeos a cielo abierto y perforaciones. Es im--portante fijar la profundidad de los sondeos de acuerdo a --las características de la obra que se planea construir. La -longitud del puente se estructura de acuerdo a la importan--cia de la corriente; al NAME (nivel máximo extraordinario), -clima (presencia de tormentas y ciclones), condiciones de --drenaje, erosión y depósito del terreno, y con base en esto--se procede a una adecuada cimentación. Las cunetas y las ---obras de drenaje laterales al camino, en los cortes, deben -ser protegidos, para evitar que la corriente en una avenida--los pueda arrastrar. El azolve de las cunetas se debe evitar ya que el agua tiende a brincar sobre la corona y erosiona -el terraplén en el lado contrario, debilitando la estructura y provocando serios y costosos daños (Fuig, 1979).

Del reconocimiento aerofotográfico que se hace para determinar el trazo de la ruta, puede inferirse la conveniencia de construir un tunel a través de una montaña. Los mapas fotogeológicos y geomorfológicos ayudan a localizar la ruta -- ruta, si bien esta información no es completa por tratarse -- del subsuelo, si da una idea cercana de la realidad, con la cual puede conocerse de una manera aproximada la longitud y el espesor de la roca o rocas que servirán de abrigo, la --- cual es muy útil al discutir los costos y las característi-- cas de cimentación que se requerirán y que ayuda a decidir -- la conveniencia de hacer o no el túnel (Puig, 1958).

Los túneles que se requieren para las vías de comunica--- ción, casi siempre dejan poca libertad para su localización-- ya que ésta obligada por el alineamiento y las especificacio-- nes de la construcción. Las condiciones geológicas son básic-- cas para la economía de la obra.

Los túneles pueden ser construidos en tierra o roca, y se utilizan para acueductos, desvíos, como vertedores, en vías-- de ferrocarril, subterráneos en ciudades, circulación de ve-- hículos, drenaje, conducción eléctrica y en la ingeniería -- sanitaria.

Los métodos de exploración deben de ser decididos en cada caso y la localización de perforaciones u otras pruebas, de-- beran hacerse en compañía del geólogo, el cual, mediante el estudio del relieve podrá preveer problemas y determinar po-- sibles soluciones, en el caso de estructuras sepultadas, fa-- llas, diaclasas, juntas, fracturas, permeabilidad, porosidad

del terreno; factores que deberán conocerse perfectamente, -- para evitar accidentes y altos costos en la construcción y -- mantenimiento del túnel.

Los túneles en tierra se construyen excavando, como en las minas. El método de construcción está regido por la capacidad del suelo para sostenerse a sí mismo temporalmente, durante -- el proceso de la construcción y por las presiones que final-- mente se producen en el túnel, dentro del sistema de soporte. Ambas están relacionadas con la profundidad del túnel y su -- diámetro, con las propiedades elásticas y la resistencia del-- suelo y con la presión de agua subterránea. Con excepción de-- algunas arcillas resistentes y formaciones parcialmente satu-- radas, la mayoría de los túneles en tierra requieren sopor -- tes, tanto durante la construcción como después. Sobre el ni-- vel freático, en suelos relativamente firmes, la excavación -- se realiza por la parte superior o techo del túnel y continúa -- hacia abajo en etapas. La excavación se hace lo más grande po-- sible dependiendo de la capacidad del suelo para soportarse a -- sí mismo temporalmente. En la etapa inicial el suelo es sopor -- tado por planchas de revestimiento que son planchas de acero-- con pestañas o rebordes que se pueden atornillar unas con -- otras para formar un revestimiento continuo o con un entablo-- nado de madera o de acero soportado por vigas de acero; se -- excava entonces la segunda etapa y se soporta en forma simi-- lar.

La técnica de excavación debe adaptarse a las condiciones-- del suelo y del agua subterránea. Los revestimientos tempora--

les, el drenaje, la estabilización del suelo y la presión -- del aire interior para balancear parcialmente la presión del agua, son medios auxiliares utilizados por los constructores de túneles en las perforaciones a través de formaciones traicioneras (Sowers, 1978).

Los túneles en roca tienen muchas de las características de los túneles en suelos, sin embargo, presentan algunas diferencias significativas. Primero, la formación puede estar sometida a grandes esfuerzos residuales debidos a los movimientos tectónicos o la erosión de sobrecargas de tierra, -- que encubren los esfuerzos debidos al peso de la roca. Segundo, las juntas, planos de estratificación y zonas de esfuerzo cortante son zonas de debilitamiento que destruyen la continuidad de la masa rocosa y concentran el esfuerzo cortante en esas direcciones. Tercero, el proceso de excavación, que a menudo requiere el uso de explosivos, puede alterar la continuidad de la masa rocosa, añadiendo esfuerzos dinámicos y abriendo las juntas y fisuras que antes estaban cerradas.

El método a seguir en los trabajos de excavación en túneles depende de la dureza y de la calidad de la roca. En materiales más blandos, como lutitas, los esquistos, y las areniscas blandas, el trabajo se puede hacer empleando máquinas especiales para la perforación de túneles, si esas rocas son lo suficientemente fuertes para sostenerse hasta que pase. - Las rocas duras se pueden perforar y volar avanzando en tramos cortos de 3 a 6 metros cada vez. Si la roca es débil o esta astillada, es necesario un soporte, que consiste en ---

costillajes de acero llamados marcos que se acuñan contra la roca y algunas veces se colocan tablonés entre ellos para evitar el desprendimiento de fragmentos de roca. En rocas en mejor estado se colocan pernos de anclaje. Es costumbre usar revestimientos permanentes de concreto para resistir la presión que se produce o para reducir el rozamiento interior en el caso de túneles de plantas de energía hidráulica (Sowers, 1970).

Resumiendo lo expuesto sobre la importancia de la geomorfología en la construcción de puentes, hay que decir que los procesos más importantes a considerar son los fluviales y gravitacionales. Ambos deben estudiarse con detalle, el tipo que predomina y la intensidad. Esto ayudará a evaluar la duración de la obra y su mantenimiento.

En el caso de los túneles es fundamental la corteza de intemperismo: tipo y espesor. Además, en el caso de materiales no consolidados es necesario también determinar su génesis (aluvión, fanglomerado, milonita, etc.) y espesor. Cuando se trata de rocas, no solamente se considera el tipo, sino también la estructura (dique, anticlinal, etc.) y el grado de fractura.

C) En los asentamientos humanos

La planificación de asentamientos humanos requiere fundamentalmente de un estudio geomorfológico que defina las características morfogénicas y morfodinámicas del relieve, así como de pronóstico y riesgos. Esto debe complementarse con estudios geográficos (temperaturas, vientos, precipitación), geológicos (estructural, litología, agua subterránea, etc.).

Sobre el enfoque geomorfológico hay que considerar los siguientes elementos:

1. Sismicidad. Aunque no es un proceso estrictamente geomorfológico, refleja una actividad endógena que puede manifestarse en relieve a través de grietas, en algunos casos pequeños escarpes. Además puede provocar la presencia de procesos exógenos (tsunamis, derrumbes, aludes, corrientes de lodo).

2. Procesos fluviales como inundaciones por el desborde de

ríos, desarrollo de barrancos, conos de deyección activos.

3. Procesos gravitacionales rápidos y lentos.

4. Karst.

5. Procesos eólicos.

6. Procesos glaciares, fluvioglaciares, periglaciares.

7. Procesos marinos en las zonas costeras.

8. Regímenes lacustres y lagunares.

Todos estos elementos son necesarios en la planificación de asentamientos humanos, ya que permiten definir las zonas más estables y de menor riesgo, o conociendo éstos es posible tomar medidas de prevención.

La zona superficial de muchos suelos cambia de volumen regularmente con los cambios de estación. Los suelos de arcilla, especialmente los que son muy plásticos, se retraen mucho cuando se secan y se expanden cuando se humedecen. Para lo cual es de gran ayuda la elaboración de cartas de densidad de drenaje y profundidad de erosión, las cuales ayudarán a conocer el drenaje y la permeabilidad de la zona, y la forma en que puede afectar el subsuelo. Así, en regiones que tienen estaciones marcadamente secas y húmedas, el suelo próximo a la superficie del terreno se expande y se contrae. Los muros exteriores de un edificio son los que más se mueven, mientras que los interiores, donde el suelo está protegido del sol y la lluvia, casi no sufren deformación. En regiones normalmente húmedas, un período de sequías prolongado puede producir la retracción del suelo y el correspondiente asentamiento de la cimentación. Un secamiento acelerado y el asentamiento ---

correspondiente, se puede producir por la extracción de agua del subsuelo (como ocurre en la ciudad de México). El aumento de la humedad producido por filtraciones de tuberías, puede producir en las arcillas una expansión capaz de levantar una estructura. De esta manera los cambios de volumen de las arcillas afectan de una manera u otra las estructuras, por lo que a la geomorfología le corresponde observar los cambios que se produzcan por el desvío de ríos, escorrentías, y aquello que cambie la humedad del suelo por las obras humanas.

Otro factor que altera la cimentación de las obras son las grandes avenidas de los ríos que al desbordarse socavan los cimientos de las grandes estructuras, dañándolas hasta el colapso. Por esto es necesario conocer las características de la corriente, el material que transporta, su depósito, la magnitud, etc. para correlacionarlo con los daños que puede causar al desbordarse.

Todas las cimentaciones se deben proyectar teniendo en cuenta los efectos de las futuras excavaciones y construcciones. La construcción de cimentaciones en zonas urbanas muy congestionadas, donde el suelo se halla muy alterado por las construcciones ya hechas y además, cada vez que se extrae suelo y agua se producen asentamientos que afectan las construcciones y dificultan la nueva construcción. Por ejemplo, la extracción de material para cimentaciones profundas y colocación de túneles para el ferrocarril subterráneo, puede provocar el asentamiento y hasta la falla de las edificaciones que durante años se mantuvieron en perfecto estado.

El agua subterránea es otro factor que afecta las cimentaciones, ya que puede hacer que los trabajos se vuelvan muy -- costosos y hasta peligrosos, sobre todo cuando se trabaja por debajo del nivel freático. Los cambios de nivel son un riesgo muy alto, sobretodo en las zonas urbanas, donde una elevación desmedida puede hacer que se mezcle con las aguas negras de la población, con la consiguiente contaminación del agua, que puede estar abasteciendo de agua potable a diferentes poblaciones. También la elevación del nivel puede debilitar el suelo y propiciar fallas, que afecten a las estructuras.

Las cavidades subterráneas como minas y cavernas kársticas son peligrosas para las cimentaciones, porque algunas veces -- se derrumban por la sobrecarga, además en los casos de karst-- aunque temporalmente, la roca pueda resistir, el agua irá debilitando cada vez más la roca, que aunado a la carga que sostiene acelerará su derrumbamiento (Sowers, 1978).

Lo más conveniente es tratar de evitar la cimentación en zonas donde halla actividad minera y kárstica.

De lo anterior se desprende que al realizar una obra, no-- es solo un punto el que afecta, sino toda una gran área del -- relieve, que puede activar fallas y movimientos de tierra que estaban inactivos, al alterarse las condiciones con la construcción de la obra. Además, zonas alejadas que aparentemente no tienen relación con el punto donde se realiza la obra, pueden llegar a debilitar las cimentaciones y causar serios daños a las edificaciones (como el caso de los materiales acarreados por los ríos). Es fundamental tomar en cuenta la --

la naturaleza que rodea la zona donde se va a construir y es un geólogo quien puede determinar estos cambios y los agentes que los producen.

La seguridad de una masa de tierra respecto a una falla o movimiento es lo que se llama estabilidad y debe considerarse no sólo en el proyecto de estructuras de tierra, sino también en la reparación y corrección de las que han sido afectadas -- por deslizamientos o por corrimientos, o hundimientos, es necesario hacer estudios acerca de la estabilidad de la zona y determinar las causas que la provocan e indicar la forma de -- repararlo y evitar futuras dificultades (Sowers, 1978).

Cuando porciones grandes de masas de tierra se separan y -- se mueven, el resultado es generalmente desastroso. Tremendos deslizamientos de tierra han enterrado ciudades enteras y represado los ríos; los deslizamientos en excavaciones abiertas han sido la causa de que se abandonaran canales, carreteras y ferrocarriles, la rotura de diques en períodos de grandes crecientes han producido la inundación de terrenos de cultivo y destruido viviendas.

Las fallas de las masas de tierra tienen una característica común: Hay un movimiento de una gran masa de suelo a lo -- largo de una superficie más o menos definida. En la mayoría -- de los casos, la masa de tierra permanece intacta durante las primeras etapas del movimiento, pero finalmente se deforma y fragmenta a medida que el movimiento progresa. Algunas fallas ocurren bruscamente sin un ligero aviso o ninguno; mientras que otras se producen paulatinamente después de anunciar --

su intención por un asentamiento lento o por la formación de grietas. El movimiento ocurre cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es excedida por los esfuerzos cortantes que se producen en una superficie relativamente continua. --- Realmente cualquier cosa que produzca una disminución de la resistencia del suelo o un aumento de los esfuerzos del suelo, contribuye a la inestabilidad y por lo tanto debe tomarse en consideración. Las principales causas que propician la inestabilidad del terreno son: las cargas externas como edificios, agua o nieve; aumento del peso de la tierra por aumento de la humedad, remoción por excavación de la parte de la masa de tierra; socavaciones producidas por perforaciones de túneles, derrumbes de cavernas o erosión por filtraciones, choques producidos por terremotos o voladuras; grietas de tracción y presión del agua en las grietas. Causas que también minan la resistencia del suelo son: presión de agua intersticial, adsorción de agua por parte de las arcillas, deterioro del material cementante y pérdida de la tensión capilar por secamiento (Sowers, 1978).

Algunos remedios para protección a los taludes de movimientos gravitacionales como la reptación y deslizamiento son los siguientes; el drenaje adecuado, la reducción de la inclinación del talud, la estabilización del suelo por inyecciones, la remoción de cargas externas, la protección contra la erosión del pie del talud y proveer soporte con pilotes o muros de sostenimiento de tierras. Son remedios que han demostrado ser eficaces en algunos casos, pero ninguno tiene valor a --

menos que se ajuste a las necesidades específicas del corrimiento cuya corrección se pretende (sowers, 1978).

Los hundimientos rápidos se pueden producir por las excavaciones para alcantarillados, túneles o edificios. Si se ha sacado de una excavación más suelo que el correspondiente al volumen de la excavación terminada, es indicación de que el suelo se está introduciendo en la excavación a medida que se está ejecutando. Este fenómeno conocido por pérdida de tierra, es muy común en las arcillas blandas.

Los hundimientos lentos son causados por la consolidación del suelo y ocurre en áreas en las que se producen aumentos importantes en los esfuerzos del suelo, como cuando se extrae agua o petróleo del subsuelo, en los que las rocas se acomodan conforme se extrae el líquido. El único remedio para tales hundimientos es tener en cuenta que se va a producir y proyectar las estructuras para resistir este efecto o controlar la extracción de los líquidos.

En los casos de desprendimiento de rocas se deben hacer comprobaciones periódicas de las condiciones de la roca en los cortes y en los taludes empinados y remover todos los fragmentos inestables. Durante la época de lluvias se debe tener especial cuidado en algunas zonas, ya que la presión del agua puede poner en movimiento la roca suelta y obstruir caminos y destruir casas situadas al pie de los taludes. En algunos casos ha sido práctico anclar los fragmentos de roca suelta con barras y cables para impedir su movimiento. También un

recubrimiento de concreto sostenido con pernos puede evitar el movimiento de las rocas, al mismo tiempo proteger a la roca del intemperismo. Sin embargo, se debe tener cuidado y -- colocar un sistema de drenaje al recubrimiento para evitar un esfuerzo neutro que active más las juntas y las grietas permeables y represente un peligro mayor (op. cit.).

La lucha contra la formación de barrancos es un problema -- muy serio. En el estado inicial el desarrollo del barranco -- puede ser detenido mediante el allanamiento de los surcos y -- hoyos, restableciendo el manto vegetal y organizando alivios. En la etapa siguiente, cuando el barranco crece mediante su -- penetración en el macizo de la ladera, y cuando la destruc -- ción del territorio se acrecenta por los derrumbes y taludes -- detriticos de sus bordes, se recurre a la construcción de diques reforzados, es decir, terrazas, cuyo fin es detener los -- derrubios. En la tercera etapa el perfil longitudinal del fon -- do del barranco se allana y, por consiguiente el derrubio se -- detiene. Al mismo tiempo se acrecenta la destrucción de los -- bordes laterales. La destrucción intensa de éstos últimos --- transcurre mediante la formación de taludes detriticos, de --- rrumbes, y en algunos casos corrimientos de tierras. La pro -- tección de las laderas contra la destrucción se efectúa me --- diante la organización de un trenzado con taponamientos de -- tierra y plantación de árboles. La lucha contra los corrimien -- tos de tierra es posible con la ayuda de un sistema de medi -- das más complicado que incluyen la protección de los bordes -- barranco contra las fuerzas destructoras de las aguas -----

subterráneas. La cuarta etapa se caracteriza por la amortización de estos procesos erosivos en la ladera. Los bordes de los barrancos adquieren estabilidad y, paulativamente, se cubre de vegetación y el fondo del barranco con acumulaciones coluvial-aluviales. En esta etapa se debe evitar la alteración de la estabilidad natural de la ladera y de los bordes del barranco (Ianiukov, 1961).

En resumen, la elaboración de cartas geomorfológicas de control permite conocer, primero, los movimientos de tierra y efectos erosivos que afectan la región donde se va a construir; segundo, durante la construcción, en muchos casos, se puede valorar los efectos que se están causando en el relieve. Tercero, en zonas ya construídas, observar cómo se ha transformado el relieve, y si acepta la construcción de una nueva obra. Cuarto, un control sobre el crecimiento de barrancos y deslizamiento de tierras, y cualquier proceso que ponga en peligro la construcción.

Finalmente, es importante recordar que un error acerca del comportamiento del relieve, sobre todo en los asentamientos humanos, lleva no sólo a pérdidas de orden material, sino hasta humano, además, de que siempre será más económico atacar un problema desde el inicio de la construcción que al final de la misma.

Conclusión

Podemos decir con toda certeza, que antes de construir -- una gran obra de ingeniería necesitamos conocer con exactitud el ambiente sobre el cual se va a asentar. Siendo la geomorfología la ciencia que más puede aportar, acerca de la evolución del medio circundante, por la gran cantidad de información y métodos que posee, además de variada, por la íntima relación que guarda con otras ciencias, como la geografía, la geología, la hidrología, la mecánica de suelos, etc., proporcionando en conjunto, información acerca de la tectónica regional, de las características litológicas y estructurales (incluyendo fracturas y espesores), la resistencia de las rocas al intemperismo y su grado de alteración, suelos, condiciones climáticas, aguas superficiales y subterráneas, etc.

Con la geomorfología es posible conocer estos factores -- cuantificándolos (morfometría), conociendo su génesis y evo-

lución (morfogénesis) y la intensidad con que actúan (morfo--
dinámica), podemos determinar la forma en que modela el re--
lieve y la forma en que afecta las obras del hombre.

Se recomienda ante todo, tener un control exacto acerca -
de los procesos gravitacionales y fluviales, que actúan en -
forma intermitente, dependiendo del clima, el grado de pen--
diente, composición de rocas y suelos, grado de fractura, in--
tensidad con que ha actuado el intemperismo, etc., y que pro--
vocan inundaciones, acarreo de sedimentos, deslaves, aludes,
movimientos de tierras, activación de barrancos, etc. Estos--
procesos pueden no actuar durante largos períodos, por lo --
que si al construir una obra, no se toman en cuenta, o están
a cierta distancia de la obra, inactivos o actuando al míni--
mo de su capacidad, al producir cambios en el sistema ecoló--
gico durante la construcción, se pueden activar, lo mismo --
que puede pasar un período de tiempo en el cual se reúnan --
las condiciones para su activación, pueden constituir una --
seria amenaza y causar severas pérdidas materiales y hasta -
vidas humanas.

Además, la mayor parte de la información se obtiene en el
gabinete, evitando el gasto de viajes de reconocimiento. Con--
siderando además, que se puede orientar al tipo de obra que
se proyecta realizar, con base en fotografías aéreas y mapas
topográficos precisos y a la escala que se desee; se puede -
prever los riesgos a corto y a largo plazo que afecten a la
obra.

Todos estos datos permitirán al ingeniero civil escoger -

las mejores zonas para proyectar la obra, poniendo énfasis - en las partes que presentan mayores dificultades y previniendo fenómenos que afecten a la obra en diferentes periodos de su vida.

Además, dadas las características actuales del desarrollo de las ciencias, se exige al profesionista más conocimientos profundos en una especialidad determinada, por lo que se recomienda llevar a cabo los estudios geomorfológicos en grupos interdisciplinarios en los que cada uno de los integrantes se aboque a la tarea de analizar un factor determinado: geomorfológico, geológico, geofísico, edafológico, etc. Posteriormente el estudio en conjunto proporcionará los resultados que permitirán hacer las evaluaciones y recomendaciones necesarias.

B I B L I O G R A F I A

Belousov, V.V. Geología Estructural.
Ed. Mir, Moscu, 1975.

Bolivar, José María. Apuntes de Geología Aplicada.
Fac. de Ingeniería, UNAM. México, 1975.

Gorskov, G.P., Yakushova, A.F. Geología General.
Ed. Mir, Moscu, 1977.

Guerra Peña, Felipe. Fotogeología. Dirección general
de publicaciones de la Universidad Autónoma de México.
Fac. de Ingeniería. México, 1980.

Hails, John. Applied Geomorphology.
Ed. by John R. Hails, Amsterdam, 1977.

Horton, Robert E. "Drainage-Basin Characteristics".
American Geophysics Union Trans. Published by the National
Academy of Sciences. Washington D.C. 1932. pp. 350-361.

Howell, Williams. "Paricutin". U.S. Geological Survey,
No. 255. Años 1950-1956. U.S.A. 1956.

Huang, Walter T. Petrología.
Ed. UTEHA, México, 1968.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
Carta Topográfica Uruapan E13B39. Esc. 1: 50 000
México, 1980

Jain, V.E. Geotectónica General. T. I
Ed. Mir, Moscu, 1980.

King Cuchlaine, A. Techniques in Geomorphology.
Ed. Arnold, London, 1966.

Kostenko Petrovna, Natalia. Geomorfología Estructural.
Publicaciones Instituto de Geografía. UNAM, México, 1975.

Krinine, Dimitri; Judd, William. Principios de Geología y Geotecnia para Ingenieros. Ed. Omega, Barcelona, 1960.

Leet, Don; Judson, Sheldon. Fundamentos de Geología Física.
Ed. Limusa, México, 1977.

Leopold Luna, B. Fluvial Process in Geomorphology.
Ed. W. H. Freeman, San Francisco, 1964.

Lobeck, Armin. Geomorphology.
Ed. McGraw Hill, New York, 1939.

López Ramos, E. Geología de México.
México, 1979.

Lugo Hubp, José. "La Geomorfología y sus aplicaciones a la Ingeniería Civil". II Reunión Nacional de Geología y Geotermia. Tuxtla Gutiérrez, Chis. México, 1978. CFE.

Lugo Hubp, José y Martínez Luna, Victor. "La disección del relieve en el Sur de la Cuenca de México". Boletín No. 10 Instituto de Geografía, UNAM. México, 1980.

Lugo Hubp, José. "La disección del Relieve en la porción Centro-Oriental del Sistema Volcánico Transversal". Boletín No. 11, Instituto de Geografía, UNAM. México, 1981.

Marsal, Raúl y Reséndiz, Daniel. Presas de Tierra y Enrocamiento. Ed. Limusa, México, 1983.

McCullagh, Patrick. Modern Concepts in Geomorphology.
Ed. Oxford University Press. England, 1978.

Morisawa, Marie. Geomorphology, Laboratory Manual.
Ed. John Wiley and Sons. New York, 1976

Paniukov, P. Geología Aplicada a la Ingeniería.
Ed. Mir, Moscú, 1981.

El Parícutín. Instituto de Geología, UNAM. Diversos autores.
México, 1945.

Puig de la Parra, J.B. "Fotogeología de las Comunicaciones."
Bol. de la Soc. Geológica de México. Tomo 18 no. 1, Instituto de Geología. México, 1955.

Puig de la Parra, J.B. "Fotogeología Aplicada a la Ingeniería de Carreteras". Bol. de la Soc. Geológica de México. Tomo -- XXI, no. 1, Instituto de Geología. México, 1958.

Puig de la Parra, J.B. "Procedimientos de Estudio para el Proyecto de una Vía Terrestre". Bol. de la Soc. Geológica de México. Tomo XXIX, no. 1, Instituto de Geología. México, 1966.

Puig de la Parra, J.B. Geología Aplicada.
Ed. Litho Juventud, México, 1979.

Rosas, José Luis y Prieto, Ramon. Exploraciones Geológicas para Obras de Ingeniería Civil. Tesis de Ing. Geólogo, Fac. de Ingeniería, UNAM. México, 1978.

De Römer, Henry S. Fotogeología Aplicada.
Ed. EUDEBA, Buenos Aires, 1969.

Sawyer Kenneth, Ernest. An Introduction to the Geomorphology, Landscapes Studies. Ed. Edward Arnold, London, 1970.

Sowers, G.B., Sowers, G.F. Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Ed. Limusa, México, 1978.

Strahler, Arthur N. "Qualitative Analysis of Watershead Geomorphology". Published by the National Research Council of National Academy of Sciences. American Geophysics Union Trans. Vol. 38 no. 6, Washington D.C., December 1957.

Straler, Arthur N. Modern Physical Geography,
Ed. John Willey and Sons. New York, 1978.

Tricart, Jean. La Epidermis de la Tierra,
Ed. Labor. Barcelona, 1969.

Tuzo, J.W. Deriva Continental y Tectónica de Placas,
Selecciones del Scientific American. Ed. Blume
Madrid, 1981.