

Para determinar la susceptibilidad de un suelo a licuación existen varios criterios (Kramer, 1996):

**a. Criterio geológico**

Los depósitos de suelo que son susceptibles a licuación son los materiales uniformes granulares sueltos tales como depósitos fluviales, coluviales y eólicos saturados. La licuación se ha observado en abanicos aluviales, playas y otros depósitos de semigravedad.

La susceptibilidad a la licuación de depósitos antiguos es generalmente menor que la de los depósitos nuevos. Suelos del Holoceno son más susceptibles que los suelos del Pleistoceno.

La licuación solamente ocurre en suelos saturados, por lo tanto la profundidad del nivel de agua influye en la susceptibilidad a la licuación. La licuación es más común en los suelos donde el nivel freático se encuentra subsuperficial. Los rellenos o depósitos hechos por el hombre en estado suelto son muy susceptibles a la licuación.

**b. Criterio composicional**

La forma, tamaño y gradación de las partículas influye en la susceptibilidad a la licuación. La plasticidad tiene un mayor efecto que el tamaño de granos, los suelos no plásticos son muy susceptibles a la licuación, especialmente los limos y las arenas finas. Algunas arcillas también son susceptibles a la licuación de acuerdo al criterio de Wang (1979). Las arcillas susceptibles a licuación generalmente tienen las siguientes propiedades:

Fracción menor que  $0.005 \text{ mm} \leq 15\%$

Límite líquido  $\leq 35\%$

Contenido de agua  $\geq 0.9 \text{ LL}$

Índice de liquidez  $\leq 0.75$ .

Las gravas también son susceptibles a la licuación, aunque en menor proporción que las arenas.

La susceptibilidad a la licuación también es influenciada por la gradación. Los suelos bien gradados son generalmente, menos susceptibles que los suelos pobremente gradados.

Los suelos de partículas redondeadas son más susceptibles que los suelos con granos angulares.

**c. Criterio de estado**

La susceptibilidad a la licuación depende del estado en que se encuentre el material, esfuerzos, densidad, relación de vacíos.

La licuación puede ocurrir en una masa de suelo o puede ocurrir a lo largo de una superficie o línea de falla en las cuales los esfuerzos de cortante son el factor preponderante. En el primer caso, la licuación tiene como resultado un cambio de volumen o asentamiento y en el segundo, se produce un deslizamiento o falla al cortante.

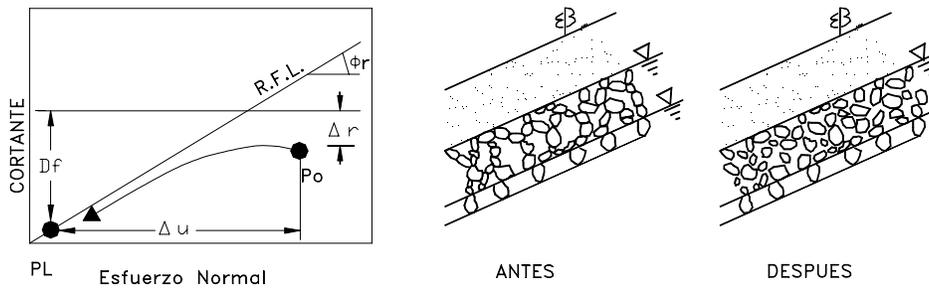
La licuación sobre una superficie de falla fue analizada por Sassa (1996)(Figura 9.6). Esta licuación es causada por la destrucción de la estructura a lo largo de la superficie de falla.

#### 4. Dilatancia

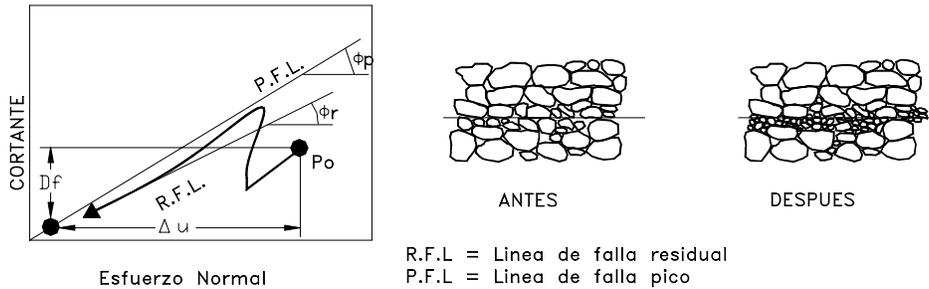
La deformación asociada con un esfuerzo sísmico es muy importante en suelos granulares y en los enrocados de grandes presas. Se observa en presas de enrocado que la aceleración en la parte superior del terraplén es varias veces mayor que la aceleración en su base y en ocasiones excede el coeficiente sísmico de diseño. Lo que ocurre en estos casos es que el conjunto de partículas gruesas que conforman el enrocado es generalmente, muy resistente a la deformación y aunque se presenta un estado crítico de aceleración, la deformación generada no alcanza a producir la falla del terraplén.

Se han realizado ensayos dinámicos hasta la falla de modelos de taludes en forma de terraplén suelos granulares y se ha observado que el terraplén empieza a fallar con una dilatancia visible (Konagai K. – Matsushima T. 1996). La aceleración que produce la falla al cortante de una superficie depende de la frecuencia de la excitación sísmica y del tamaño de los granos y la falla no ocurre hasta que se ha generado una dilatancia considerable.

##### A. LICUACION DE LA MASA DEL SUELO



##### B. LICUACION DE LA SUPERFICIE DE FALLA



R.F.L = Línea de falla residual  
P.F.L = Línea de falla pico

Figura 9.6 Trayectoria de esfuerzos y diagrama de la licuación de una masa de suelo (A) y la licuación a lo largo de una superficie de falla(B) (Sassa, 1996).

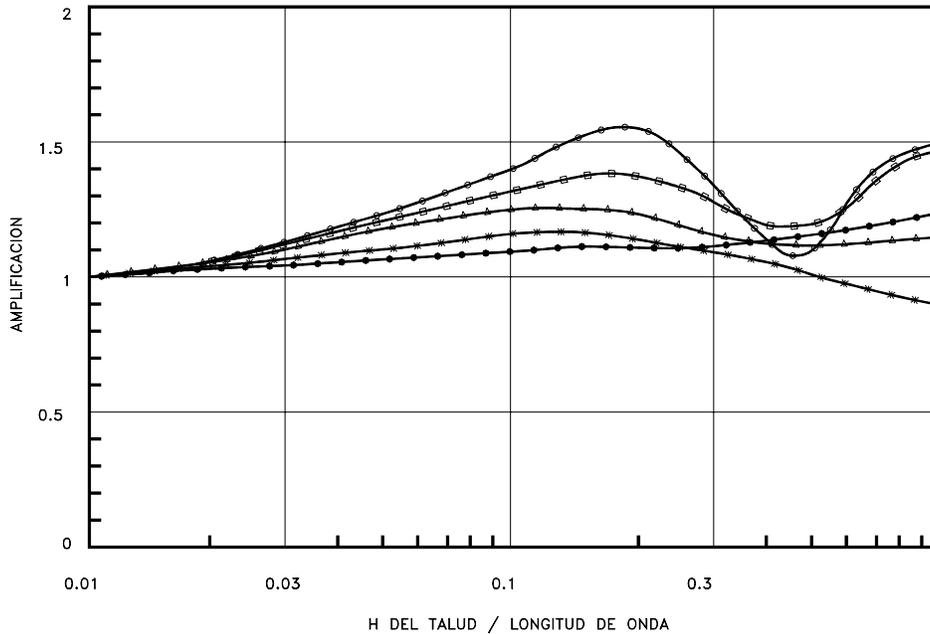


Figura 9.7 Amplificación de onda sísmica en un talud y su relación con la altura del talud y la longitud de onda (Ashford y Sitar 1997).

### 5. Amplificación por Efecto Topográfico

Los efectos aparentes de amplificación topográfica fueron observados por Celebi (1987) en el sismo de Chile de 1985 de magnitud 7.8, notándose amplificaciones espectrales hasta de 10 en taludes de 20 metros de altura.

Boore (1972) realizó estudios numéricos de la respuesta sísmica de los taludes de gran altura y concluyó que el movimiento en el talud consistía en tres fases: una onda directa, una onda reflejada, y una onda difractada. El resultado mostró que había una amplificación importante en la parte alta del talud y que a lo largo de los lados del talud podría ocurrir amplificación y atenuación dependiendo en la geometría del talud y la frecuencia del movimiento. La amplificación tenía un valor hasta del 100% y disminuía con el ángulo del talud y la longitud de onda.

Sitar y Clough (1983) encontraron que las aceleraciones tienden a amplificarse en la cercanía de la cara del talud y la amplificación topográfica varía entre 40 y 76%. La mayor amplificación ocurre en la cresta del talud cuando la frecuencia del sismo está cercana a la frecuencia natural de la topografía.

Sitar (1997) menciona un caso en Santa Mónica donde las aceleraciones amplificadas llegaron a obtener valores de 0.93g. de aceleración horizontal y 0.25g. de aceleración vertical, los cuales produjeron deslizamientos importantes. Estas fallas ocurrieron en depósitos de edad Cuaternario de arena pobremente cementada, en taludes de 40 a 60 metros de altura y pendientes de 45° a 60°. Las fallas más severas ocurrieron generalmente, hasta una distancia de 50 metros de la cresta de los taludes, cantidad

aproximadamente igual a la altura de los mismos y, la mayoría de las fallas ocurrieron hasta 100 metros arriba de la cresta. Este ejemplo de amplificación demuestra el gran efecto que tiene la topografía sobre el comportamiento sísmico de los suelos.

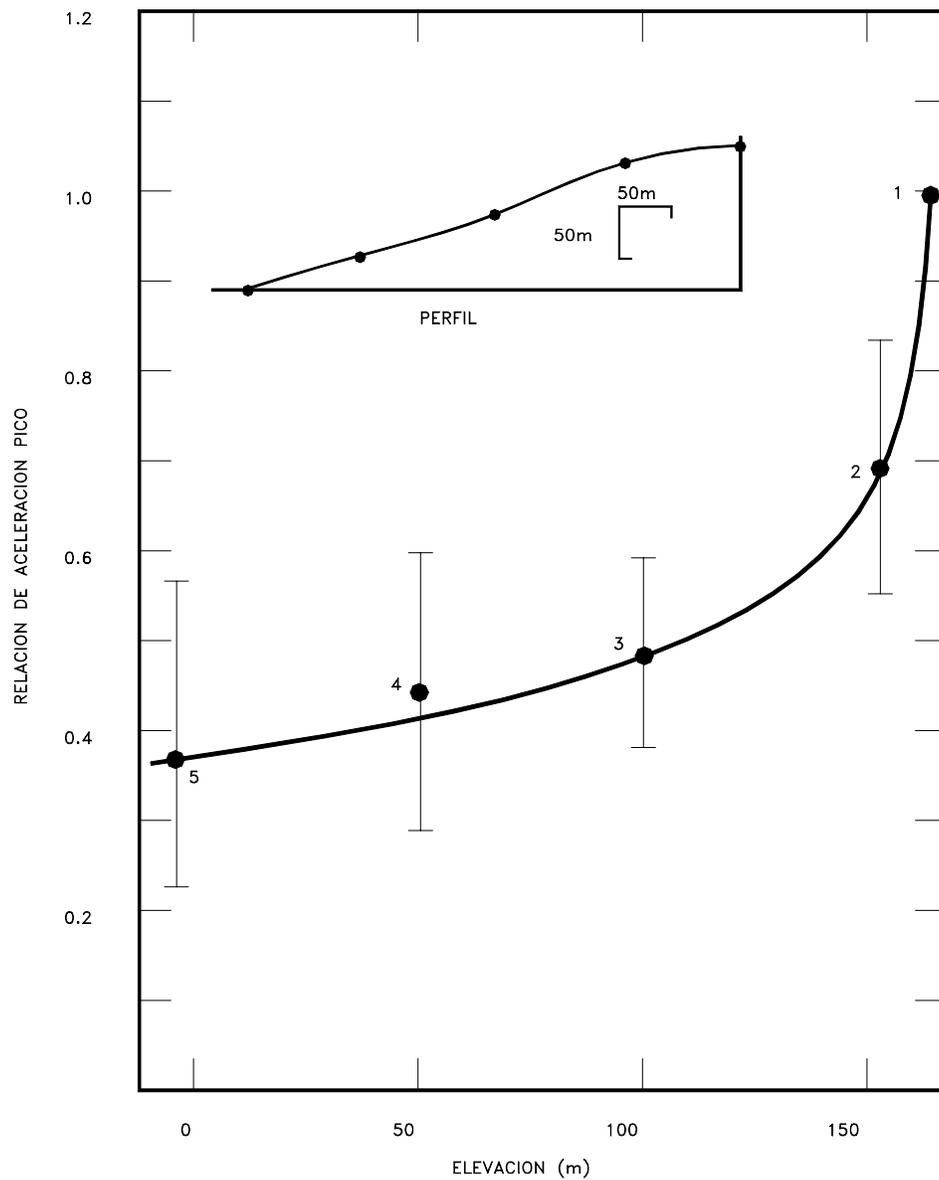


Figura 9.8 Aceleraciones pico normalizadas (Barras de valores medios) medidas en un talud el el Japón (Jibson, 1987).

Ashford (1997) concluyó que el efecto de un talud fuerte sobre la respuesta sísmica puede ser normalizado como una función de la relación entre la altura del talud y la longitud de la onda ( $\lambda$ ). Considerando, el efecto del ángulo del talud es aparente que la amplificación tiende a aumentar en taludes de más de  $60^\circ$  y disminuye con el ángulo de inclinación.

## 6. Comportamiento de Rellenos en caso de sismos

Los rellenos son materiales muy susceptibles a sufrir daño en el caso de sismos. La mayoría de los estudios sobre el comportamiento de rellenos han sido dirigidos a presas de tierra, y muy pocos estudios al comportamiento de rellenos sobre laderas, y específicamente McClure (1973) encontró que ocurre mucho mayor cantidad de fallas en suelos de relleno que en taludes naturales. Algunos de los rellenos más susceptibles son los rellenos de suelos residuales compactados, tales como el granito meteorizado, materiales en los cuales se produjeron fallas catastróficas en el sismo de Kobe (Sassa, 1996).

Los principales problemas de los rellenos asociados con sismos son los siguientes:

- a. Agrietamiento cosísmico, debido a la falta de resistencia a la tensión
- b. Asentamientos por baja densidad.
- c. Mayor susceptibilidad a la licuación que los suelos naturales.

Los rellenos son muy susceptibles a agrietarse en el momento de un sismo o a deformarse vertical y horizontalmente sufriendo asentamientos diferenciales. Los rellenos de tierra armada resisten en mejor forma los movimientos sísmicos que los rellenos comunes.

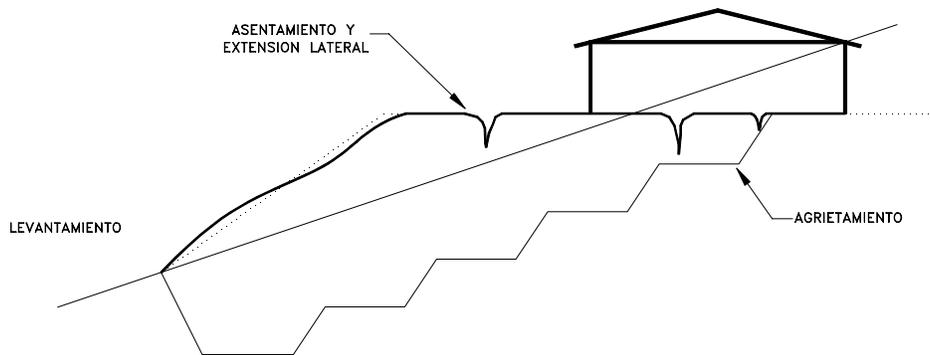


Figura 9.9 Falla típica de un relleno en el caso de un sismo (Stewart, 1995).

Tabla 9.4 Relación histórica de algunos deslizamientos activados por sismos y volcanes

Sitio del sismo	Fecha	Magnitud Richter	Materiales	Características de los deslizamientos	Vidas humanas
China Kanding-Louiding	1786			Deslizamiento gigantesco que produjo el desborde de una presa y como resultado una gran inundación.	100.000
Italia Calabria	1786			Los deslizamientos formaron cerca de 250 lagos.	50.000
Rusia Tadzhiik	1911	7.4	Roca	Deslizamiento de roca que destruyó el pueblo de Usoy y afectó al río Murgab en una longitud de 65 Kms.	54
Indonesia Java	1919	volcán	Materiales volcánicos	Se produjeron flujos de lodo caliente que cubrieron un área de 185 km <sup>2</sup> , destruyendo 104 poblaciones.	5.110
China Gansu Province	Diciembre 16 1920	8.5	Loess	Un número no determinado de deslizamientos en un área de 67100 Km <sup>2</sup> .	230.000
China Deixi	1933	7.5		Se produjeron deslizamientos de gran magnitud y falló una presa de 255 metros de alto en el río Min.	6.800 por deslizamientos y 2.500 al fallar una presa
Rusia Tadzhiik	1949	7.5	Roca (granitos)	Empezó como un deslizamiento de rocas y se transformó en una inmensa avalancha de loess y residuos de granito.	20.000
Perú Monte Huascaran	Enero 1962	7.75	Residuales	Avalancha.	4.000 a 5.000
EE.UU. Alaska	1964	9.4	Arenas	Un gran deslizamiento relacionado con procesos de licuación destruyó parcialmente las ciudades Anchorage, Valdez, Whittier, Seward.	
Perú Monte Huascaran	Mayo 31 1970	7.7	Residuales	Avalancha de detritos que sepultó el pueblo de Yungay y Ranrahirca y un número grande de deslizamientos en un área de 30.000 Km <sup>2</sup> .	40.000
Guatemala	Febrero 4 1976	7.5	Depósitos de piedra pómez y sus suelos residuales	Más de 10.000 caídos y deslizamientos de residuos de taludes casi verticales. El movimiento sísmico rompe la cohesión o cementación de materiales duros pero frágiles.	
Washington Mount St. Helen	Mayo 18 1980	Volcán	Roca	Deslizamiento de 2.8 Km <sup>2</sup> de roca y residuos destruyó nueve puentes. El deshielo del nevado produjo flujos de lodo. Este es el mayor deslizamiento de la historia conocido (Schuster, 1996) 2.8 x 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> .	10
Colombia Nevado del Ruiz	Noviembre 13 1985	Volcán	Volcánicos	Una avalancha o flujo de lodo en el valle del río Lagunillas, producto del deshielo del nevado del Ruiz destruyó la ciudad de Armero.	23.000
Nueva Guinea	1986	7.1	Residuos de roca	Una avalancha formó una presa de 210 metros de altura y un lago de 50 millones de m <sup>3</sup> . al fallar la presa produjo un flujo – avalancha de 100 metros de espesor de residuos saturados.	
Ecuador	Marzo 5 1987	6.9	Residuales	Varios miles de deslizamientos de roca suelo y lodo que destruyeron casi 70 kilómetros de un oleoducto y varias carreteras.	1.000

Sitio del sismo	Fecha	Magnitud Richter	Materiales	Características de los deslizamientos	Vidas humanas
California Superstition Hills	Noviembre 12 1987	6.6	Arenas y Limos	Licuación de arenas y limos. Se midieron presiones de poro excesivas que empezaron a desarrollarse cuando la aceleración alcanzó 0.21g a los 13.6 segundos de iniciado el sismo.	
California Loma Prieta	Octubre 17 1989	7.1		2.000 a 4.000 deslizamientos de roca suelo y residuos y algunos casos de licuación que produjeron flujos.	
Colombia Páez	Junio 6 1994	6.4	Residuales saturados por lluvias previas	Más de 3000 deslizamientos en taludes de fuerte pendiente cubiertos por bosques afectaron un área de 5500 Km <sup>2</sup> , en la cuenca del río Páez y Produjeron una gigantesca avalancha de lodo por el cauce del río, la cual destruyó varios poblados.	1971
Japón Kobe	Enero 1995	7.2	Residuales de granito	630 deslizamientos de más de 30 metros de largo localizados hasta una distancia de 10 kilómetros de la falla activa	5500 muertos por el sismo la mayoría no relacionados con deslizamientos
Nikawa (Japón Kobe)	Enero 1995	7.2	Relleno con suelos residuales de granito	Destruyó 11 casas. El volumen del deslizamiento fue de 120.000 m <sup>3</sup> .	34 muertos

## 9.6 AMPLIACION DE LA ONDA EN EL SITIO

La importancia de la respuesta de la onda en cada sitio ha sido demostrada en los sismos de los últimos años. Los resultados de esos estudios han servido para desarrollar recomendaciones de clasificaciones y espectro de diseño para utilización en los códigos. Seed y Bray (1997) recomiendan una tabla de clasificación de sitio para tener en cuenta en el análisis sísmico. De acuerdo con la clasificación del sitio, hay una amplificación de la onda de la roca al suelo. Para la clase de sitio A no existe amplificación y para las clases de sitio E y F la amplificación es muy grande.

Seed y Bray (1997) sugieren evaluar el nivel de respuesta de diseño para un sitio determinado en 3 pasos. Primero, determinar la aceleración que ocurriría si el sitio fuera roca competente (sitio A), basándose en la sismicidad regional. Luego, modificar la aceleración obtenida por un factor de amplificación que depende de las características del sitio. Finalmente, se determina el espectro respuesta para este valor de aceleración.

## 9.7 LICUACION

Los fenómenos de licuación consisten en la pérdida rápida de resistencia al esfuerzo cortante, temporal o definitiva. Tal pérdida conduce al colapso a cualquier estructura vial edificada sobre o hecha de un material que entra en licuación.

Tabla 9.5 Sistema de clasificación de sitio para sismos Seed y Bray (1997)

Clase	Condición	Descripción	Características
(A <sub>0</sub> )	A <sub>0</sub>	Roca muy dura	$V_s > 5000$ pies / seg. En los 50 pies + sub-superficiales
A	A <sub>1</sub>	Roca competente con muy poco o ningún suelo	$2500$ pies / seg. $\leq V_s \leq 5000$ pies / seg. Y espesor del suelo + roca meteorizada $< 40$ pies con $V_s > 800$ pies / seg.
AB	AB <sub>1</sub>	Roca blanda fracturada o meteorizada	$V_s \leq 800$ pies / seg. $40$ pies $\leq H$ suelo + roca meteorizada $\leq 150$ pies
	AB <sub>2</sub>	Suelo delgado duro sobre roca o roca meteorizada	
B	B <sub>1</sub>	Suelos principalmente no cohesivos profundos	No hay arcilla blanda $H$ suelo cohesivo $< 0.2H$ suelo no cohesivo
	B <sub>2</sub>	Suelos duros cohesivos poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos	$V_s > 500$ pies /seg. $H$ de suelos $\leq 200$ pies
C	C <sub>1</sub>	Suelos duros cohesivos poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos y pequeñas capas de arcilla blanda	Igual a B <sub>2</sub> excepto $0$ pies $< H$ arcilla blanda $\leq 10$ pies
	C <sub>2</sub>	Suelos principalmente no cohesivos muy profundos	Igual a B <sub>1</sub> excepto Espesor de suelo $> 300$ pies
	C <sub>3</sub>	Suelos cohesivos duros profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos sin arcilla blanda	$H$ suelo $> 200$ pies $V_s > 500$ pies /seg.
	C <sub>4</sub>	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles pequeños a moderados de vibración	$10$ pies $\leq H$ arcilla blanda $\leq 100$ pies $A_{\max.roca} \leq 0.25$ g
D	D <sub>1</sub>	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles medios a fuertes de excitación	$10$ pies $\leq H$ arcilla blanda $\leq 100$ pies $0.25$ g $< A_{\max.roca} \leq 0.45$ g o $0.25$ g $< A_{\max.roca} \leq 0.55$ g y $M \leq 7.25$
(E) <sup>6</sup>	E <sub>1</sub>	Suelos blandos cohesivos muy profundos	$H$ arcilla blanda $> 100$ pies
	E <sub>2</sub>	Suelos blandos cohesivos y excitaciones muy fuertes	$H$ arcilla blanda $> 10$ pies y/o $A_{\max.roca} > 0.55$ g o $A_{\max.roca} > 0.45$ g y $M > 7.25$
	E <sub>3</sub>	Arcillas de muy alta plasticidad	$H$ arcilla $> 30$ pies con IP $> 75\%$ y $V_s < 800$ pies / seg.
(F) <sup>7</sup>	F <sub>1</sub>	Suelos altamente orgánicos o turbas	$H > 20$ pies
	F <sub>2</sub>	Sitios susceptibles de sufrir fallas del terreno debido a licuefacción u otros modos de inestabilidad general	

Las dos causas a que puede atribuirse esa pérdida de resistencia son:

1. Incremento de los esfuerzos cortantes actuantes y aumento correspondiente de presión de poro.

2. Desarrollo rápido de elevadas presiones en el agua intersticial, quizás como consecuencia de un sismo, una explosión, etc.

Esta segunda causa se asocia a un colapso estructural rápido del suelo cuyos vacíos, saturados de agua, tienden a reducirse, desarrollándose presiones en aquella.

La licuación ha producido las fallas más dramáticas y espectaculares, debido a la magnitud de la masa de suelo que se pone en juego al producirse este fenómeno, el cual puede cubrir áreas muy extensas.

Los suelos susceptibles a la licuación son las arenas sueltas (en éstas la deformación tiende a compactar la estructura, transmitiéndose al agua las presiones que generan el fenómeno), uniformes, finas (en ellas se reduce su permeabilidad, impidiendo la disipación de presiones en el agua) y saturadas; los depósitos de limos no plásticos sueltos son particularmente peligrosos.

Los suelos granulares más susceptibles a la licuación son los finos, de estructura suelta, saturados. Estas características describen a las arenas finas y uniformes y a los suelos finos no plásticos o sus mezclas.

Las arenas sueltas con  $d_{10} \cong 0.1$  mm. y coeficiente de uniformidad  $C_u < 5$  y los limos con índice de plasticidad menor que 6 son los materiales más peligrosos, tanto formando parte del cuerpo del terraplén, como en un terreno de cimentación o en un talud natural.

En la práctica se pueden identificar los suelos licuables como los suelos granulares sueltos cuya resistencia a la penetración estándar es menor o igual a 5 golpes por pie.

En suelos tales como arenas saturadas relativamente sueltas, es posible que una sollicitación dinámica rápida, como la que puede presentarse durante un sismo, origine en el agua elevadas presiones que crecen a un ritmo mayor de lo que alcanzan a disiparse por la salida del agua de los poros de la estructura del material.

Al incrementarse las presiones del agua interior, se debilita el contacto entre los granos de la arena disminuyendo su resistencia al esfuerzo cortante hasta valores nulos o muy próximos a cero, en estas condiciones la masa de arena se comporta como un líquido, fluyendo bajo la acción de las cargas que provocan el fenómeno.

Las fallas por licuación en arcillas se han reportado siempre asociadas a arcillas (rápidas) marinas emergidas por la recuperación isostática de los Continentes y lavadas con posterioridad, con lenta substitución del agua salada originalmente contenida en sus poros por agua dulce, lo que provoca intercambios catiónicos (pérdida de iones de sodio) que propician variación de la resistencia al esfuerzo cortante y gran aumento en su sensibilidad.

Esta menor resistencia conduce a un menor factor de seguridad en los taludes que se forman en estos suelos, que fallan sin causa aparente. En la falla, la arcilla se remodela hasta llegar a la condición de un líquido, estado que se conserva de manera perdurable, pues la falta de iones en el agua impide la reestructuración.

La licuación ha ocurrido frecuentemente en arcillas saturadas muy sensibles y en arenas finas sueltas, sobre todo en condición saturada y el fenómeno ha sido muy bien estudiado y existe abundante literatura en mecánica de suelos sobre este tema.

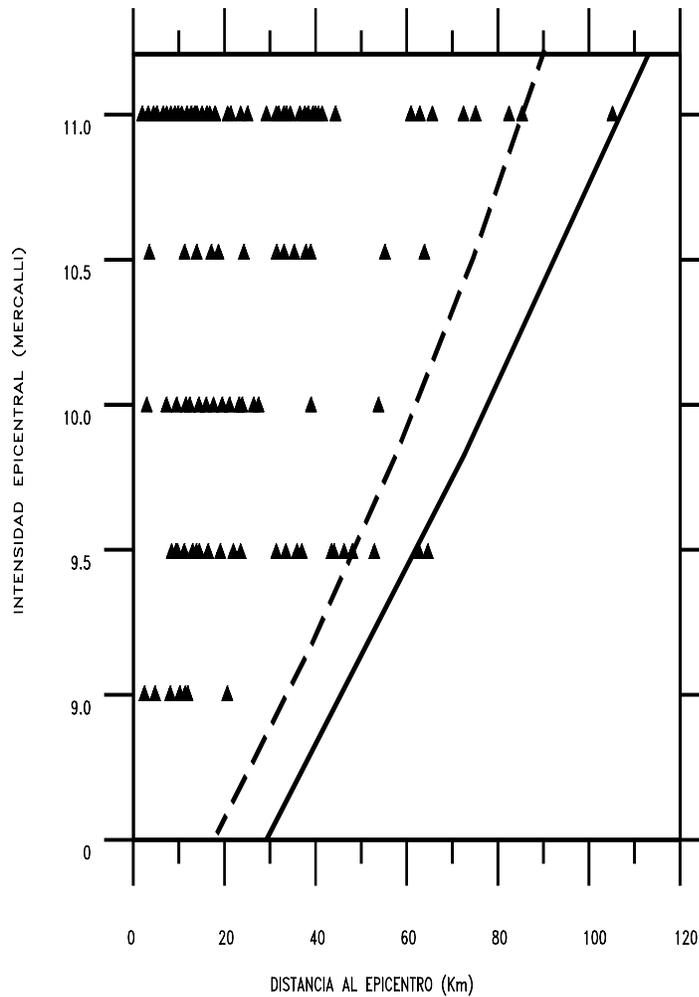


Figura. 9.10 Distancia máxima al epicentro de sitios de licuefacción para diferentes intensidades epicentrales. ( Romeo y Delfino, 1996).

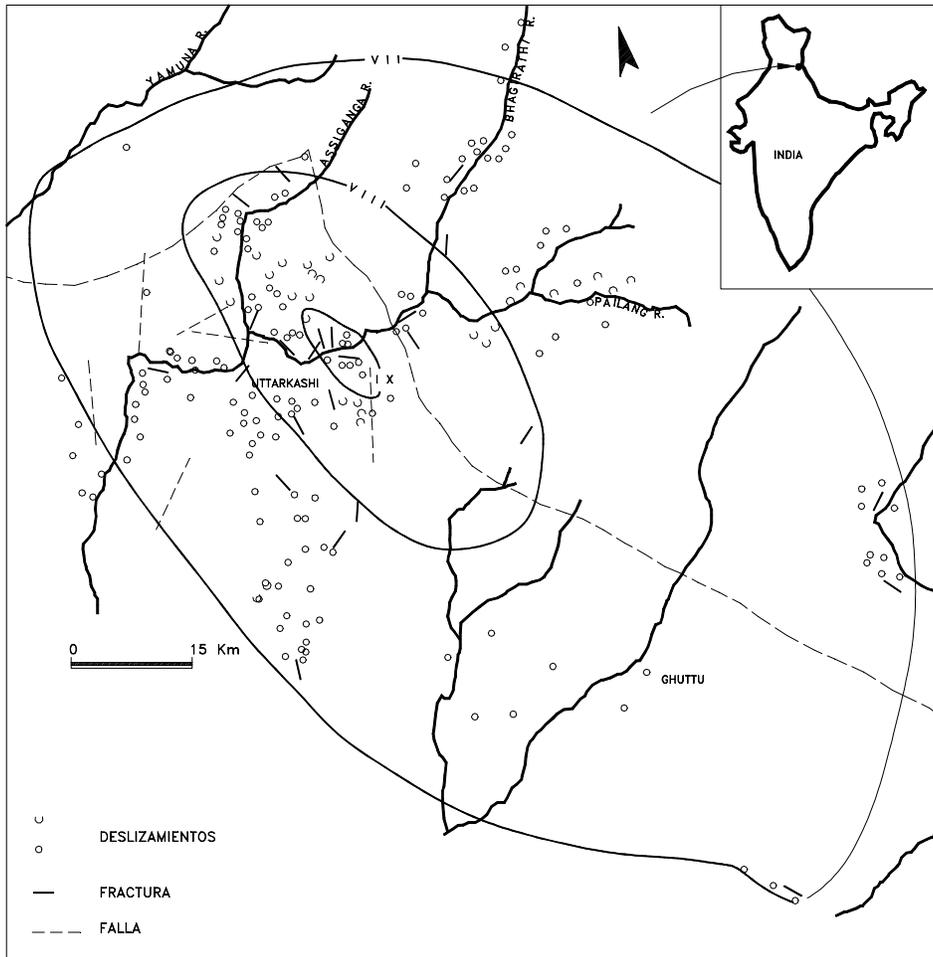


Figura. 9.11 Localización de deslizamientos cósmicos en el mapa isosísmico del terremoto de Uttarkashi (Pande- 1996).

### 9.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS DESLIZAMIENTOS COSISMICOS

El conocimiento de las situaciones en las cuales se produjeron deslizamientos de tierra activados por eventos sísmicos, ha servido de guía un tanto empírica para poder predecir la ocurrencia de deslizamientos. Es lógico esperar que la actividad de deslizamiento disminuya al aumentar la distancia al epicentro y existe una distancia a partir de la cual no ocurren deslizamientos de determinado tamaño.

La cinemática, geometría y evolución de los fenómenos de deslizamiento dependen principalmente de la litología, estructura y condiciones de saturación de los suelos o rocas, así como de la intensidad del evento sísmico.

Un trabajo realizado por Keefer (1984) muestra que para la producción de cierto tipo de deslizamientos se requiere una gran magnitud del sismo (tabla 9.6).

Tabla 9.6 Estimativos de la magnitud necesaria para que un sismo produzca deslizamientos de tierra (Adaptado de Keefer-1984)

Magnitud	Tipo de movimiento
4.0	Caídos de roca, caídos de suelo, fracturación cosísmica
4.5	Deslizamientos de suelo o bloques de suelo
5.0	Deslizamientos de roca, bloques de roca, esparcimientos laterales, flujos de suelo y deslizamientos submarinos
6.0	Avalanchas de roca
6.5	Avalanchas de suelo.

Las deformaciones tienden a ser fracturas de fragilidad en rocas duras y deformaciones plásticas en rocas blandas y suelos. Las formaciones rocosas se caracterizan principalmente, por los caídos y avalanchas de roca y las rocas muy fracturadas o meteorizadas por los flujos o avalanchas de residuos de roca.

Los suelos generalmente, generan deslizamientos de rotación o traslación y flujos de suelo o lodo saturado. Las rocas y los suelos cohesivos pueden presentar fracturación o agrietamientos de tensión. Los suelos granulares saturados pueden presentar flujos por licuación. Los deslizamientos son generalmente poco profundos pero cubren áreas relativamente grandes.

La frecuencia y distribución de los deslizamientos cosísmicos está relacionada con el mapa de líneas isosísmicas, siendo más frecuentes y de mayor magnitud en los sectores de mayor intensidad sísmica y menos frecuentes en las áreas de intensidad sísmica baja.

La dirección de los deslizamientos puede tener una tendencia hacia la dirección más fuerte del sismo, la cual es generalmente normal a la dirección de la falla que produce el movimiento sísmico (Sassa – Fukuoka 1995).

Después de ocurrido el sismo se continúa presentando deslizamientos aislados de materiales que fallan en un proceso más lento.

### **Clasificación de los deslizamientos cosísmicos**

Sassa (1996), presentó una clasificación de tipos de deslizamientos causados por el sismo de Kobe de 1995 en la forma siguiente:

1. Deslizamientos rápidos
2. Deslizamientos lentos
3. Fracturación cosísmica

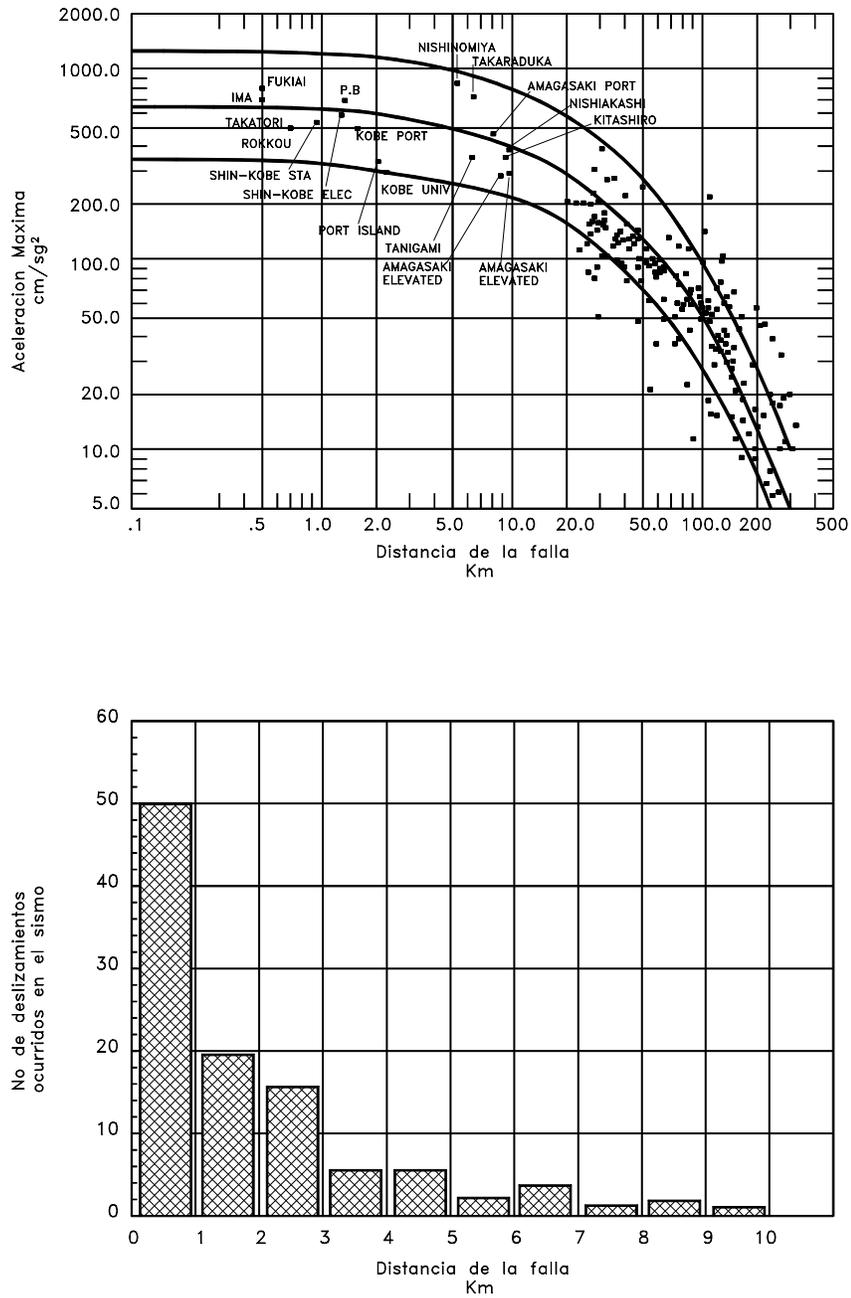


Figura 9.12 Aceleraciones y deslizamientos cosísmicos a diferentes distancias de una falla activa en el terremoto de Kobe- Japón, 1995 (Fukuoka-Irikura, 1996).

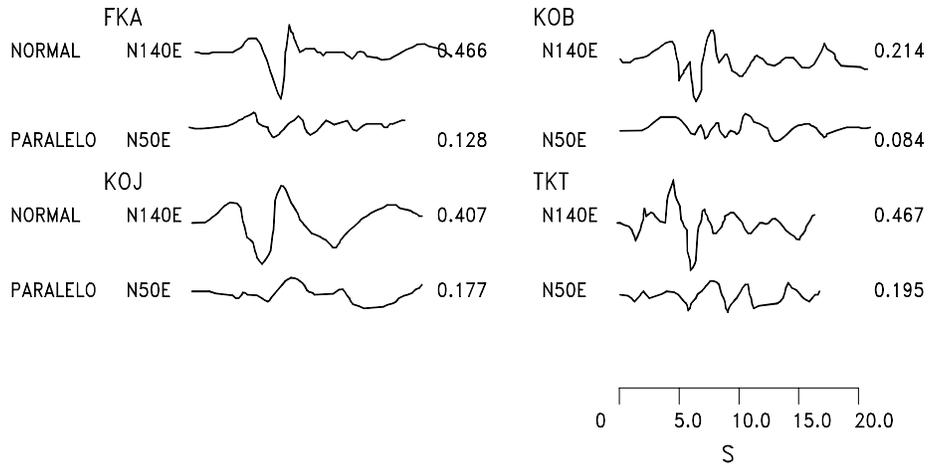


Figura 9.13 Desplazamiento grabado del sismo de Kobe-Japon en Direcciones normal y paralela a la falla (Irikura 1996).

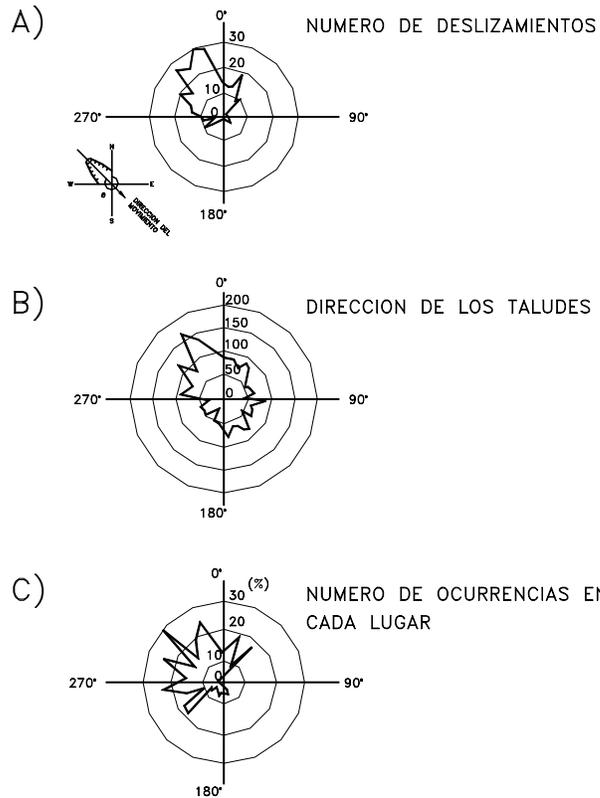


Figura 9.14 Dirección de los deslizamientos en las montañas Rokko. Este en el terremoto de Kobe en Japón (Okimura, 1995).

### 9.9 FRACTURACION COSISMICA

La fracturación o agrietamiento del suelo y de los macizos rocosos ocurren como un efecto directo de los esfuerzos inducidos por un sismo en áreas con diversas intensidades de la onda sísmica. Su ocurrencia se observa especialmente, en la corona de taludes de alta pendiente y en los escarpes semiverticales de terrazas cementadas erosionadas.

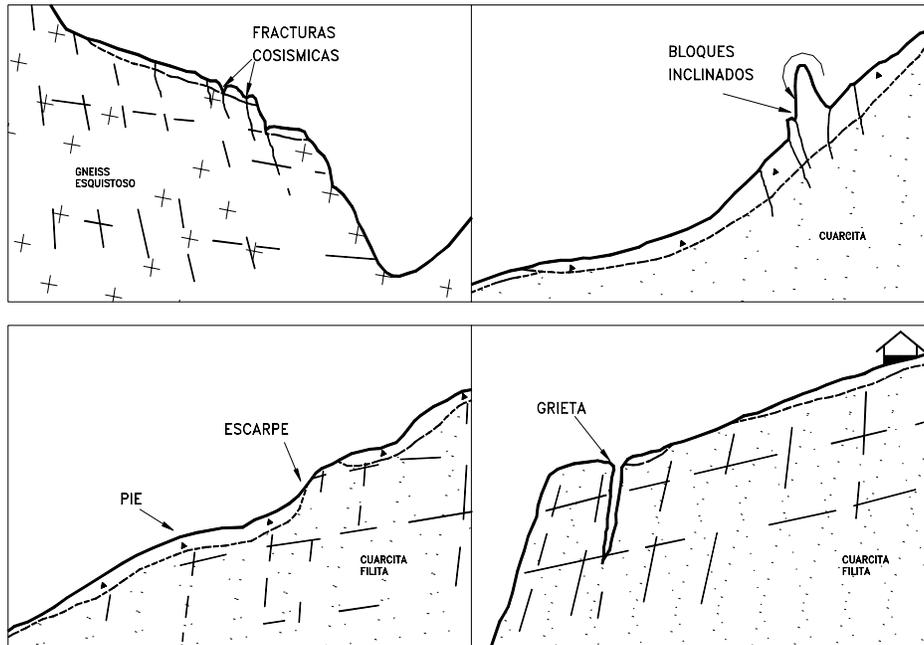


Figura. 9.15 Agrietamientos cosísmicos en La India (Pande 1996).

La magnitud de los agrietamientos depende de la cercanía al epicentro, de las características topográficas y de estructura geológica de la ladera afectada. Se han reportado agrietamientos de longitudes hasta de 100 metros y abertura hasta de 55 centímetros (Pande P. –Joshi K.C. –Narula P.L.,1996) en sitios cercanos al epicentro de un sismo de magnitud 6.6 en el Himalaya.

La orientación de las fisuras depende principalmente, de la geología y topografía y es independiente de las características del sismo. Generalmente, las fracturas son de tensión y el movimiento puede describirse como una inclinación con centro de giro profundo. Con frecuencia las fracturas producen deslizamientos o caídos de roca, suelo o residuos al poco tiempo después de ocurrido el sismo, especialmente en periodos de lluvias. La escorrentía se infiltra por las grietas produciendo presiones de poro y erosión en las fracturas.

### Comportamiento de Taludes de gran altura en arenas cementadas

Las arenas cementadas en ocasiones presentan taludes de gran altura y pendiente fuerte las cuales son especialmente susceptibles a agrietamiento en el caso de sismos (Ashford y Sitar, 1994). En situaciones de presiones bajas de confinamiento en las superficies de los taludes las arenas cementadas producen un comportamiento frágil y una resistencia baja a la tensión. Como resultado se producen fácilmente grietas de tensión y su comportamiento puede ser devastador bajo cargas dinámicas. El problema es agravado por la amplificación de la aceleración en la cresta de los taludes. La amplificación topográfica puede ser hasta de un 76% (Sitar and Clough, 1983).

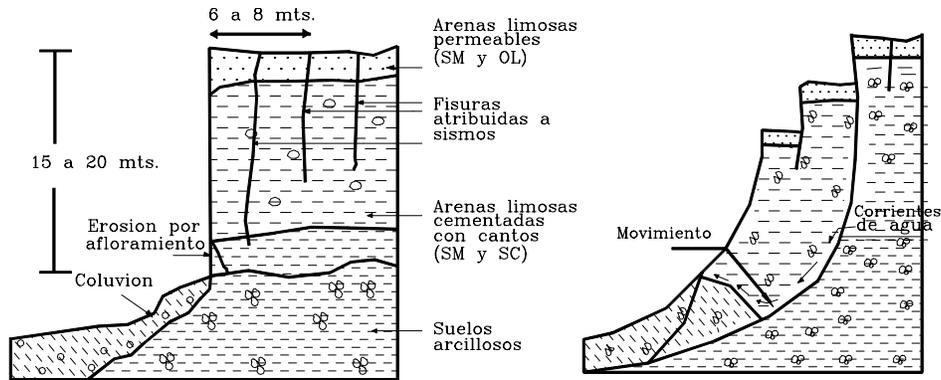


Figura 9.16 Falla por agrietamiento relacionado con eventos sísmicos en Bucaramanga-Colombia.

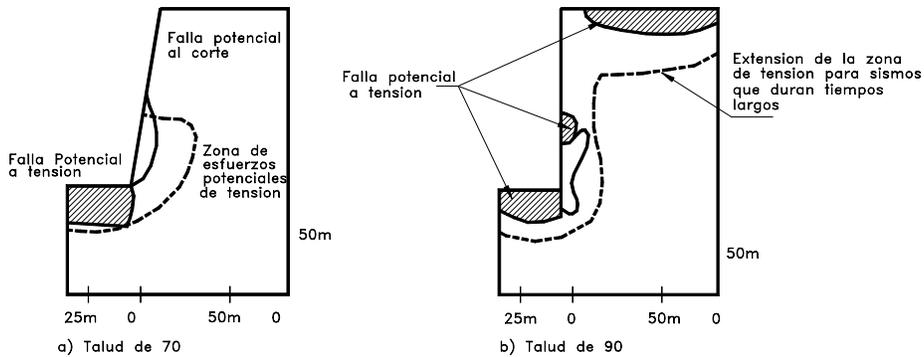


Figura 9.17 Zonas de concentración de esfuerzos en un sismo.

### 9.10 DESLIZAMIENTOS POR ACTIVIDAD VOLCANICA

Algunos de los más grandes deslizamientos ocurridos están relacionados con actividad volcánica.

Previamente a la erupción de un volcán se producen generalmente, sismos frecuentes de pequeña magnitud relacionados con el ascenso de masas de magma debajo del volcán

Los deslizamientos pueden estar relacionados físicamente con la erupción y coinciden con grandes explosiones en la cabeza del volcán. En las primeras etapas de la erupción se depositan flujos piroclásticos, los cuales forman nuevos domos o amplían alguno de los existentes, generándose deslizamientos en las faldas del volcán. El deposito de materiales aumenta las pendientes de los taludes y los deslizamientos pueden continuar por varios meses después de la erupción. En ocasiones la altura del domo disminuye debido a los deslizamientos y se produce el movimiento de grandes volúmenes de residuos que cubren varios kilómetros cuadrados de área.

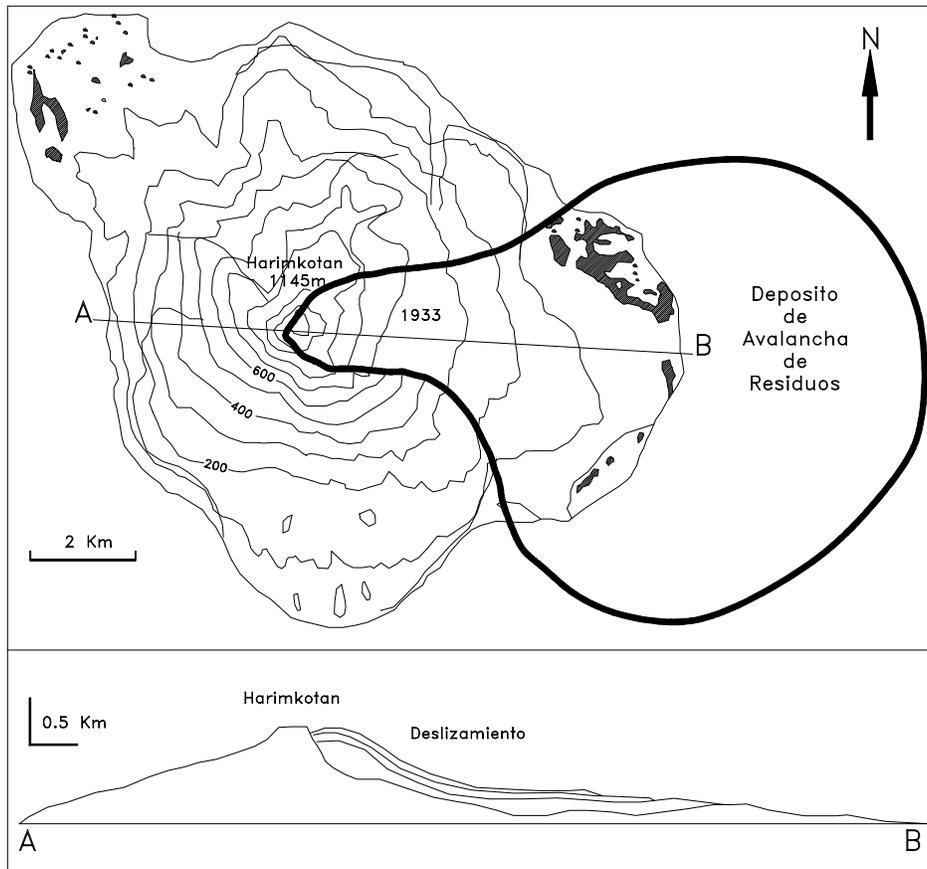


Figura 9.18 Deslizamiento en el volcán Harimkotan en Rusia (Belousov, 1996).

El problema más grave de deslizamientos ocurre en los volcanes-nevados. Al ocurrir erupciones sobre los glaciares o depósitos de nieve o hielo se produce la fusión del hielo o nieve por la alta temperatura de los materiales expulsados que pueden ser flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas (“surges”), flujos de lava o caída de piroclastos. La erupción sobre glaciares puede generar flujos de lodo.

En todos los casos, para evaluar la cantidad de nieve y hielo que puede ser fundida por los materiales volcánicos, es de vital importancia establecer el área cubierta por la nieve y no el volumen de estos.

Esta situación fue comprobada durante el análisis de los flujos de lodo generados por la erupción del Nevado del Ruíz, en noviembre de 1985, por Pierson et al. (1990) y Thouret (1990) quienes determinaron que la mencionada erupción sólo fundió una capa delgada de los glaciares cubiertos por los productos eruptivos y que las más afectadas fueron la nieve fresca y parte de la nieve fresca recristalizada conocida como “firn”.

Otro dato aportado por Thouret (1990) es que no toda el agua resultante de la fusión de hielo, nieve y “firn” contribuyó a la formación de flujo de lodo sino que parte de ella, aproximadamente 50%, tuvo los siguientes destinos:

- 1) quedó incluida en avalanchas de nieve, sedimentos con nieve medio fundida y lodo que fluyó por fuera de los canales de los “lahares” o se incorporó a los depósitos húmedos de las oleadas (“surges”) piroclásticas;
- 2) fue incorporada en los productos de la explosión freática;
- 3) fue sublimada como vapor durante el paso de los flujos piroclásticos; o 4) se almacenó en cavidades dentro del hielo.

Los flujos de lodo pueden aumentar de tamaño y características a medida que avanzan ladera abajo llevando consigo nieve, hielo, agua, lodo y rocas que encuentra a su paso. Las paredes de los valles son socavadas y los materiales aluviales de los ríos y cañadas pueden ser incorporados al flujo.

## **9.11 ANALISIS SISMICO DE TALUDES**

La predicción de deslizamientos producidos por sismos o análisis de estabilidad sísmica puede clasificarse en varios sistemas:

### **1. Análisis pseudoestático**

El método utiliza el mismo procedimiento general de cualesquiera de los métodos de equilibrio límite, con la diferencia de que se incluyen fuerzas pseudoestáticas horizontales y verticales, debidas al evento sísmico. Estas fuerzas sísmicas se asumen, que son proporcionales al peso de la masa de deslizamiento potencial y de los coeficientes sísmicos  $k_h$  y  $k_v$ , expresada en términos de veces la aceleración  $g$ , producida por el sismo.

Generalmente, se recomienda analizar con carga sísmica pseudoestática solamente la superficie más crítica identificada en el análisis estático. La mayoría de los análisis solamente tienen en cuenta la fuerza sísmica horizontal y  $k_v$  se asume igual a cero.

La magnitud del coeficiente sísmico debe simular la naturaleza de la fuerza del evento que depende de la intensidad o aceleración del sismo, duración del movimiento y

frecuencia. Para un análisis muy conservador se puede asumir que el coeficiente sísmico  $k_h$  es igual a la máxima aceleración pico esperada de un evento sísmico en el sitio. Sin embargo, este análisis conservador puede producir dificultades numéricas para  $k_h$  mayor que 0.4.

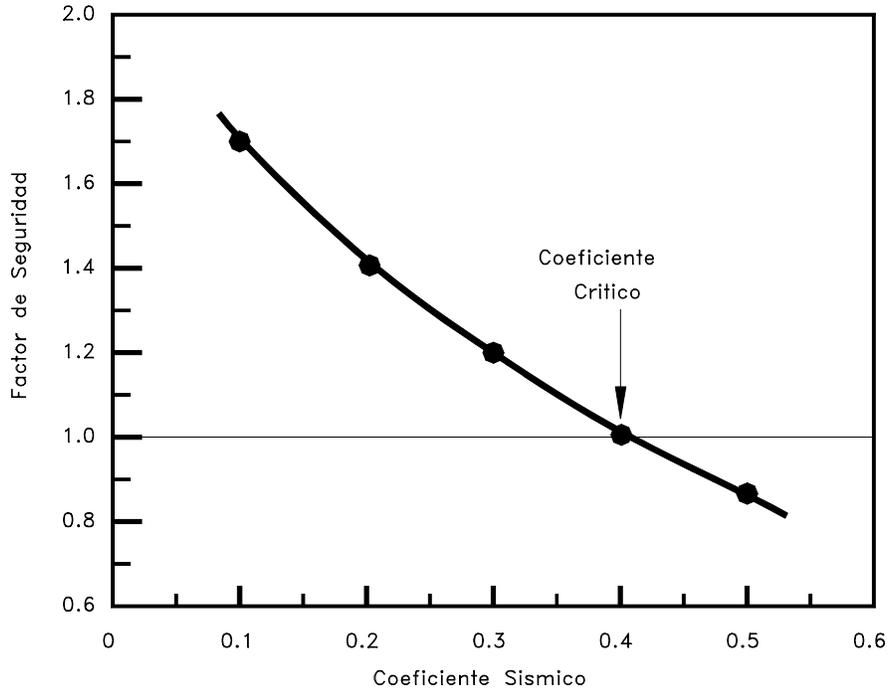


Figura 9.19 Variación del factor de seguridad con el coeficiente sísmico horizontal  $K_h$ .

Tabla 9.7 Coeficientes sísmicos para análisis seudoestático

$k_h$	F.S.	Observaciones
0.10g	> 1.0	Sismo importante. Cuerpo de ingenieros, 1982.
0.15g	> 1.0	Sismo de gran magnitud, Cuerpo de ingenieros, 1982.
0.15g a 0.25g	> 1.0	Japón
0.15g	> 1.15	Seed, 1979. Con una reducción de resistencia del 20%.
½ de la aceleración máxima	> 1.0	Hynes-Griffin y Franklin, 1984, y una reducción de resistencia del 20%.

Un procedimiento es el utilizar los coeficientes indicados en la tabla 9.7; Sin embargo, en ocasiones se realiza el análisis a la inversa haciendo una gráfica de coeficiente sísmico contra factor de seguridad, el cual permite determinar la magnitud de la amenaza para diversas aceleraciones de sismo.

En el cual se utiliza el método estático de análisis de estabilidad colocando una fuerza sísmica seudoestática adicional. Existen varias formas de plantear el problema de acuerdo al tipo de falla analizado y a los parámetros sísmicos utilizados.

**a. Cálculo del factor de seguridad para una superficie de falla finita plana y fuerzas sísmicas horizontal y vertical (Kramer 1996).**

Las magnitudes de las fuerzas pseudoestáticas son:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

Donde:

$F_h$  y  $F_v$  = Fuerzas pseudoestáticas horizontales y verticales

$a_h$  y  $a_v$  = Aceleraciones máximas horizontales y verticales

$k_h$  y  $k_v$  = Coeficientes pseudoestáticos

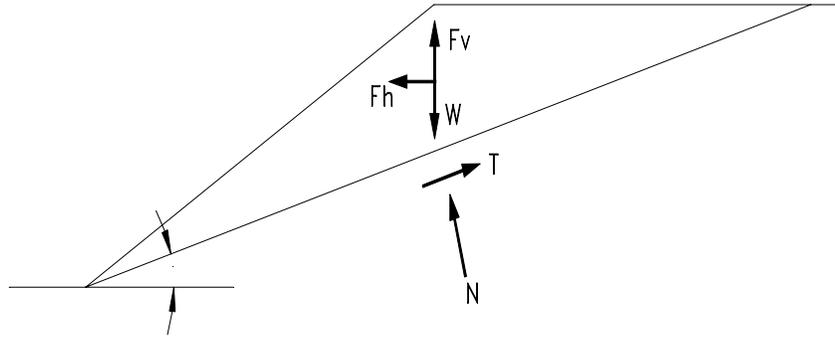


Figura 9.20 Análisis sísmico pseudoestático para una falla plana.

El factor de seguridad para una falla plana de longitud  $L$  es igual a:

$$F_s = \frac{\text{Fuerza resistente}}{\text{fuerza actuante}} = \frac{cl + [(W - F_v) \cos \alpha - F_h \sin \alpha] \tan \phi}{(W - F_v) \sin \alpha + F_h \cos \alpha}$$

Donde:

$c$  = Cohesión

$L$  = Longitud del plano de falla

$\alpha$  = Angulo de inclinación del talud

$\phi$  = Angulo de fricción

$W$  = Peso de la masa deslizada.

**b. Cálculo de la aceleración máxima que produce una falla en un talud infinito**

Es práctica corriente utilizar solamente un valor de aceleración máxima, sin diferenciar los valores de aceleración horizontal y vertical

Un procedimiento pseudoestático consiste en determinar la aceleración máxima necesaria para causar un deslizamiento durante un sismo.  $a_{\max}$  la cual está dada por la siguiente expresión para el caso de un talud infinito:

$$\frac{a_{max}}{g} = \left[ \frac{c_d}{c} \left( F_s - \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \right) + \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} - 1 \right] \div \left( \frac{1}{\tan\alpha} + \tan\phi \right)$$

Donde:

$\alpha$  = Angulo de inclinación del talud

$\phi$  = Angulo de fricción

$c$  = Cohesión estática

$c_d$  = Cohesión dinámica

$g$  = Aceleración de la gravedad

$$F_s = \left( \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \right) + \frac{c}{\gamma H \cos\alpha \sin\alpha} \quad \text{Para el talud seco}$$

$$F_s = \frac{\gamma_b}{\gamma} \times \left( \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \right) + \frac{c}{\gamma H \cos\alpha \sin\alpha} \quad \text{Para talud saturado}$$

$H$  = profundidad de la falla

$\gamma$  = Peso unitario del suelo

$\gamma_b$  = Peso unitario sumergido

**c. Calculo del factor de seguridad para falla curva con un valor de  $a_{max}$**

Un procedimiento utilizado es presentado por Ishiara (1985). El factor de seguridad es calculado para diferentes valores de la aceleración máxima, de acuerdo a una fórmula modificada utilizando el procedimiento original de Janbú (1955), utilizando un procedimiento similar al que se presenta en el capítulo 4, dividiendo la masa deslizada en dovelas y realizando las respectivas sumatorias.

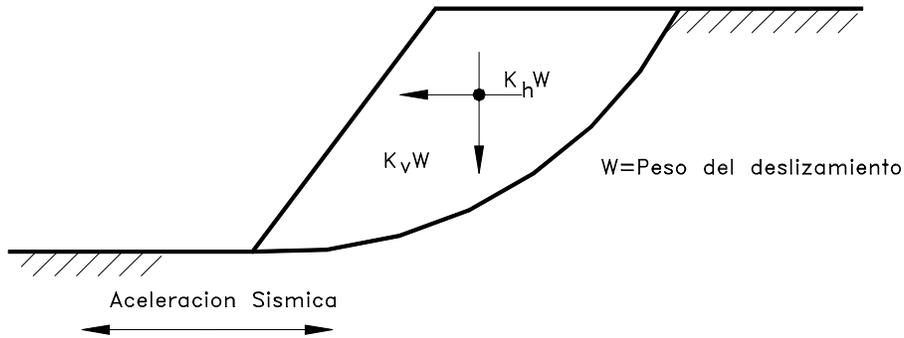


Figura 9.21 Análisis sísmico pseudoestático de equilibrio límite para una falla curva.

$$F_{sd} = \frac{\sum [w \tan\phi + c_d l \cos\alpha] \div [\cos^2\alpha (1 + \tan\alpha \times \tan\phi \div F_d)]}{\sum \left[ w \tan\alpha + \frac{a_{max}}{g} w \right]}$$

***Determinación del valor de  $a_{max}$  para el análisis***

La cuantificación de un valor de aceleración máxima para estabilidad de taludes debe tener en cuenta los siguientes criterios empíricos:

- a. Si la masa considerada para deslizamiento es rígida la aceleración inducida sobre la masa debe ser igual a la aceleración máxima esperada con sus respectivas amplificaciones por sitio y topografía.
- b. Si la masa de suelo no es rígida, como es el caso de la mayoría de situaciones y si se tiene en cuenta que la aceleración pico solo se presenta en períodos de tiempo muy pequeños no suficientes para producir una falla; se pueden utilizar valores entre 0.1 y 0.2g, dependiendo de la intensidad del sismo esperado. Marcuson(1981) recomienda utilizar valores entre 1/3 y 1/2 de la aceleración máxima esperada con las respectivas amplificaciones.

***Limitaciones del método pseudoestático***

El método pseudoestático presenta algunas inconsistencias para modelar el efecto real de un sismo sobre un talud. Algunas de estas limitaciones son las siguientes:

- a. No es confiable en suelos que generan presiones de poros altas
- b. No tiene en cuenta que algunos suelos presentan degradación de la resistencia hasta en un 15% debido a la onda sísmica.

**2. Métodos de análisis de las deformaciones**

En este análisis se tienen en cuenta las deformaciones inducidas por el evento sísmico. Si las fuerzas de inercia debidas al sismo y a la situación del talud (Estáticas + Dinámicas), superan las fuerzas resistentes disponibles, el factor de seguridad alcanza valores por debajo de 1.0 y la masa de suelo no está más en equilibrio y se produce una aceleración por el desbalance de fuerzas. Esta aceleración corresponde a una deformación a lo largo de la superficie de falla considerada.

El análisis de estas deformaciones se realiza por medio de una doble integración de la aceleración de exceso.

El problema del análisis dinámico consiste en su complejidad, la cual lo hace poco práctico para análisis rutinarios de estabilidad. Existen sin embargo, programas basados en elementos finitos, los cuales permiten trabajos de investigación detallados sobre las deformaciones y sus efectos.

***Método del desplazamiento de Newmark***

Este procedimiento extiende el análisis a la consideración de la historia de aceleraciones (Acelerogramas) de la masa de deslizamiento.

Este acelerograma se selecciona en tal forma que represente un modelo realístico de los movimientos del terreno esperados en el sitio y luego se compara con la aceleración límite para determinar los desplazamientos permanentes.

El método de Newmark asume que existe una bien definida superficie de falla, un material rígido y perfectamente plástico, una pérdida despreciable durante el sismo y la ocurrencia de deformaciones permanentes solamente si el esfuerzo dinámico supera la resistencia al cortante. Adicionalmente, se supone que el talud solo se deforma hacia abajo. El procedimiento requiere que previamente se determine el valor de la aceleración crítica  $k_y$ , utilizando métodos convencionales de equilibrio límite.

La principal dificultad de este método es la selección de un acelerograma apropiado que simule el movimiento del talud; sin embargo, una vez se ha seleccionado el acelerograma, se pueden calcular los desplazamientos permanentes por integración

doble de las partes del acelerograma que excede la aceleración límite para la superficie de falla crítica. Existen programas de computador para desarrollar esta doble integración (Abramson, 1996) (Houston, 1987).

Los desplazamientos permanentes representan el movimiento del centro de gravedad de la masa deslizada. Existen criterios encontrados sobre desplazamiento permanente tolerable, mientras algunos Autores como Wiecezorek (1985), Keefer (1989) y Jibson (1993) utilizan límites permitidos entre 5 y 10 centímetros; Hynes-Griffin y Franklin (1984) sugieren que se pueden permitir desplazamientos hasta de cien centímetros para una presa de tierra bien construida. Debe tenerse en cuenta que los taludes construidos con materiales dúctiles, plásticos, pueden permitir desplazamientos mucho mayores que los taludes de materiales frágiles y sensitivos.

## REFERENCIAS

- Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M., (1996) "Slope stability and stabilization methods". Wiley-Interscience, p.628.
- Ashford S.A., Sitar N. (1994) "Seismic Response of Steep Natural Slopes, Report No. UCB/EERC-94/05 – University of California at Berkeley, 207p.
- Ashford S.A., Sitar N., Lysmer, J.N., Deng, N. (1997) "Topographic Effects on the Seismic Response of Steep Slopes", Bulletin of the Seismological society of America, 87(3).
- Belousov A., Belousova M.(1996) "Large scale landslides on active volcanoes in the 20<sup>th</sup> century –Examples from the Kurile-Kanchatka region(Russia)" Seventh international Conference on Landslides Trondheim Norway. Vol. 2, pp. 953-957.
- Boore, D.M. (1972) "A Note on the Effect of Simple Topography on Seismic SH Waves", Bulle, Seis. Soc. Am., 62(1) , pp. 275-284.
- Celebi, M. (1991) "Topographic and Geological Amplification: Case Studies and Engineering Implications", Structural Safety, 10 (1991), pp.199-217.
- Gutenberg, B., Richter, C.F. (1954) " Seismicity of the Earth" Associated Phenomena, Princeton University Press.
- Housner, G. W. (1970) "Strong ground motion en Earthquake engineering", R. Wiegel, editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ingeominas-Carder (1994) "Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial complejo de Domos Santa Isabel, cordillera central de Colombia". Revista de Ingeominas No. 3. pp. 1-28.
- Irikura, K (1996) "Strong ground motion of the Hyogoken-Nambu earthquake and the fault model. The Great Hanshin – Awaji Earthquake Disaster – for the Disaster Prevention Research". Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, pp81-98.
- Ishihara K.,(1985) "Stability of natural deposits during earthquakes". Proceedings of the eleventh international conference on soil mechanics and foundation engineering. San Francisco, pp.321-376.
- Keefer D.K. (1984) "Landslides caused by Earthquakes" Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, pp. 406-421.
- Konagai K., Matsushima T. (1996) " Effect of dilation on the dynamic stability of artificial coarse granular slopes." Seventh international Conference on Landslides Trondheim Norway Vol 2. Pp. 983-988.
- Kramer S.L., (1996) "Geotechnical earthquake engineering". Prentice Hall. New Yersey, 653 p.
- Makdisi F.L., Seed H.B., (1978), "Simplified procedure for computing maximum acceleration and natural period for embankments, ". Report UCB/EERC-77/19, Eartquake engineering research center, University of California, Berkeley, California.
- Marcuson, W.F. (1981) "Moderator's report for session on Earth dams and stability of slopes under dynamic loads". Proceedings, International conference on recent advances in Geoechnical earthquake engineering and soil dynamics, St. Louis, Missouri, Vol. 3 p.1175.
- McClure, F.E. (1973). "Performance of Single family Dwellings in the San Fernando Earthquake of February 9, 1971". U.S. Dept. of Commerce, NOAA, May.
- O'Rourke, T.D., Crespo, E. (1988). "Geotechnical Properties of Cemented Volcanic Soil", J. Geotechnique. Engrg., ASCE, 114 (19),pp 1126-1147.

- Okimura, T. (1995). "Characteristics of slope failures in the Rokko mountains triggered by the Hyogoken-Nanbu earthquake". Research Report of landslides and slope failures triggered the Hyogoken-Nanbu earthquake, Japan Landslides Society, pp.1-15 (in Japanese).
- Pande P., Joshi K.C., Narula P.L.(1996) " Coseismic landslides and fractures induced by Uttarkarkash Earthquake (1991) Remedial measures and mitigation efforts" Seventh international Conference on Landslides Trondheim Norway Vol 2 .pp. 1019-1024.
- Pierson, T. (1990) "Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. Jour. Volcanology and Geothermal Research, 41 (1-4): 17-66
- Plant, N., Griggs, G.B. (1990) "Coastal Landslides Caused by the October 17, 1989 Earthquake", California Geology, 43 (4) 75-84.
- Romero J.A., Martínez J.M., Avila G., Escallón J.O. (1994) "El sismo del 21 de julio de 1993, Puerto Rondón, llanos orientales de Colombia, Revista Ingeominas No. 4, pp. 15-34.
- Sassa, K. (1996) "Prediction of earthquake induced landslides" Proceedings of the Seventh International Symposium on landslides. Trondheim, pp. 115-132.
- Sassa, K., Fukuoka H., Scarascia G., Irikura K, Okimura T. (1995) "Landslides Triggered by the Hyogoken-Nanbu Earthquake" Landslide News No.9 Tokyo, pp 2-5 .
- Sassa, K., Fukuoka, Scarascia H., Mugnozsa, G.- Evans, S. (1996) "Earthquake-Induced-Land-slides: Distribution, Motion, mechanisms", in special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995, Hyogoken – Nambu Earthquake, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical society, Jan., pp. 53-64.
- Schuster, R.L. (1996) "The 25 most catastrophic landslides of the 20<sup>th</sup> century" Proceedings of the eighth International Conference and field trip on landslides. Granada-España, pp. 53-62.
- Seed, R.B., Bray, J.D., Chang, S.W. , Dickenson S.E. (1997) "Site-dependent seismic response including recent strong motion data" Seismic Behaviour of Ground and Geotechnical Structures, Seco e Pinto, Editor, Hamburgo, pp. 125-134.
- Sitar, N. , Clough, G.W. (1983) "Seismic Response of Steep Slopes in Cemented Soils", J. Geotechnique. Engrg., ASCE, 109(2) 210-227.
- Thouret, J.C. (1990). "Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. Jour. Volcanology and Geothermal Research, 41 (1-4): 177-201.
- Wang, W. (1979) "Some finding in soil liquefaction". Water conservancy and hydroelectric power scientific research institute, Beijing, China.
- Wieczorek G.F (1996) " Landslide triggering mechanisms". Landslides Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board. Washington, pp. 76-90
- Yamanouchi T. (1977) "Tensile Stresses in Unsupported Slopes of a Pumice Soil", Proceedings, Ninth I.C.S.M.F.E., Tokyo, Vol. 3 418-419.
- Yang D.B. , Zhengzhong Z. (1996) " Investigation and analysis of seismic landslides in the loessal region of China' s Northwest" Seventh international Conference on Landslides Trondheim, Norway Vol 2. pp. 959-964.

# 10 Procesos de origen Antrópico

## 10.1 INTRODUCCION

En el sismo de Kobe – Japón de 1995- se observó que los deslizamientos en las áreas urbanas producidos por el sismo eran de mayor tamaño que los generados en condiciones geológicas y topográficas en áreas no habitadas. Esto indica que un área urbana es más susceptible a sufrir deslizamientos que un área no urbana.

El hombre ha sido un permanente modificador de los elementos que conforman la superficie de la tierra y el efecto sobre los taludes ha sido el de agente desestabilizador.

Las principales modificaciones causadas por el hombre y que afectan en forma importante la estabilidad de los taludes son:

### 1. Cambios en la topografía y cargas del talud

- a. Descargue del talud por remoción de suelos y rocas por corte.
- b. Sobrecarga por medio de rellenos, edificios, etc.
- c. Subsistencia o hundimiento por excavaciones subterráneas (túneles).

### 2. Cambios en las condiciones de humedad

- a. Modificación de las condiciones naturales del agua superficial por medio de canales, zanjas, represas, etc.
- b. Modificación de las condiciones naturales del agua subterránea por medio de pozos de bombeo, concentración de las infiltraciones, etc.
- c. Infiltración de ductos de agua, especialmente acueductos y alcantarillados.
- d. Aceleración de infiltración por la presencia de depósitos de basura y residuos sobre el talud.
- e. Negligencia en el drenaje superficial y subterráneo.
- f. Cambio general en el regimen de aguas superficiales.
- g. Construcción de reservorios o presas.

### 3. Vibraciones

- a. Vibraciones de máquinas.
- b. Vías de comunicación,
- c. Explosivos.

d. Efectos de la construcción de obras (especialmente el movimiento de maquinaria).

#### **4. Cambios en la cobertura vegetal**

- a. Cambio de la estructura y condiciones de la capa superficial de suelo por prácticas de agricultura, pastoreo, tala de bosques, etc.
- b. Modificación del uso del suelo.

#### **5. Otros factores antrópicos**

- a. Negligencia en el manejo de los taludes.
- b. Utilización de los taludes para el paso de personas y animales.

## **10.2 PROCESOS DE URBANIZACION**

Los deslizamientos de tierra son un problema muy común en las ciudades construidas en áreas de montaña.

Existe una relación entre la ocurrencia de deslizamientos y la rapidez de los procesos de urbanización, en especial de los desarrollos desordenados. Los casos más graves ocurren en áreas geotécnicamente susceptibles y con desarrollo urbano rápido y desordenado. Las diversas intervenciones del hombre tales como cortes, rellenos, deforestación, concentración de aguas lluvias y servidas, etc., determinan en buena parte la ocurrencia de deslizamientos.

Koukis (1996) reporta que aproximadamente el 35 % de los deslizamientos en Grecia están relacionados con actividades humanas, siendo sobrepasados solamente por las lluvias intensas y la erosión.

El proceso de ocupación desordenada de áreas urbanas tiene importancia directa sobre la ocurrencia de deslizamientos. Amaral y otros (1996) encontraron una relación directa entre el número de deslizamientos en Río de Janeiro y la localización de asentamientos humanos desordenados (favelas). Se encontró que el 60% de los deslizamientos en Río de Janeiro afectan asentamientos desordenados, asociados con los cortes indiscriminados, rellenos sobre laderas de alta pendiente, fugas incontroladas en ductos de agua y descarga directa de aguas domésticas, acueducto y aguas lluvias.

Las consecuencias de la actividad antrópica urbana sobre la estabilidad de taludes se pueden clasificar en dos grupos: Las consecuencias directas de la acción tales como los derrumbes de una excavación y las consecuencias indirectas como la infiltración de agua en esa excavación.

#### **Efectos del proceso de urbanización**

Los deslizamientos en áreas urbanas son afectados por elementos propios del proceso de urbanización y el manejo inapropiado del ambiente. Se debe tener en cuenta la presencia y posible rotura o fugas de redes de aguas de acueducto y alcantarillado.

Fotografía 10.1 Los elementos urbanos son generalmente más vulnerables a los deslizamientos. Se observa el efecto de un deslizamiento lento. La diferencia de tiempo entre las dos fotografías es de 8 meses.

Las modificaciones topográficas producen en ocasiones movimientos diferenciales y concentración de esfuerzos en la estructura de los conductos que conducen a su rotura. Cuando los conductos atraviesan zonas de cambio de materiales de cimentación se pueden presentar con el tiempo movimientos diferenciales que pueden conducir a la rotura de las tuberías y a deslizamientos.

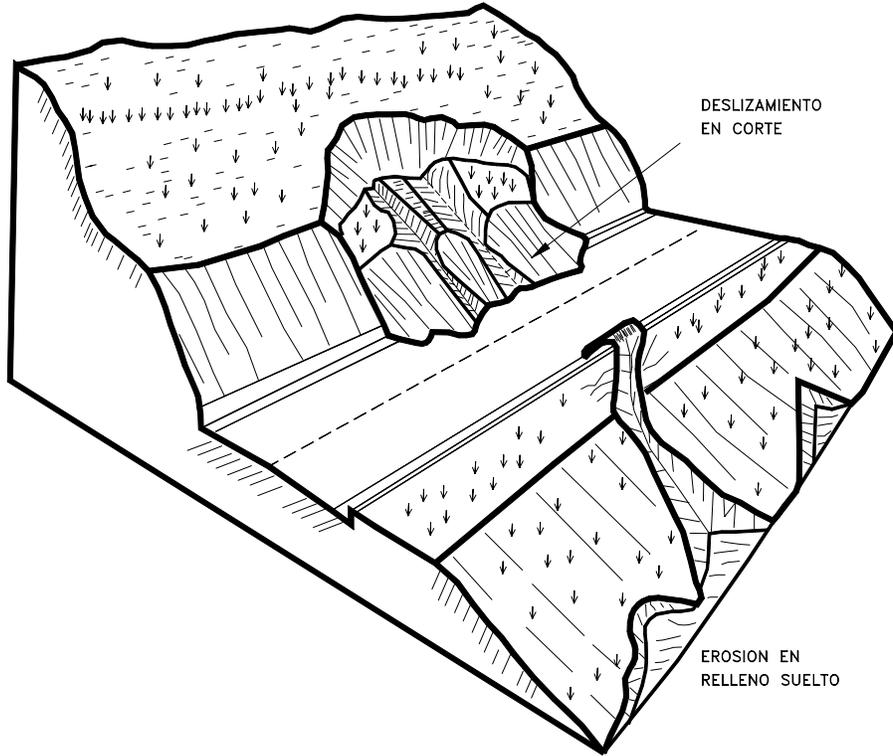


Figura 10.1 Efectos de la modificación de la topografía

Otros factores importantes son la entrega y manejo inadecuado de las corrientes de agua lluvia o servida recolectadas en el área urbana, la cual puede producir focos de erosión, la infiltración en zanjas no revestidas al igual que la existencia de pozos sépticos o de infiltración.

### 10.3 MODIFICACION DE LA TOPOGRAFIA

La modificación de la topografía del terreno mediante cortes o rellenos puede producir la activación de un deslizamiento. Un corte en un talud produce varios cambios sustanciales en el estado de la formación residual.

Deslizamiento causado por infiltración de agua causada por el hombre

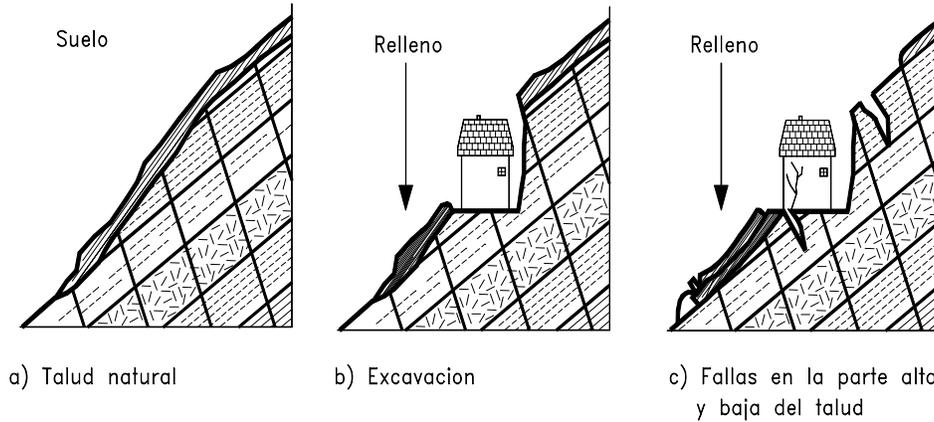


Figura 10.2 Los cortes y rellenos pueden generar deslizamientos de tierra debidos a los cambios de esfuerzos y a la infiltración de agua.

Las excavaciones generan cambios topográficos y concentración de esfuerzos de cortante y en ocasiones descubren superficies críticas para deslizamiento como estratificación, fracturas y planos de cambio de meteorización.

El fenómeno incluye una relajación de los niveles de esfuerzos a compresión y un aumento de los esfuerzos al corte, una exposición del material meteorizado al aire y a los cambios de humedad, alteración de propiedades por cambios físico - químicos causados por la exposición al aire y a la humedad, y modificación de las presiones negativas en el agua de los poros.

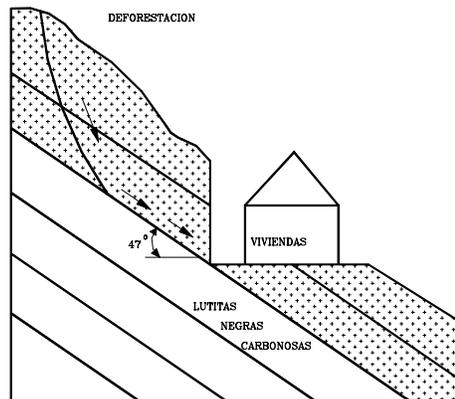


Figura 10.3 Deslizamiento en Alto Jordán – Colombia, por excavación para la construcción de un grupo de viviendas en un talud de lutitas con buzamiento fuerte.

Los materiales derivados de la Lutitas son especialmente propensos a los cambios ambientales y algunos materiales, como los derivados de Esquistos, se alteran muy rápidamente siendo cada vez más parecidos a un suelo (Sowers - 1985).

Un fenómeno muy importante es la apertura de discontinuidades heredadas, por acción de la relajación de los esfuerzos de compresión. En ocasiones se forman grietas de tensión, las cuales se convierten en conductos para la transmisión del agua infiltrada y la formación de presiones altas de poros.

Generalmente se genera un sector de discontinuidades abiertas semiparalelo a la superficie del corte y de espesor directamente proporcional a la altura del talud cortado el cual es más profundo hacia el pie del corte. La mayor parte de las fallas que ocurren al poco tiempo de ejecutado el corte están relacionados con estas grietas. El resultado puede ser un deslizamiento de forma lineal o de arco semiplano, el cual rompe el material residual, seguido por un flujo (Sowers - 1985).

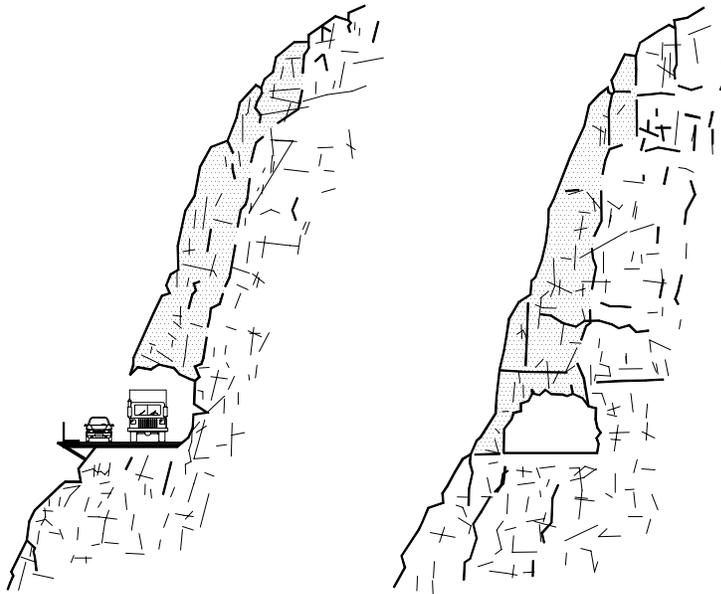


Figura 10.4 Inducción de esfuerzos de corte y relajación de esfuerzos de compresión al cortar para un semitúnel.

En el caso de suelos sin discontinuidades heredadas en ocasiones, se pueden realizar cortes altos verticales (Blight, 1988), pero cuando aparecen estructuras heredadas o discontinuidades se pueden presentar deslizamientos al poco tiempo de efectuado el corte. La ejecución de un corte en el pie de un talud puede dejar al descubierto una discontinuidad o un plano de estratificación y provocar un movimiento aún en taludes de pendiente suave (Blight y otros, 1970).

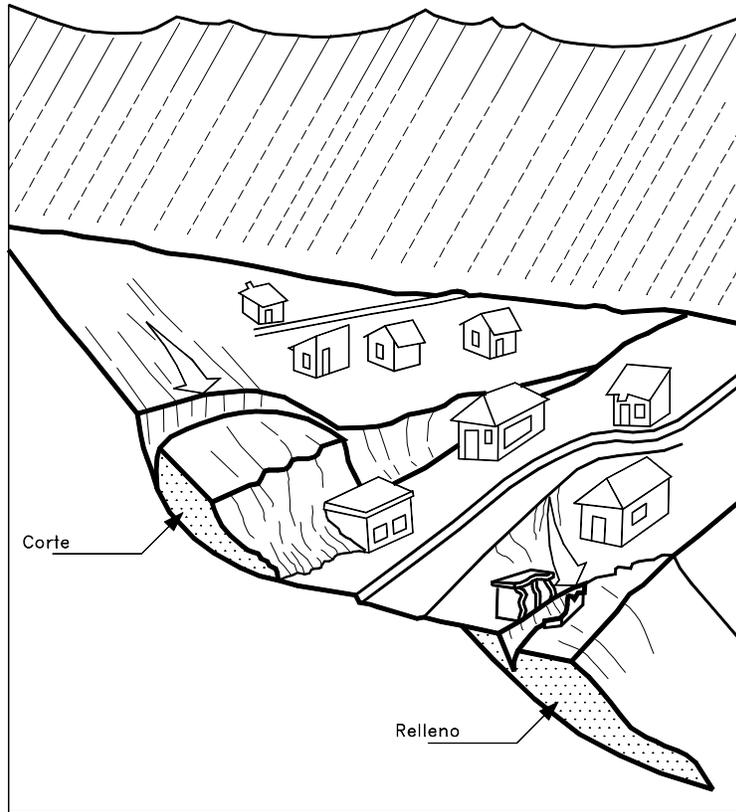


Figura 10.5 Deslizamientos y erosión producidos por corte y relleno en la construcción de una vía o la explanación para una urbanización.

### Rellenos

La colocación de rellenos directamente sobre los taludes y generalmente sin compactación o compactados inadecuadamente permiten la sobrecarga de las laderas y la saturación y colapso de los suelos sueltos, facilitando los escurrimientos de suelo, flujo de los suelos sueltos saturados, y formación de cárcavas por erosión.

Los rellenos son generalmente más porosos y menos permeables que los suelos naturales, lo cual genera acumulaciones de agua en los poros. Los rellenos son menos cementados y su estructura más susceptible a deterioro o colapso por eventos sísmicos y el contacto entre el suelo natural y el relleno constituye una línea de debilidad en la cual se concentran los flujos de agua, se generan agrietamientos por diferencia en las características de deformación y comportamiento sísmico. La mayoría de los deslizamientos en rellenos ocurre a lo largo del contacto corte-relleno.

En ocasiones se colocan rellenos sobre suelos blandos como coluviones o depósitos aluviales recientes y el suelo sobre el cual se coloca el relleno puede fallar al cortante.

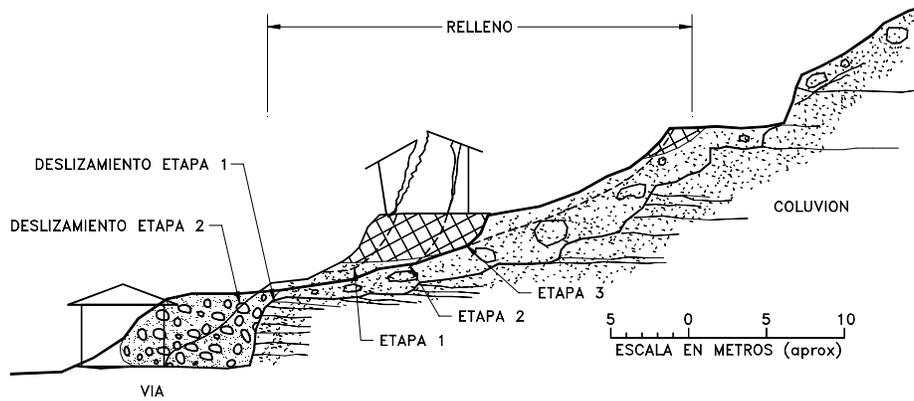


Figura 10.6 Deslizamiento ocasionado por la colocación de un relleno sobre un coluvión .

### Excavaciones urbanas

Méndez (1989) describe un caso en los Andes Venezolanos así: “los Proyectistas consideraron que un sitio no difería de lo convencional de otras áreas ya desarrolladas de la ciudad, donde sin criterio geotécnico alguno emprenden obras similares. No obstante se llevaron la sorpresa de activar un deslizamiento, afectando inicialmente a las casaquintas y luego a un conjunto de viviendas por un simple corte de 2,5 metros de altura.

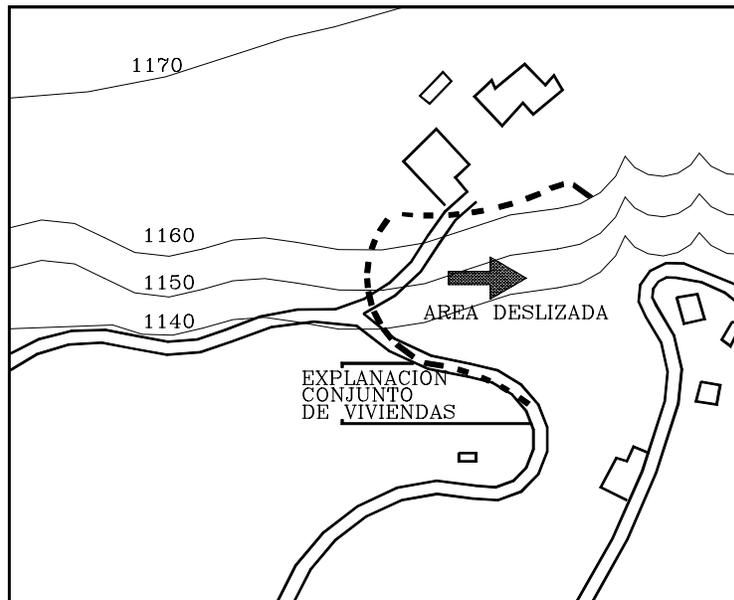


Figura 10.7 Deslizamiento ocasionado por un corte en San Cristóbal – Venezuela (Méndez –1989).

Dentro de las excavaciones urbanas merecen capítulo aparte los deslizamientos de excavaciones para sótanos de edificios, de los cuales existe muy buena cantidad de casos históricos en la literatura técnica.

### **Explotación de materiales de construcción**

Las canteras de explotación de materiales son muy comunes en zonas urbanas, afectando grandes áreas con cortes de gran altura y generando deslizamientos masivos. La utilización de explosivos para el corte de materiales generalmente induce procesos de deterioro de la estructura ,los cuales pueden terminar grandes deslizamientos.

Fotografía 10.2 La deforestación y los cambios hidrológicos superficiales favorecen la activación de deslizamientos y flujos.

## 10.4 DEFORESTACION

La deforestación ha sido identificada como un elemento muy importante de desestabilización de las laderas urbanas. Bauer (1996) presenta un caso en el cual la eliminación de 0.3 Km<sup>2</sup> de bosque en un área total de 0.9 Km<sup>2</sup> triplicó la escorrentía e inició un proceso de flujos de escombros (Debris Flow) que destruyó en 1971, varias casas e inundó una población en Austria. La tala y quema indiscriminada de los bosques tropicales, especialmente cerca a los núcleos urbanos ha producido efectos catastróficos de erosión masiva y ocurrencia de deslizamientos.

La Cobertura Vegetal presente determina una mayor o menor protección contra el impacto de la lluvia o la acción de las corrientes de agua. Adicionalmente la vegetación retarda la escorrentía regulando los picos de caudal de las corrientes.

Al eliminar la protección vegetal (cualquiera que sea ésta) se deja el terreno expuesto al impacto de las gotas de lluvia, las cuales producen erosión laminar, seguida por formación de surcos, los cuales pueden convertirse en cárcavas. La situación se agrava aún más cuando se remueve la parte superficial del terreno o descapote la cual funciona como una segunda capa de protección natural contra la erosión y la infiltración de agua.

## 10.5 CAMBIOS HIDROLOGICOS

La intervención humana del medio físico produce cambios importantes en la hidrología en las áreas urbanas en las siguientes formas:

- a) Eliminación de áreas cubiertas por bosques o vegetación y su reemplazo por áreas duras y edificaciones.
- b) Cambios topográficos para adaptar los terrenos al proceso de urbanización.
- c) Canalización de aguas por medio de pavimentos, sumideros y alcantarillados, disminución de la rugosidad, inhibición de la infiltración y de la evapotranspiración, aumento de los caudales y reducción del tiempo de concentración.
- d) Aumento de caudales con las aguas de acueducto tomadas de otras cuencas.
- e) Transporte de aguas de una microcuenca a otra a través del sistema de alcantarillado.

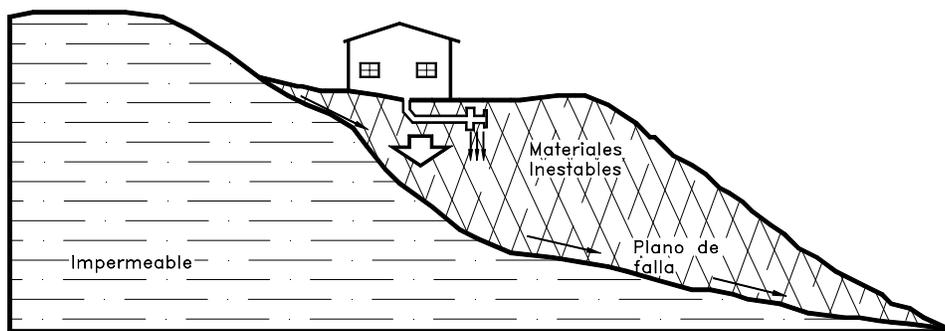


Figura.10.8 Deslizamiento de un relleno o de un coluvión por infiltración de agua.



pérdidas es agua infiltrada al suelo en el sistema de distribución, incluyendo tanques de almacenamiento, válvulas, fugas en los ductos y exudación. Es muy común encontrar fugas importantes de ductos de agua de los servicios públicos. Los casos más graves generalmente corresponden a fugas de ductos de acueducto debido a las presiones altas o tanques de almacenamiento colocados en las coronas de los taludes. (Longworth - 1992). El caso es especialmente grave en suelos permeables, en los cuales el agua fugada de los ductos no sale hacia la superficie del terreno sino que se infiltra totalmente en el suelo. En esta forma, la fuga se convierte en una componente muy importante de la recarga. Como caso histórico se puede mencionar el deslizamiento de 120.000 m<sup>3</sup> de una ladera en Bucaramanga - Colombia, inducido por fugas e infiltraciones de agua, en el área de un tanque de acueducto en la corona del talud, en una terraza aluvial de arenas arcillosas cementadas. El nivel freático ascendió más de 10 metros en un área importante de terreno, generando el deslizamiento.

Además, debe mencionarse las infiltraciones de pozos sépticos o campos de infiltración y en canales. En un deslizamiento de tierra en Medellín - Colombia, un pequeño canal de agua en una ladera deforestada arriba de la ciudad activó un deslizamiento que produjo la muerte de más de 300 personas.

La recarga debida a las pérdidas en el sistema de acueducto representa en la mayoría de las ciudades un factor muy importante de inestabilidad en los taludes. Las ratas de fuga varían grandemente de una zona urbana a otra debido a que los ductos antiguos son más susceptibles a fuga que los sistemas nuevos. Adicionalmente, las zonas urbanas sometidas a eventos sísmicos poseen mayores ratas de fracturas de tuberías. La recarga total por unidad de área puede representar un porcentaje muy importante de la infiltración total y en ocasiones muy superior a ésta. En la tabla 10.1 se muestra la información obtenida en la literatura, sobre la recarga total relacionada por procesos urbanos, la cual como se puede observar, es muy alta en ciudades de países no desarrollados, comparativamente con las de países industrializados.

Tabla 10.1 Impacto de la recarga urbana sobre el agua subterránea en algunas ciudades

Ciudad	Litología	Incremento en la Recarga en mm./año	Causas de la Recarga	Referencias
Liverpool (Inglaterra)	Arenisca	55	Fugas de acueducto	Price y Reed (1989)
Mérida (México)	Caliza	500	Fugas de acueducto , alcantarillado y pozos sépticos	Morris (1994)
Santacruz (Bolivia)	Depósitos aluviales	150 a 170	Fugas de acueducto , alcantarillado y pozos sépticos	Morris (1994)
Hat Yai (Tailandia)	Aluvión costero	60	Fugas de acueducto	Lawrence (1994)
Lima (Perú)	Grava aluvial	700	Fugas de acueducto e irrigación	Geake (1986)

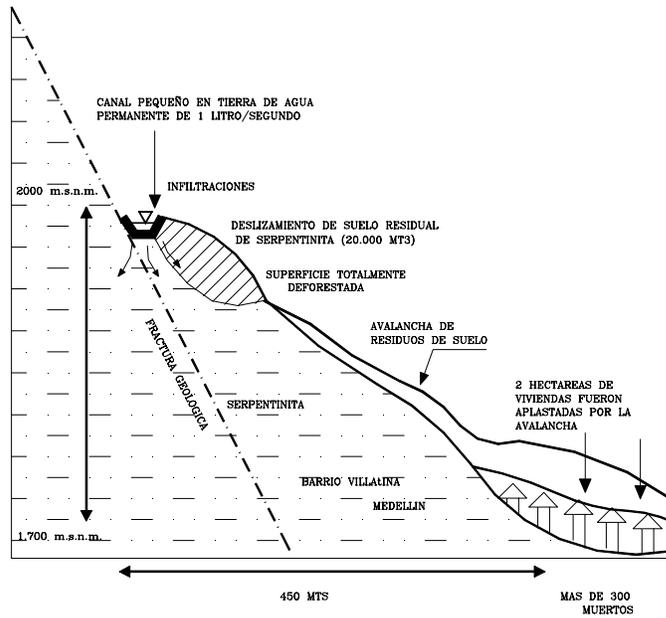


Figura 10.10 Deslizamiento Villatina – Medellín Colombia, 1987

Las fugas de los sistemas de alcantarillado pueden ser muy altas; por ejemplo, en la ciudad de Mérida (Mexico), Morris (1994) reporta que el 95% de las aguas descargadas al sistema sanitario terminan como aguas subterráneas para una geología de calizas karsticas. Existen en la literatura algunos casos similares debido a que las cavernas que se forman en la roca o el suelo permiten la captación de cualquier cantidad de agua que se fugue de los ductos.

Las fugas son relativamente bajas en tuberías o colectores nuevos; sin embargo, el deterioro de los ductos con el tiempo puede producir una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de fugas

### Mal manejo de aguas lluvias y residuales

Ruth y Moulton (1996) indican que la concentración de agua superficial o sub-superficial en un sitio con situación geológica desfavorable es una causa primaria de inestabilidad de taludes. Las entregas puntuales sobre los taludes producen cárcavas que pueden representar una amenaza directa para las viviendas que producen el vertimiento.

La falta de sistemas de alcantarillado es el caso más grave para la formación de cárcavas de erosión, teniendo en cuenta que las calles actúan como colectores de aguas y se pueden producir familias de cárcavas de gran tamaño. Las entregas de los sistemas de aguas de alcantarillado en sitios potencialmente susceptibles geotécnicamente pueden formar grandes cárcavas, las cuales pueden terminar en deslizamientos de tierra.

La falta de sumideros para aguas lluvias o poca capacidad de estos. En este caso el sistema de alcantarillado no es eficiente en la recolección de las aguas lluvias y las calles actúan como sistemas alternativos con la consiguiente formación de cárcavas.

La falta de sistemas colectores de agua en las coronas de los taludes o en la superficie de las áreas urbanizadas. Las aguas lluvias fluyen por la superficie de los taludes formando surcos y cárcavas. La falta de sistemas colectores aumenta la recarga hacia los niveles freáticos y es muy importante en los sectores de alta densidad de población.

### Disposición inadecuada de basuras y residuos sólidos

La disposición inadecuada de basuras sobre los taludes permite muy fácilmente la infiltración, formando depósitos de agua subsuperficial y corrientes de agua en la interface entre la basura y el suelo, los cuales producen escurrimientos de suelo y basura y en ocasiones deslizamientos del suelo debajo de las basuras.

Muchos deslizamientos han ocurrido de depósitos o acumulación de residuos industriales junto a núcleos urbanos.

El manejo de residuos en gran escala ocasiona acumulaciones grandes de material y aunque generalmente se construyen diques de contención, la acumulación de agua dentro de los depósitos de los residuos es tal, que éstos se comportan como líquidos viscosos, destruyendo a menudo los diques y produciendo flujos y avalanchas de gran magnitud.

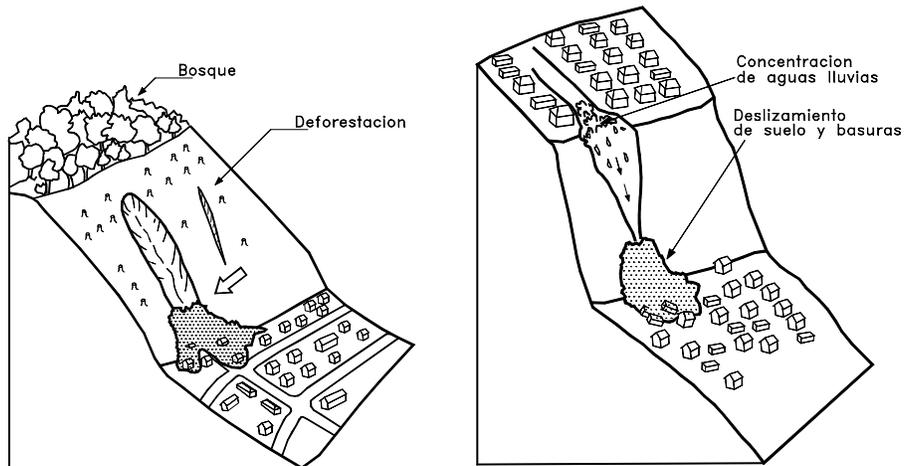


Figura 10.11 Deslizamientos urbanos relacionados con alteraciones del medio ambiente.

### Modificación de los cauces de cañadas o ríos

Los cauces de las corrientes son estables mientras no se modifique su cauce, ni se realice extracción de materiales o cambien las condiciones hidráulicas de la corriente o hidrológicas de la cuenca.

Los factores más importantes de desequilibrio son: la extracción de materiales del fondo del cauce, la modificación de la topografía de la corriente, la construcción de estructuras dentro del cauce, los vertimientos de aguas residuales, los cambios hidrológicos debidos al proceso de urbanización y la deforestación de la cuenca.

Los efectos relacionados con la explotación de materiales del cauce en corrientes de alta montaña se pueden resumir en la siguiente forma: Aguas abajo del sitio: Disminuye la sedimentación produciéndose una profundización de la sección del cauce. Aguas arriba del sitio: La pendiente promedio longitudinal del cauce se hace mayor, aumentándose las velocidades y el poder de socavación. La profundización del cauce aumenta la altura de los taludes semiverticales, los cuales pueden producir deslizamientos.

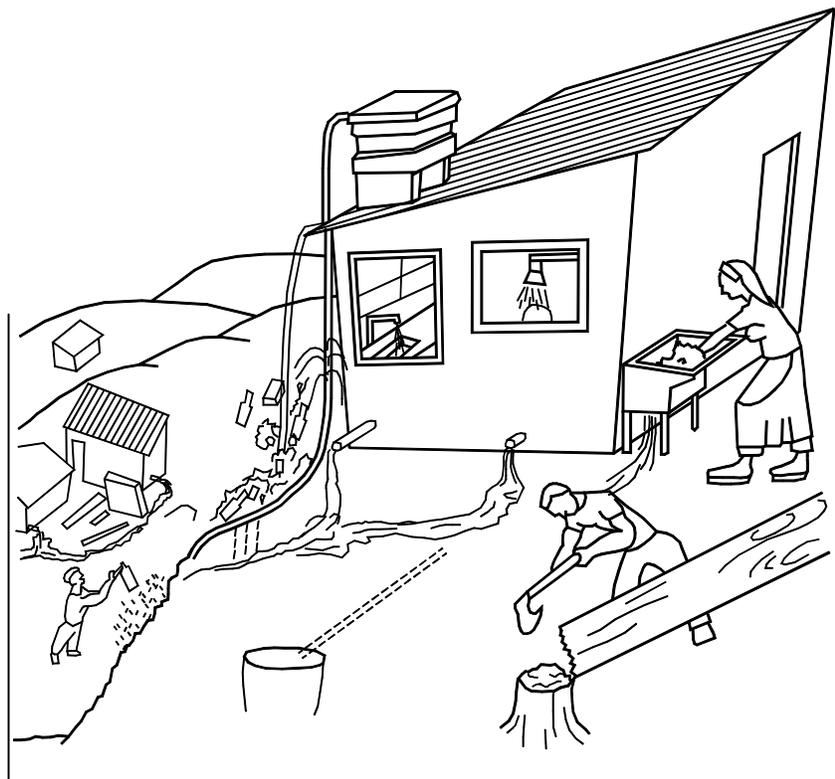


Figura 10.12 Fuentes domésticas de erosión urbana

### **Irrigación, Lagos ornamentales y otros cuerpos de agua**

La construcción de canales de irrigación de agua, los procesos de irrigación propiamente dichas, la construcción de lagos ornamentales o depósitos superficiales de agua, constituyen puntos concentrados de infiltración que generan variaciones considerables en el régimen de aguas subterráneas. En especial los depósitos de agua a mitad de ladera presentan condiciones muy delicadas de concentración de corrientes de agua, aguas abajo del depósito y en ocasiones han producido deslizamientos de tierra de gran magnitud.

## 10.6 PROCESOS DE EROSION URBANA

Los cambios hidrológicos pueden producir procesos de erosión, los cuales actúan como iniciadores de deslizamientos.

Los procesos de erosión obedecen a fenómenos regidos por leyes naturales y puede considerarse normal que ocurran; sin embargo, la acción antrópica puede acelerarlos a tal punto de poner en peligro vidas humanas y construcciones ( Angelieri Cunha - 1991). El problema es de especial gravedad en áreas urbanas con topografía montañosa y materiales de suelo susceptibles a la erosión.

En los casos de erosión urbana se han detectado tres mecanismos:

### 1. Formación de cárcavas

Debido al manejo inadecuado de las aguas lluvias o servidas, procesos de urbanismo, etc.

El principal fenómeno es la ocurrencia de cárcavas localizadas de gran tamaño, conectadas o desconectadas al sistema de drenaje. Las cárcavas son producidas generalmente por entregas localizadas de agua en sitios susceptibles. La concentración de aguas propicia un aumento de la energía del agua, la cual en contacto con el terreno desencadena un proceso de erosión localizado.

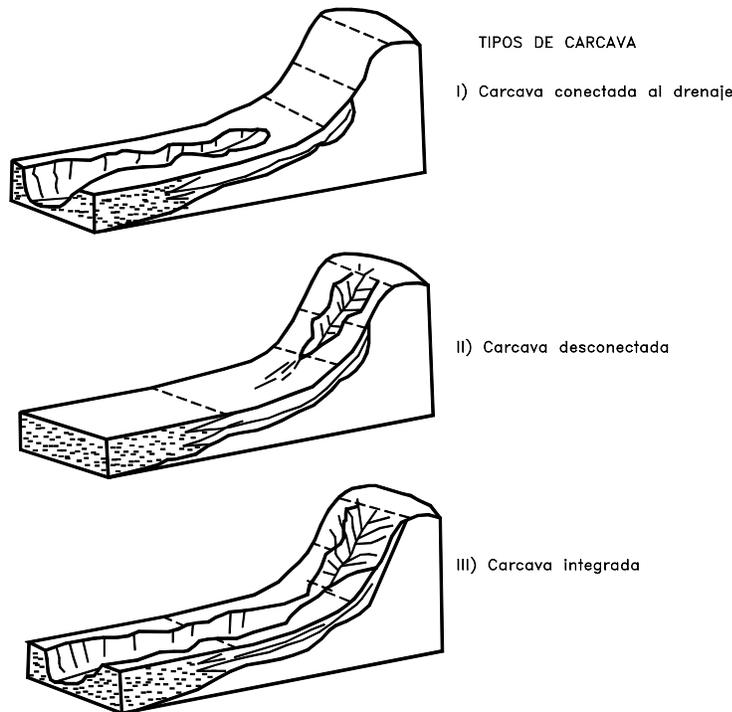


Figura 10.13 Tipos de Cárcava