

Ingeniería Geológica



PEARSON
Prentice
Hall

Coordinador:
Luis I. González de Vallejo

The background of the entire page is a photograph of a steep, rocky hillside. A dirt road or path winds up the slope, and a white truck is visible on it. The terrain is rugged and appears to be a site of geological interest, possibly related to the chapter's topic of land movements. The sky is clear and blue.

CAPÍTULO 14

DESLIZAMIENTOS Y OTROS MOVIMIENTOS DEL TERRENO

CONTENIDO

1. Introducción
2. Movimientos de ladera
3. Investigación de deslizamientos
4. Medidas de corrección
5. Hundimientos y subsidencias
6. Prevención de riesgos por movimientos del terreno

14.1

Introducción

Los procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre dan lugar a **movimientos del terreno** de diversas características, magnitud y velocidad. Los más frecuentes y extendidos son los **movimientos de ladera**, que engloban, en general, a los procesos gravitacionales que tienen lugar en las laderas. Otro tipo, aunque menos extendido por estar asociado a determinados materiales y circunstancias, son los **hundimientos**. Ambos procesos se describen en este capítulo.

La acción de la gravedad, el debilitamiento progresivo de los materiales, debido principalmente a la meteorización, y la actuación de otros fenómenos naturales y ambientales, hacen que los movimientos del terreno sean relativamente habituales en el medio geológico.

Estos procesos llegan a constituir **riesgos geológicos** potenciales, ya que pueden causar daños económicos y sociales al afectar a las actividades y construcciones humanas. Evitar estos efectos nocivos es el objetivo final de la investigación de los movimientos del terreno, de sus características, tipos y mecanismos de inestabilidad, de los factores que los controlan y de sus causas. Para abordar su estudio es necesario conocer los materiales rocosos y los suelos, sus caracterís-

ticas y propiedades geológicas, geomecánicas e hidrogeológicas, y su comportamiento, así como los factores que condicionan y desencadenan los movimientos. El estudio suele estar enfocado hacia alguna de las siguientes aplicaciones:

- Investigación de procesos particulares para el diseño de medidas correctoras o estabilizadoras para mitigación o reducción de los daños.
- Análisis de las causas y de los factores que controlan y desencadenan los procesos en una zona, con vistas a la prevención de los movimientos.
- Realización de cartografías de zonas inestables o potencialmente inestables, para aplicaciones preventivas.

El papel de la ingeniería geológica en la prevención de los riesgos por deslizamientos y hundimientos es más efectivo cuando los procesos se producen a escala geotécnica, es decir, con dimensiones que permitan abordar su control. Los grandes movimientos a escala geológica son, por lo general, imposibles de controlar, y en estos casos las únicas medidas posibles son la prevención y las restricciones de uso del territorio.

14.2

Movimientos de ladera

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, que va modificándose a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones geológicas o climáticas. Por lo general, las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio; ante el cambio de condiciones, su morfología se modifica buscando de nuevo el equilibrio. En este contexto, los movimientos de ladera pueden entenderse como los reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones.

Entre las áreas más propensas a la inestabilidad, bajo un punto de vista global, están las zonas montañosas y escarpadas, zonas de relieve con procesos erosivos y de meteorización intensos, laderas de valles fluviales, acantilados costeros, zonas con materiales blandos y sueltos, con macizos rocosos arcillosos, esquistosos y alterables, zonas sísmicas, zonas de precipitación elevada, etc.

El estudio de los movimientos de ladera, con frecuencia englobados bajo el término general de **deslizamientos**, tiene muchos campos comunes con los es-

tudios de estabilidad de taludes (tratados en el Capítulo 9): los factores geomecánicos que controlan los procesos de rotura e inestabilidad, los mecanismos de rotura, métodos de análisis y modelización, métodos de corrección, estabilización e instrumentación.

Los **estudios de taludes** se enfocan al diseño de excavaciones estables y a la corrección o estabilización de las roturas, que suelen ser superficiales y afectar a volúmenes relativamente pequeños (aunque en grandes excavaciones mineras pueden producirse movimientos de gran magnitud). Los deslizamientos en laderas naturales pueden ser profundos y movilizar millones de metros cúbicos de material; los mecanismos de rotura, además, suelen ser complejos, estando condicionados por factores o procesos a escala geológica (fallas, procesos tectónicos, procesos geomorfológicos, litorales, flujos de agua subterránea, etc.).

Las inestabilidades en las laderas, al igual que en los taludes excavados, se deben al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, de tal forma que las fuerzas desestabilizadoras superan a las fuerzas estabilizadoras o resistentes. Este desequilibrio puede ser debido a una modificación de las fuerzas existentes o a la aplicación de nuevas fuerzas externas estáticas o dinámicas.

Aunque, como se ha mencionado, las inestabilidades naturales con frecuencia son procesos complejos, los mecanismos y modelos de rotura del terreno son similares a los de los taludes excavados, descritos en el Apartado 4 del Capítulo 9, pudiendo agruparse en roturas a favor de superficies curvas o planas, tipo cuña o bloque, etc., según los materiales sean suelos o macizos rocosos.

Los movimientos de ladera, por su gran extensión y frecuencia, constituyen un riesgo geológico muy im-

portante, que afecta a edificaciones, vías de comunicación, conducciones de abastecimiento, cauces y embalses, etc. y, ocasionalmente, a poblaciones. Los movimientos de gran magnitud (decenas o cientos de millones de metros cúbicos) son muy poco frecuentes, aunque en la superficie terrestre hay signos que denotan su ocurrencia en el pasado, posiblemente asociada a épocas climáticas húmedas y lluviosas o a actividad tectónica y sísmica.

Por otro lado, los deslizamientos son quizá los procesos naturales más previsible y más sensibles a las medidas de corrección y mitigación para la prevención de los daños que conllevan. Incluso las predicciones de su ocurrencia se pueden llevar a cabo en los casos en que los movimientos estén asociados a factores conocidos, por ejemplo a lluvias intensas.

Los movimientos de ladera engloban diferentes tipos de procesos, como los deslizamientos, desprendimientos, flujos y coladas de barro o derrubios, reptaciones, avalanchas rocosas, etc. Los diferentes tipos se describen a continuación.

Tipos de movimiento

Las clasificaciones de los movimientos de ladera suelen referirse a los tipos de materiales involucrados, distinguiendo generalmente entre materiales rocosos, derrubios y suelos, y al mecanismo y tipo de la rotura, considerando también otros aspectos, como el contenido en agua del terreno y la velocidad y magnitud del movimiento. Algunas de las clasificaciones más extendidas (Varnes, 1984; Hutchinson, 1988; EPOCH, 1993; Dikau et al, 1996), con diversos criterios y fines, son de gran utilidad para abordar el estudio de los movimientos de laderas y el conocimiento del comportamiento de los materiales que sufren estos procesos. También han sido establecidas clasificaciones específicas para algunos materiales, como las arcillas, o para algunos tipos de movimiento, como los flujos. En la Figura 14.2 se recoge una clasificación simplificada de los diferentes tipos de movimientos de ladera, en función de los mecanismos de rotura y del tipo de material.

Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en



Figura 14.1 Los deslizamientos en las laderas del canal de Panamá retrasaron los trabajos durante años.


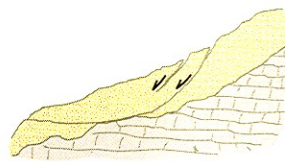
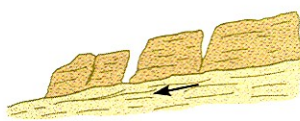

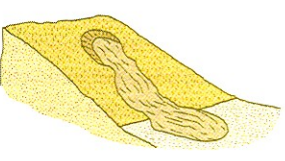
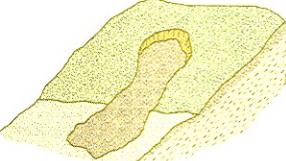
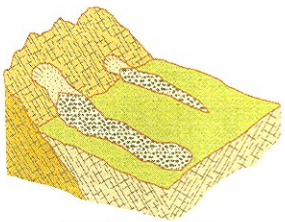
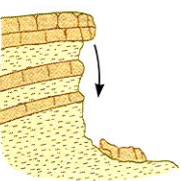
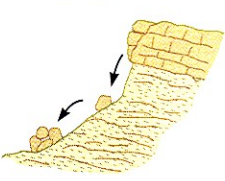
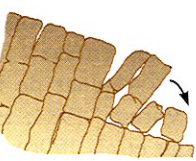
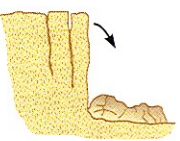
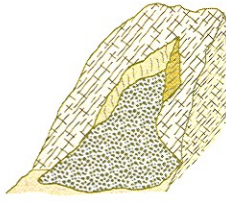
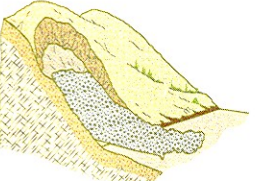
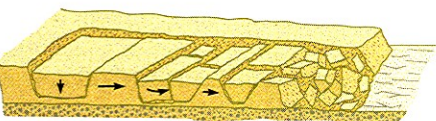
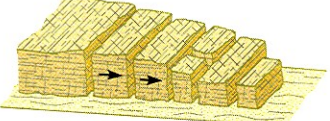
Tipos de movimientos de ladera		
Deslizamientos rotacionales	 Suelos	 Rocas
Deslizamientos traslacionales	 Suelos	 Rocas
Flujos	 Suelos	 Derrubios
		 Bloques rocosos
Desprendimientos		
Vuelcos	 Rocas	 Suelos
Avalanchas	 Rocas	 Derrubios
Desplazamientos laterales	 Suelos	 Bloques rocosos

Figura 14.2 Clasificación general de los movimientos de ladera.

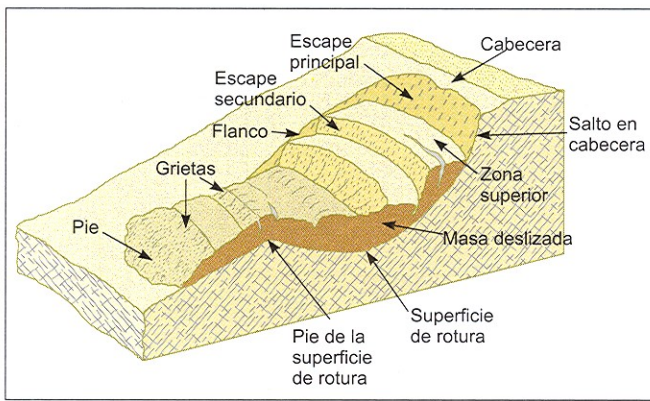


Figura 14.3 Esquema de un deslizamiento rotacional y partes del mismo (modificado de Varnes, 1988).

conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes (hasta varios millones de metros cúbicos). En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el



Figura 14.4 Vista de la parte superior de un deslizamiento rotacional en arcillas; obsérvese la grieta de tracción y la inclinación del terreno en sentido contrario a la ladera, con formación de charcos; Warden Point Cliff, Inglaterra (foto L. González de Vallejo).

equilibrio al pie de la ladera (por su pérdida de resistencia, contenido en agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un **flujo**; los deslizamientos también pueden ocasionar **avalanchas rocosas**.

Pueden producirse deslizamientos en derrubios (por ejemplo en los coluviones de las laderas, a favor del contacto con el sustrato, o en laderas rocosas muy alteradas y fracturadas, a favor del contacto con la roca sana), que generalmente dan lugar a flujos de derrubios, ya que suelen ocurrir en condiciones de saturación del material. El término **derrubio** se refiere a un material suelto, sin consolidar, con una proporción significativa de material grueso (Varnes, 1988).

Los **deslizamientos rotacionales** (Figura 14.3) son más frecuentes en suelos cohesivos «homogéneos». La rotura, superficial o profunda, tiene lugar a favor de superficies curvas o en «forma de cuchara». Una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y dan lugar a «escalones» con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas. Sus dimensiones más frecuentes varían entre varias decenas y centenares de metros, tanto en longitud como en anchura, y pueden ser superficiales o profundos (el límite puede establecerse en torno a los 10 m). La parte inferior de la masa deslizada se acumula al pie de la ladera formando un depósito tipo lóbulo con grietas de tracción transversales (Figura 14.3). Dependiendo del tipo de suelos y del contenido en agua, se pueden generar flujos.

La Figura 14.5 presenta diferentes modelos de deslizamientos curvos o rotacionales; los de **tipo sucesivo** se dan en arcillas duras fisuradas con pendientes cercanas a su ángulo de equilibrio y en arcillas blandas muy sensitivas, donde el primer deslizamiento da lugar a una acumulación de arcilla remoldeada que fluye y deja sin sustento al material superior de la ladera, provocándose sucesivas roturas. Son roturas poco profundas pero de gran continuidad lateral.

Los macizos rocosos blandos o con alto grado de fracturación o alteración, donde las discontinuidades

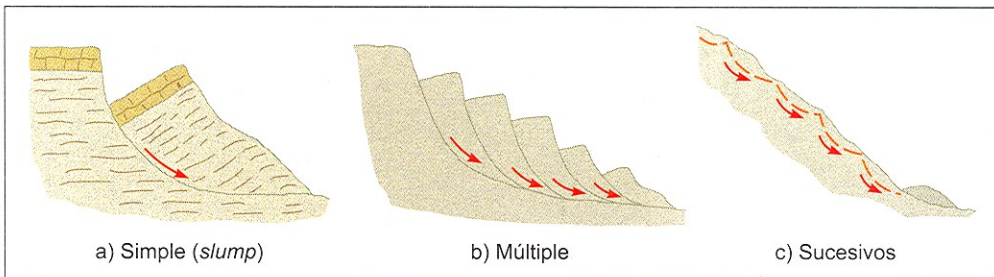


Figura 14.5 Tipos de deslizamientos rotacionales.

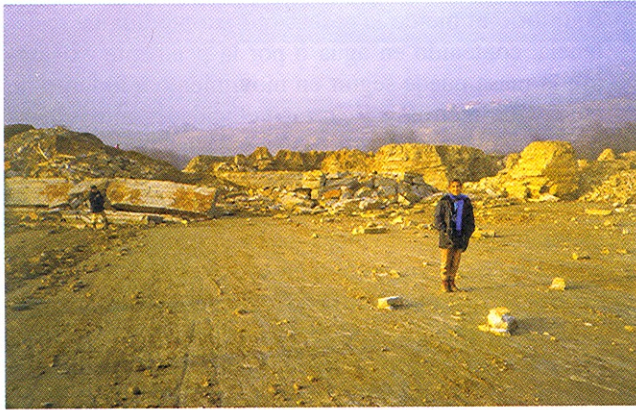


Figura 14.6 Superficie de deslizamiento plano sobre un nivel arcilloso de unos pocos milímetros, correspondiente al caso de la Figura 14.17, al NW de Italia; obsérvense las estrías y los bloques rocosos deslizados al fondo.

no constituyen superficies de debilidad preferentes, pueden también sufrir este tipo de rotura.

En los **deslizamientos traslacionales** la rotura tiene lugar a favor de superficies planas de debilidad preexistentes (superficie de estratificación, contacto entre diferentes tipos de materiales, superficie estructural, etc.); en ocasiones, el plano de rotura es una fina capa de material arcilloso entre estratos de mayor competencia (Figura 14.6). No suelen ser muy profundos, aunque sí muy extensos y alcanzar grandes distancias. Pueden darse en suelos y en rocas (Figura 14.7), y las masas que deslizan en ocasiones son bloques rectangulares previamente independizados por discontinuidades o por grietas de tracción (deslizamientos de bloques). Son frecuentes en este tipo de inestabilidades los movimientos a impulsos o en fases diferentes en el tiempo según las condiciones de resistencia de los planos de deslizamiento, que no tienen



Figura 14.7. Frente de un deslizamiento traslacional de grandes bloques rocosos, NW de Italia (foto M. Ferrer).

por qué presentar una pendiente elevada. Generalmente, los deslizamientos traslacionales son más rápidos que los rotacionales, dadas las características cinemáticas del mecanismo de rotura.

Flujos

Los **flujos o coladas** son movimientos de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o *debris flow*) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un «fluido», sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia a que da lugar en materiales poco cohesivos. Principalmente, afectan a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados; estos movimientos, poco profundos en relación a su extensión, presentan una morfología tipo glaciar, y pueden tener lugar en laderas de bajas pendientes (incluso menores de 10°).



Figura 14.8 Cabecera (arriba) y pie (abajo) de un flujo de barro desencadenado por precipitaciones intensas en Reino de Bureba, Burgos (fotos M. Ferrer).



Figura 14.11 Reptación de suelos; obsérvese la inclinación de los árboles.

Desprendimientos

Los **desprendimientos** son caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas independizadas por planos de discontinuidad preexistentes (tectónicos, superficies de estratificación, grietas de tracción, etc.). Son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, en acantilados y, en general, en paredes rocosas, siendo frecuentes las roturas en forma de cuña y en bloques formados por varias familias de discontinuidades. Los factores que los provocan son la erosión y pérdida de apoyo o descalce de los bloques previamente independizados o sueltos, el agua en las discontinuidades y grietas, las sacudidas sísmicas, etc. En la Figura 14.2 se presentan diversos tipos de desprendimientos.

Aunque los bloques desprendidos pueden ser de poco volumen, al ser procesos repentinos suponen un riesgo importante en vías de comunicación y edificaciones en zonas de montaña y al pie de acantilados.

Pueden también darse desprendimientos de masas de suelos en taludes verticales, generalmente a favor de grietas de tracción generadas a causa del estado tensional o de grietas de retracción por desecación del terreno.



Figura 14.12 Los desprendimientos rocosos afectan con frecuencia a poblaciones en zonas montañosas; Libros, Teruel (foto M. Ferrer).

Los **vuelcos** de estratos o de fragmentos de masas rocosas se pueden incluir dentro de los desprendimientos (las características de este tipo de rotura se describen en el Apartado 9.4 del Capítulo de taludes). Se producen cuando los estratos buzan en sentido contrario a la ladera, por estar fracturados en bloques o por rotura de la zona de pie de la ladera. Suelen darse principalmente en frentes rocosos con estratos verticalizados (Figura 14.2).

Avalanchas rocosas

Estos procesos, considerados como desprendimientos o movimientos complejos en algunas clasificaciones, son muy rápidos, con caída de masas de rocas o derrubios que se desprenden de laderas escarpadas y pueden ir acompañadas de hielo y nieve (Figura 14.13). Las ma-



Figura 14.13 Avalancha rocosa en el Puerto de los Alazores, Málaga, ocurrida en la década de los 60 (cortesía de J. J. Durán).



Figura 14.14 Los depósitos caóticos de una gran avalancha de rocas prehistórica procedente de las laderas del volcán Mombacho, en Nicaragua, forman actualmente un gran número de pequeñas islas en un lago a más de 10 km de distancia del volcán (foto M. Ferrer).

sas rocosas se rompen y pulverizan durante la caída, dando lugar a depósitos con una distribución caótica de bloques, con tamaños muy diversos, sin estructura, prácticamente sin abrasión y con gran porosidad.

Las avalanchas son generalmente el resultado de deslizamientos o desprendimientos de gran magnitud que, por lo elevado de la pendiente y la falta de estructura y cohesión de los materiales, descienden a gran velocidad ladera abajo en zonas abruptas, pudiendo superar los 100 km/hora, incluso si las masas están completamente secas, por la disminución de la fricción a que da lugar la presencia de aire entre los materiales y fragmentos rocosos. El agua de precipitación o deshielo, los movimientos sísmicos y las erupciones volcánicas pueden jugar un papel importante en el desencadenamiento de estos procesos.

Las **avalanchas de derrubios** están formadas por material rocoso muy heterométrico, pudiendo incluir grandes bloques y abundantes finos; los depósitos morrénicos constituyen un material propenso para estos procesos, así como las acumulaciones de materiales procedentes de erupciones volcánicas. La diferencia con los flujos de derrubios, además de la presencia de agua (no necesaria en las avalanchas), es la rapidez del proceso y velocidad que alcanza la masa en zonas con pendiente elevada.

Desplazamientos laterales

Este tipo de movimiento (denominado en algunas clasificaciones como «extensión lateral» o *lateral spreading*) hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado

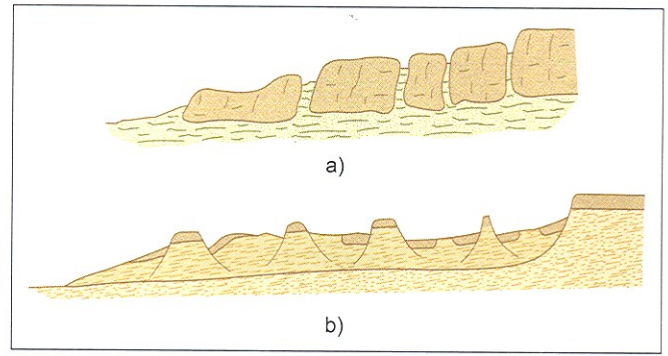


Figura 14.15 Desplazamientos laterales por: a) fluencia y extrusión del material infrayacente, b) licuefacción (Corominas y García Yagüe, 1997).

sobre un material blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de los bloques rígidos. Los desplazamientos laterales también pueden ser provocados por licuefacción del material infrayacente, o por procesos de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de las masas superiores (Figura 14.15). Se dan en laderas suaves, y pueden ser muy extensos. Las capas superiores se fragmentan generando grietas, desplazamientos diferenciales, vuelcos, etc., presentando las zonas afectadas un aspecto caótico.

Causas de los movimientos de ladera

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Estos factores han sido descritos en el Apartado 9.3 del Capítulo de taludes (ver Cuadro 9.1). En el Cuadro 14.1 se indican sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales; los factores **condicionantes** (o «pasivos») dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los **desencadenantes** (o «activos») pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos.

A efectos de su incidencia en el comportamiento geomecánico de los suelos y rocas, los factores o agentes que controlan los movimientos de laderas pueden agruparse en aquellos que contribuyen a reducir la resistencia al corte y aquellos que incrementan los esfuerzos de corte. En el Cuadro 14.2 se presenta una relación de dichos factores.

Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas

	Factores	Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno.
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno. Saturación en suelos. Erosión.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

En la mayoría de los casos son varias las causas que contribuyen al movimiento de una ladera; aunque con frecuencia se atribuyen a la acción de algún factor desencadenante (lluvias, terremoto, etc.), las inestabilidades no se hubieran producido de no existir una serie de condiciones predeterminadas que favorecen el fenómeno.

Dentro de los **factores condicionantes**, las propiedades físicas y resistentes de los materiales (directamente relacionadas con la litología) y las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad; otros factores importantes son la estructura geológica y discontinuidades, las condiciones hidrogeológicas y los estados termo-deformacionales.

Se incluyen a continuación algunos aspectos sobre los factores condicionantes que complementan lo expuesto en el Apartado 9.3 del Capítulo de Taludes.

El **relieve** juega un papel definitivo, ya que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales. Las regiones montañosas son las zonas más propensas a los movimientos de ladera. No obstante, en ocasiones, y dependiendo de otros factores, es suficiente una pendiente muy baja, de algunos grados, para que tengan lugar determinados tipos de inestabilidades, como los flujos de barro o tierra.

La **estructura geológica, estratigrafía y litología** determinan la potencialidad de movimientos en los diferentes tipos de materiales rocosos y suelos, y la existencia de planos de discontinuidad que pueden actuar como superficies de rotura. Aspectos como la composición, resistencia, deformabilidad, grado de alteración y fracturación, porosidad y permeabilidad determinan la posibilidad del terreno de sufrir roturas y desplazamientos bajo la actuación de determinados

Factores influyentes en el comportamiento geomecánico de los materiales de las laderas

Reducción de la resistencia al corte	Aumento de los esfuerzos de corte
<p>Condiciones iniciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Composición, textura y estructura. — Fracturas y fallas. — Planos de estratificación y de foliación. — Zonas de brechas. — Rocas masivas sobre materiales plásticos. — Alternancia de materiales con diferente permeabilidad. <p>Cambios en los materiales por meteorización y reacciones físico-químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Desintegración física de rocas. — Hidratación de minerales arcillosos. — Deseccación de arcillas y de rocas arcillosas. — Disolución y lavado de materiales. — Plastificación de arcillas. <p>Cambios en las fuerzas intergranulares debidas al agua y presiones de agua en poros y fracturas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Precipitaciones. — Deshielo. — Lagos y embalses. — Riego. — Deforestación. <p>Cambios en la estructura:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Por fisuración en pizarras y arcillas sobreconsolidadas. — Por relajación de tensiones en laderas rocosas en valles o excavaciones. — Por remodelo de suelos finos (arenas, loess) y arcillas sensitivas. <p>Debilitamiento de la resistencia debida a procesos de <i>creep</i></p> <p>Acción de las raíces de los árboles y arbustos.</p> <p>Excavación de madrigueras de animales.</p>	<p>Actuación de esfuerzos transitorios:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Movimientos sísmicos. — Vibraciones por voladuras, maquinaria y tráfico. — Deslizamientos cercanos. <p>Pérdida de confinamiento lateral y en la base de las laderas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Erosión del pie de las laderas por ríos, arroyos, olas, mareas, etc. — Lluvias. — Erosión interna o subterránea. — Disolución y lavado del material. — Labores mineras. — Presencia de materiales plásticos infrayacentes. <p>Cambios en la morfología:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Deslizamientos. — Grandes fallas. <p>Sobrecargas naturales:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Peso de la lluvia, nieve y agua de acuíferos. — Acumulación de derrubios, coluviones o masas deslizadas. — Vegetación. <p>Sobrecargas antrópicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Rellenos, escombreras y acopio de materiales. — Edificios y otras estructuras. — Cultivos y riego de laderas. <p>Otras acciones antrópicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Excavaciones. — Retirada de elementos de contención. — Construcción de embases y lagos. <p>Presión lateral:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Agua en grietas y cavidades. — Hielo en grietas. — Presencia de materiales expansivos. — Movilización de esfuerzos residuales. <p>Procesos volcánicos.</p>

(Modificado de Varnes, 1988.)

factores desencadenantes. En los macizos rocosos fracturados, con zonas de alteración, etc., estas condiciones son predominantes sobre la litología.

El **comportamiento hidrogeológico** de los materiales está asociado a sus características litológicas y estructurales y al grado de alteración y meteorización, aspectos en íntima relación con las condiciones climáticas de una zona determinada. En regiones lluviosas es frecuente la presencia de importantes espesores de materiales alterados y meteorizados sobre los sustratos rocosos, y de niveles freáticos elevados que influyen decisivamente en las condiciones de estabilidad. El agua juega un doble papel negativo en la resistencia de los materiales:

- Reduce la resistencia al corte por la generación de presiones intersticiales y por la reducción de los parámetros resistentes en determinados tipos de suelos.
- Aumenta los esfuerzos de corte por el incremento del peso del terreno y por la generación de fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades.

Las **propiedades resistentes o geomecánicas** controlan la resistencia al corte de los materiales y su rotura. Los suelos, por su carácter homogéneo e isotropo, presentan menor complejidad en su caracterización, mientras que en los macizos rocosos, que pue-

den tener muy diferente grado de fracturación, serán las propiedades de la matriz, de las discontinuidades o del macizo rocoso en su conjunto, las que determinen la resistencia y el comportamiento.

Con respecto a los **factores desencadenantes** (Cuadro 14.1) los más importantes son las precipitaciones, los cambios en las condiciones hidrogeológicas de las laderas, la modificación de la geometría, la erosión y los terremotos; algunos de ellos, como los cambios de las condiciones de agua y de geometría, frecuentemente son consecuencia de acciones antrópicas.

Precipitaciones y condiciones climáticas

El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones y con el régimen climático. En consecuencia, debe considerarse la respuesta del terreno a precipitaciones intensas durante horas (tormentas) o días, y la respuesta estacional (épocas secas y lluviosas a lo largo del año) o plurianual (ciclos húmedos y de sequía).

El agua en el terreno da lugar a presiones que alteran los estados tensionales, por presiones intersticiales y aumento del peso, a procesos de erosión interna y externa y a cambios mineralógicos, aspectos todos ellos que modifican las propiedades y resistencia de los materiales, sobre todo en los suelos.

La infiltración del agua de lluvia produce flujos subsuperficiales y subterráneos en las laderas, el aumen-

to del contenido en agua de la zona no saturada y la elevación del nivel freático, recargando la zona saturada (Figura 14.16). La cantidad de agua que se infiltra al terreno depende de la intensidad y duración de las lluvias, tamaño de la cuenca de aporte, contenido previo de agua en el terreno (posición del nivel freático y grado de saturación), de su permeabilidad y transmisividad y de la topografía y otras características de la ladera, como la presencia de vegetación. Dependiendo de estos factores, se generan estados de desequilibrio que pueden dar lugar a la inestabilidad de las laderas.

Las **precipitaciones intensas** durante horas o días pueden desencadenar **movimientos superficiales**, como deslizamientos y flujos de barro o derrubios, que afectan a materiales de alteración y a suelos, y desprendimientos de bloques rocosos previamente independizados del macizo, siendo frecuentes también las reactivaciones de antiguos deslizamientos. En 1982, en la región de la bahía de San Francisco, una lluvia intensa de 32 horas de duración desencadenó más de 18.000 deslizamientos superficiales; en noviembre de 1994, en la región del Piamonte, norte de Italia, intensas lluvias de dos días de duración (superando en muchas zonas los 400 mm) provocaron más de 1.000 deslizamientos traslacionales de bloques rocosos, deslizamientos superficiales y flujos catastróficos (Figura 14.17). En Nicaragua, las lluvias del huracán Mitch en 1998 provocaron un gran flujo de derrubios en el volcán Casitas, con un recorrido de varios kilómetros, que sepultó una población y mató a 2.000 personas.

La rápida infiltración del agua de lluvia, saturando el terreno superficial e incrementando las presiones intersticiales, explica la generación de los movimientos. La falta de vegetación en las laderas, la presencia de materiales sueltos y la existencia previa de inestabilidades juegan un papel fundamental por la mayor capacidad de infiltración y movilización de los materiales.

Para más detalles sobre el efecto del agua de lluvia en el terreno y su relación con el desencadenamiento de movimientos de ladera se remite a Gostelow (1991).

Numerosos autores han establecido umbrales de intensidad y duración de la lluvia para el desencadenamiento de movimientos de laderas en diferentes lugares. El Cuadro 14.3 recoge algunos de ellos. El principal inconveniente para su aplicación como medida preventiva es que no son extrapolables a otras zonas o lugares fuera de donde han sido establecidos, al infiltrar en las inestabilidades factores muy diversos.

Los **periodos lluviosos** prolongados (semanas o meses) suelen dar lugar a un incremento importante de los fenómenos de inestabilidad en zonas susceptibles. Las lluvias del periodo 1995-96 en Andalucía provocaron

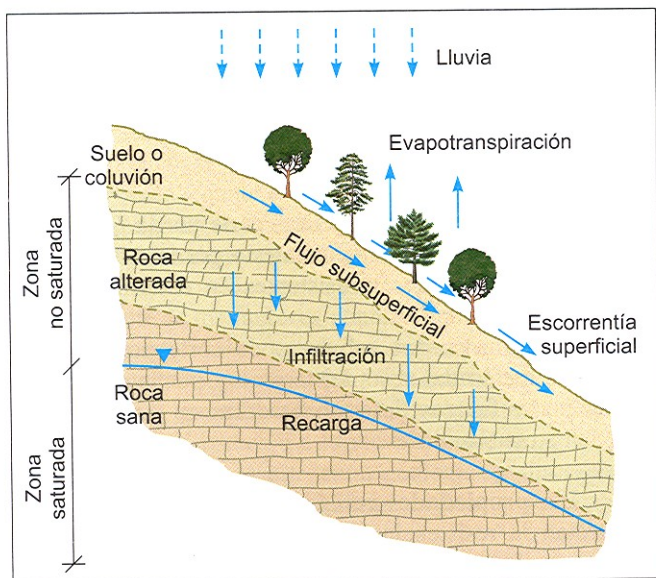


Figura 14.16 Esquema de circulación del agua en una ladera.

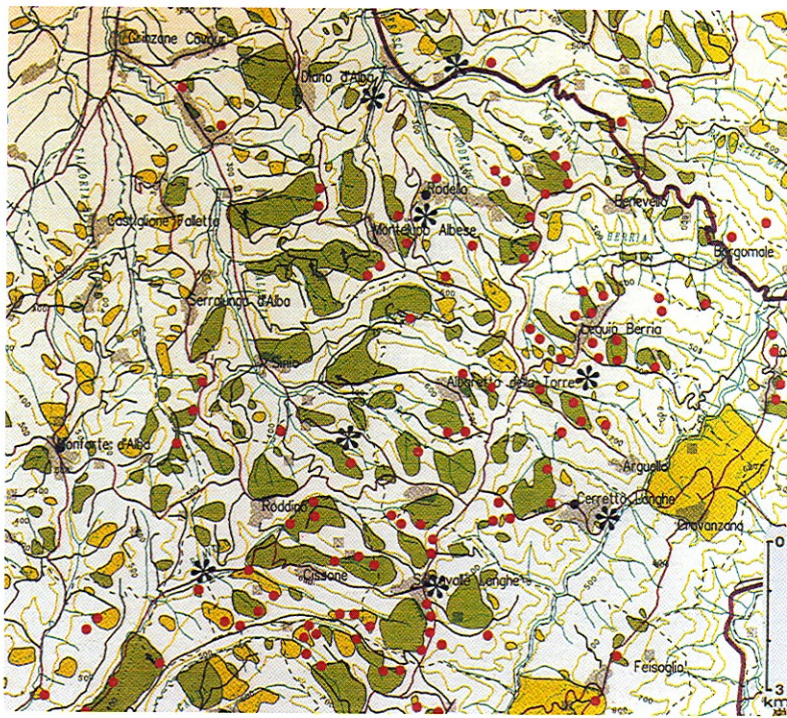


Figura 14.17 Fragmento del mapa inventario de deslizamientos de la región de Langhe (NW de Italia) con la situación de los movimientos provocados por las precipitaciones de noviembre de 1994, principalmente deslizamientos planos de bloques rocosos (puntos rojos) y flujos de barro (los asteriscos indican las zonas con mayor concentración de flujos); en el mapa, previo a este evento, aparecen en amarillo las zonas con deslizamientos de bloques inactivos, y en verde los activos en los últimos 30-40 años (Casale y Margottini, 1995). Las fotos corresponden a ejemplos de los tipos de movimientos citados: se puede observar la destrucción de varias edificaciones por los flujos superficiales (fotos M. Ferrer).

numerosas reactivaciones de antiguos deslizamientos y deslizamientos nuevos superficiales que afectaron sobre todo a vías de comunicación (Figura 14.18).

En el Cuadro 14.4 se presentan los valores de precipitación establecidos en base al análisis de más de una veintena de casos españoles para diferentes tipos de movimientos de ladera. En las dos primeras columnas se comparan las precipitaciones del año previo al movimiento con las medias anuales, y en las tres columnas siguientes se muestran los porcentajes de las lluvias caídas en los 3-4 meses previos al movimiento con respecto a la precipitación total del año previo y a la media anual de la serie. Como puede observarse, en algunos casos las lluvias de los meses previos a los movimientos suponen hasta el 60% y 80% de la precipitación del año previo (casos de deslizamientos y flujos de tierra o barro), y superan, en general, los valores de precipitación media anual (obtenidos de las series meteorológicas correspondientes a cada área de estudio), indicando periodos inusualmente lluviosos para el año previo al movimiento.

En España, las precipitaciones juegan un papel importante en el desencadenamiento de inestabilidades en laderas, dependiendo de las características climáticas y meteorológicas de las diferentes regiones. Las

máximas precipitaciones se dan en el norte, con 120 a 180 días de lluvia al año; las zonas con clima continental tienen entre 40 y 120 días de lluvia, dependiendo de la orografía; la región mediterránea (este y



Figura 14.18 Deslizamiento en una ladera arcillosa producido por el elevado contenido en agua del material, Jaén (foto M. Ferrer).

Umbral de precipitación para desencadenamiento de movimientos de ladera

Tipo de movimiento y país		Intensidad horaria (I_h)	Intensidad diaria (I_d)	Precipitación acumulada
Movimientos de nueva generación				
Flujos de barro y tierra	Hong Kong	> 40 mm	> 50 mm > 100 mm	> 50 mm (15 días)
	Japón		> 125 mm	> 182 mm (2 días)
	Italia (Toscana)		86 mm	260 mm (15 días) 325 mm (30 días)
	Brasil	60 mm	> 125 mm	> 0,4 P _{anual} (precipitación anual) > 675 mm (3 días)
Flujos de derrubios	Estados Unidos (California)			> 250 mm (3 días)
	España	213 mm		52 mm durante el evento
Otros tipos de movimiento	Japón	20 mm		10-150 mm durante el evento
	Estados Unidos (California)			> 180 mm durante el evento
	Italia (Toscana)		143-153 mm	290-400 mm (15 días) 360-450 mm (30 días)
	Francia			> 300 mm (60 días)
	España		205 mm	> 500 mm (3 días) 476 mm (2 días)
	España	> 60 mm (clima atlántico)	> 150 mm (clima atlántico) > 180 mm (c. mediterráneo)	> 300 mm (clima mediterráneo)
Reactivación o aceleración de movimientos				
Diversos tipos de movimiento	Italia			> 520 mm (60 días) pequeños deslizamientos > 900 mm (100 días) grandes deslizamientos
	Francia			300 mm (90 días)
	España			> 250 mm (90 días)
	España			320 mm (15 días)

Modificado de Ferrer y Ayala, 1997; datos de varios autores.

Relación entre precipitaciones y desencadenamiento de movimientos de ladera

Tipo de movimiento	Precipitación anual (mm)		Precipitación en los 3-4 meses previos (mm)		
	Total en el año previo	Media anual de la serie (*)	Total en los meses previos	% P total del año previo	% P media anual de la serie
Deslizamientos	500 a 1.000	500 a 800	300 a 500	50-60 %	≤ 30 %
Flujos de tierra	500 a 800	600 a 700	300 a 400	50-80 %	50-60 %
Flujos de derrubios	≥ 1.300	1.100 a 1.200	350 a 650	30-50 %	50-120 %
Desprendimientos	250 a 700	220 a 450	100 a 250	≤ 30 %	50-130 %

(*) Series analizadas entre 30 y 70 años. P = precipitación (Ferrer y Ayala, 1997).

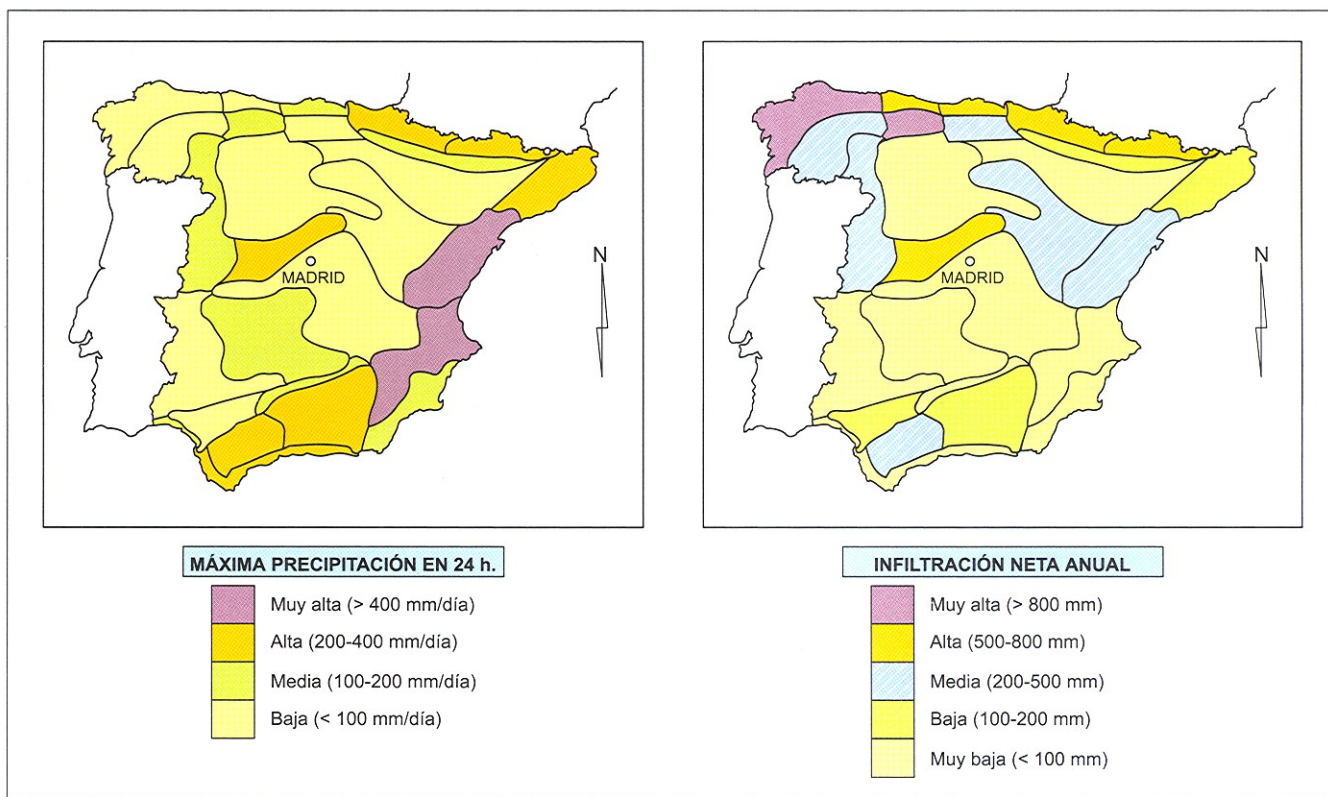


Figura 14.19 Susceptibilidad climática relativa frente a deslizamientos en la España peninsular (Ferrer y Ayala, 1996); los criterios empleados han sido la máxima precipitación en 24 horas (para flujos y deslizamientos superficiales) y la infiltración neta anual (para nuevos deslizamientos y reactivaciones de antiguos movimientos profundos).

noreste) y Baleares entre 40 y 60 días de lluvia, mientras que la parte sureste constituye la zona más árida, con menos de 20 días de lluvia al año. Las lluvias torrenciales caracterizan al clima mediterráneo, sobrepasándose en ocasiones la media anual en unos pocos días de lluvias intensas. En base a los datos de precipitación y de infiltración neta, en la Figura 14.19 se presentan unos mapas esquemáticos con los criterios generales de susceptibilidad para el desencadenamiento de movimientos de ladera en España.

El desencadenamiento de nuevos **deslizamientos profundos** o de gran magnitud no está relacionado con fenómenos meteorológicos estacionales, sino que obedece a **condiciones climáticas** a largo plazo, con regímenes de precipitación y condiciones de humedad suficientes para modificar de forma sustancial los niveles freáticos y el contenido en agua del terreno. El mecanismo principal que contribuye a la inestabilidad es la elevación del nivel freático por la infiltración neta de agua, desempeñando el aumento del peso específico del terreno un papel secundario. En general, cuanto menos permeables sean los materiales, menor será la influencia de las precipitaciones cortas y mayor

la del régimen climático y las condiciones pluri- o anuales, anuales o estacionales.

Las **inundaciones y avenidas** magnifican el efecto desestabilizador de las lluvias en las laderas de los valles fluviales (sobre todo en meandros y tramos curvos o encajados de los cauces). El papel erosivo de la corriente de agua en la base de la ladera se une al de la lluvia saturando el terreno, generando flujos y deslizamientos o reactivando movimientos. Los deslizamientos en valles fluviales pueden cortar el cauce y crear lagos o embalses aguas arriba, que dan lugar a riesgos añadidos a los de la propia rotura de la ladera: inundación del valle aguas arriba por taponamiento del cauce e inundación aguas abajo por rotura violenta del «dique» (Figura 14.20).

Otro tipo de acciones relacionadas con el clima son los **procesos de hielo-deshielo** estacionales, que provocan inestabilidades superficiales (solifluxiones) en laderas de suelos de zonas frías y desprendimientos en macizos rocosos competentes, donde el hielo provoca la meteorización y fracturación del material. Los procesos de deshielo rápido permiten un rápido y prolongado incremento del contenido de agua en los materiales sueltos.

Cambios del nivel de agua

La elevación del nivel de agua en las laderas, como consecuencia de prolongados periodos de lluvia o por el llenado de embalses, lagos, etc., provoca un aumento de presiones intersticiales que pueden desencadenar o acelerar los deslizamientos. Un ejemplo es el gran deslizamiento de Vajont (Figuras 11.1 y 11.2 del Capítulo 11).

El caso más desfavorable para la estabilidad de las laderas de embalses y lagos es el **descenso brusco del nivel de agua**, al generarse unas condiciones de desequilibrio por permanecer los materiales de las laderas con elevadas presiones intersticiales que no se disipan con la misma velocidad del descenso del nivel de agua. En el Recuadro 11.2 del Capítulo 11 se muestra este caso. Estas circunstancias pueden darse en laderas de embalses destinados al control de avenidas en valles escarpados, sujetos a cambios estacionales del nivel de agua que pueden superar varias decenas de metros, como lo ocurrido en los embalses de las presas de Esla (Zamora) y Beninar (Almería).

Procesos erosivos

La erosión o socavación del pie de las laderas, escarpes y acantilados, por erosión fluvial, litoral u otra causa, da lugar a la pérdida de resistencia en esta zona y a la modificación del estado tensional, lo que unido a la falta de apoyo del material suprayacente puede provocar la inestabilidad y la generación de deslizamientos o desprendimientos.

Un efecto secundario de los deslizamientos en laderas fluviales es el corte del río por la masa deslizada, que puede provocar inundaciones y avenidas, aspecto mencionado anteriormente (Figura 14.20).



Figura 14.21 Parte superior de un deslizamiento rocoso de grandes dimensiones en la costa norte de Mallorca (cortesía de R. Mateos).

Las laderas costeras sometidas a la acción del oleaje y las mareas son zonas con riesgo de inestabilidad (Figura 14.21). Merecen ser destacados los procesos de erosión en acantilados rocosos, que dan lugar al retroceso de los mismos. Esta actividad está ligada a los temporales marítimos, especialmente si coinciden con mareas vivas.

La erosión puede ser también interna, debida a diferentes factores, con los mismos efectos sobre la estabilidad de la ladera. En regiones kársticas los procesos de formación y hundimiento de cavidades asociadas a la presencia de carbonatos y yesos pueden desencadenar inestabilidades, sobre todo en este último caso, en que los materiales son más blandos y alterables.

Terremotos

Los terremotos pueden provocar movimientos de todo tipo en las laderas, dependiendo de las características de los materiales, de la magnitud y de la distancia al epicentro. Desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas rocosas pueden ocurrir durante las sacudidas sísmicas (ver Figura 15.22 del Capítulo 15). Antiguos deslizamientos en condiciones cercanas al equilibrio límite pueden también ser reactivados por las fuerzas sísmicas. Además, en materiales finos y sueltos, como arenas y limos, pueden producirse procesos de **licuefacción**, afectando también a deslizamientos antiguos con materiales sueltos, saturados y sin cohesión. Estos aspectos se tratan en el Apartado 15.6 del Capítulo de Riesgo Sísmico.

El terremoto de Guatemala de 1976 (M-7,6) provocó más de 10.000 desprendimientos rocosos y deslizamientos en materiales sueltos. El terremoto de Loma



Figura 14.20 Pie de un gran deslizamiento rotacional en una ladera fluvial, cortando el cauce del río y creando un embalse aguas arriba; Villahermosa del Río, Castellón (foto M. Ferrer).



Figura 14.22 Deslizamiento producido por el terremoto de El Salvador el 13 de enero de 2001 en una ladera sobre la Colonia «Las Colinas», municipio de Santa Tecla, Nuevo San Salvador (Agencia EFE). La ladera está formada por un sustrato de tobas sobre el que se apoya un nivel de cenizas volcánicas constituidas por limos arenosos y niveles de lapilli. Estos materiales presentan una densidad aparente entre 1,1 y 1,2 t/m³ y ángulo de fricción de 34° (Bernal, 2001). Las aceleraciones máximas estimadas en la zona fueron del orden de 0,5 g, lo que provocó el deslizamiento, dando lugar a un flujo muy rápido que sepultó parte de la urbanización. La zona de cabecera del deslizamiento presentó una superficie de rotura circular, con profundidad entre 6 y 8 m, mientras que en el resto el mecanismo fue traslacional. El volumen de la masa deslizada fue de unos 90.000 m³.

Prieta, California, de 1989 (M-7,1) desencadenó más de 4.000 desprendimientos, flujos y deslizamientos, así como numerosos procesos de licuefacción (Schuster, 1996a). En ocasiones, las víctimas atribuidas a los terremotos son causadas por los deslizamientos que se desencadenan; el terremoto de Perú de 1970 (M-7,7) provocó, entre muchos otros movimientos en laderas, una inmensa avalancha rocosa en la montaña de Huascarán que sepultó a una ciudad y parte de otra, matando a 18.000 personas. La mayoría de las víctimas del terremoto de El Salvador de 2001 fueron causadas por un deslizamiento repentino en materiales volcánicos, por pérdida instantánea de su resistencia (Figura 14.22).

En España los terremotos no son un factor significativo en el desencadenamiento de deslizamientos. Sin embargo, esta posibilidad debe ser considerada en zonas sísmicas montañosas, como las Béticas y los Pirineos, en donde los terremotos de cierta magnitud pueden ser un factor desencadenante de inesta-

bilidades. Existen algunos ejemplos de deslizamientos asociados a terremotos en los Pirineos y en Granada; el gran deslizamiento de Güejejar, en arcillas y limos de la depresión de Granada, parece ser un claro ejemplo de movimiento generado o reactivado por los terremotos de Lisboa en 1755 y de Andalucía en 1884, destruyéndose dos veces el pueblo.

Vulcanismo

Las erupciones volcánicas pueden provocar deslizamientos o avalanchas rocosas y de derrubios de gran magnitud y velocidad en las laderas de los conos de los volcanes, como ocurrió en el monte Santa Helena (EE.UU.) en 1980, donde tuvo lugar una inmensa avalancha que, según Schuster (1996b), ha sido el mayor deslizamiento histórico del mundo. Dependiendo de las características geotécnicas, de la pendiente y del contenido en agua de los materiales, éstos pueden fluir alcanzando grandes distancias.

Las cenizas y los piroclastos depositados sobre las laderas constituyen depósitos proclives a los procesos de deslizamiento y flujo ante la ocurrencia de lluvias que saturan estos materiales. En zonas altas con nieve, el deshielo, como consecuencia de la actividad volcánica, puede provocar flujos rápidos, como ocurrió en el Nevado del Ruiz, Colombia, en 1985.

Acciones antrópicas

Las actuaciones humanas ocupan un lugar importante dentro de los factores que modifican las condiciones y fuerzas que actúan sobre las laderas. Las excavaciones, la construcción de presas y embalses, las sobrecargas de edificios, estructuras, terraplenes, rellenos o escombreras sobre las laderas y las voladuras en zonas cercanas, entre otros, modifican los estados tenso-deformacionales del terreno y sus propiedades geotécnicas, generando inestabilidades.

Las principales causas de desestabilización son los **cambios de geometría** y pendiente, los cambios en las **condiciones hidrogeológicas** y las fuerzas estáticas externas. En menor medida están las cargas dinámicas y las excavaciones subterráneas bajo las laderas.

Las **excavaciones superficiales** para vías de comunicación y transporte, boquillas de túneles, minería y otras obras varían los perfiles de equilibrio de las laderas y pueden desencadenar movimientos, dependiendo de otros factores condicionantes, como la estructura geológica, la resistencia o el contenido en agua del terreno. En laderas con inestabilidades naturales antiguas o activas, o en condiciones cercanas al equilibrio límite, la excavación de taludes frecuentemente provoca la reactivación o aceleración de los movimientos. Las excavaciones más desfavorables son las realizadas a pie de las laderas (por soportar esta zona las mayores tensiones), situación frecuente en la construcción de vías de comunicación por valles o por zonas bajas de las laderas.

Las excavaciones influyen igualmente en la alteración del sistema de drenaje superficial y en la modificación del comportamiento hidrogeológico de la lade-

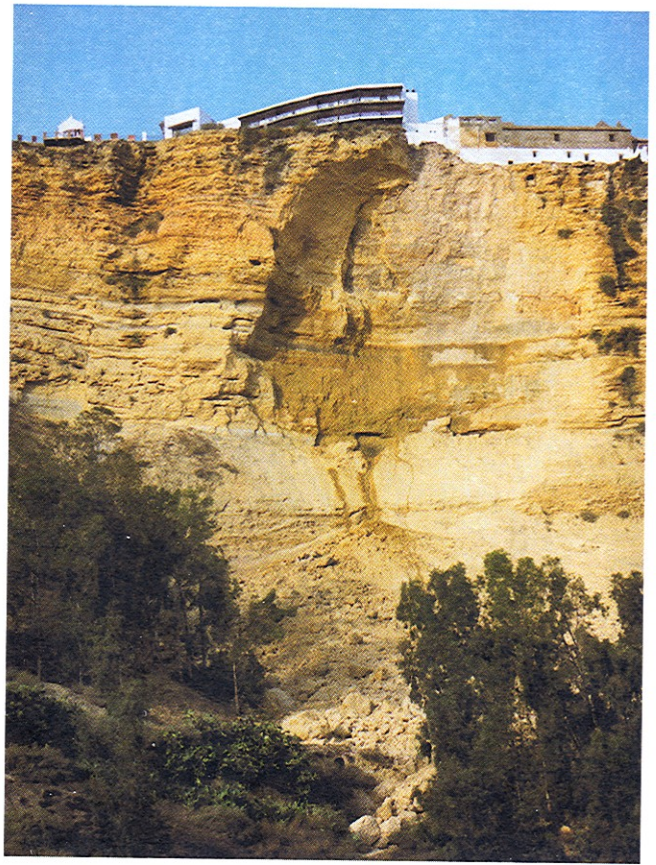


Figura 14.23 Desprendimiento de un gran bloque en un talud vertical calcarenítico motivado por pérdidas en la red de aguas de la población. Arcos de la Frontera, Cádiz (foto M. Ferrer).

ra, al variar los niveles freáticos y los flujos, o dar lugar a la acumulación de agua en determinadas zonas.

En laderas en **áreas urbanas**, las filtraciones y pérdidas de agua de los depósitos y de las redes de abastecimiento y saneamiento, pueden inducir inestabilidades, como en el caso de la Figura 14.23. El riego de jardines y la construcción de lagos artificiales, sin las medidas adecuadas para evitar la infiltración del agua hacia el interior de la ladera, son también causa de deslizamientos.

14.3

Investigación de deslizamientos

La investigación de los procesos de inestabilidad de laderas y de zonas inestables requiere la identificación de

los procesos, el estudio de las causas y de los factores que los controlan y el análisis de los movimientos.

Investigación de deslizamientos

Ámbito	Fases	Métodos y técnicas	Finalidad
Investigación de áreas inestables	Estudios preliminares	Revisión de información y cartografías existentes.	Identificación de los procesos y tipos de movimiento. Identificación de los factores condicionantes. Evaluación general de la estabilidad de la zona.
		Interpretación de fotos aéreas y teledetección.	
	Reconocimientos generales	Observaciones de campo. Cartografía de los procesos. Cartografía de los factores.	
	Estudio de los procesos y de los factores que los causan	Reconocimientos de campo.	
Investigación preliminar del subsuelo: geofísica.			
Investigación de deslizamientos particulares	Investigaciones de detalle	Observaciones y medidas en afloramientos.	Descripción y clasificación de los movimientos. Datos morfológicos, geológicos, hidrogeológicos y geomecánicos.
		Sondeos, geofísica, ensayos de campo, toma de muestras.	
		Ensayos de laboratorio.	
	Instrumentación	Inclinómetros, extensómetros, tiltímetros, piezómetros	Datos de velocidad, dirección, situación de planos de rotura, presiones de agua.
	Análisis de la estabilidad	Equilibrio límite. Modelos matemáticos tenso-deformacionales.	Definición de los modelos y mecanismos de rotura. Evaluación de la estabilidad. Diseño de medidas correctoras.

En el Cuadro 14.5 se detallan las investigaciones más habituales según que el objetivo sea el análisis de áreas inestables o de movimientos particulares. Los métodos de investigación *in situ* se han descrito en el Capítulo 6, siendo igualmente aplicables al análisis de estabilidad de taludes excavados.

Las diferentes fases se desarrollan dependiendo del ámbito de investigación. Los reconocimientos geológicos son necesarios para la selección de emplazamientos adecuados en zonas susceptibles a los movimientos de ladera. Los resultados de las investigaciones *in situ* permiten abordar los trabajos de prevención y los análisis de estabilidad para el diseño de medidas estabilizadoras para mitigar los riesgos, así como otras aplicaciones directas en ingeniería civil y en minería.

El resultado de las investigaciones se plasma en cartografías de zonas inestables (realizando mapas inventario, de factores, de susceptibilidad y peligrosidad; Figuras 14.24 y 14.25) o en mapas, cortes y modelos de detalle en el caso de investigar problemas concretos (ver Recuadro 14.1).

Reconocimientos generales

Los **reconocimientos de las laderas** a nivel regional incluyen la identificación o evaluación de los siguientes aspectos:

- Relieve, geomorfología y pendientes.
- Litología y disposición estratigráfica del terreno.
- Estructura de los materiales rocosos; orientación de planos de discontinuidad.
- Tipos y espesor de suelos; alteración de los materiales y formaciones superficiales.
- Aspectos hidrogeológicos, cursos de agua naturales, sistemas de drenaje, fuentes.
- Vegetación presente en las laderas y usos del suelo.
- Procesos actuantes (erosivos, sísmicos, tectónicos, etc.).
- Modificaciones por procesos naturales y antrópicos.

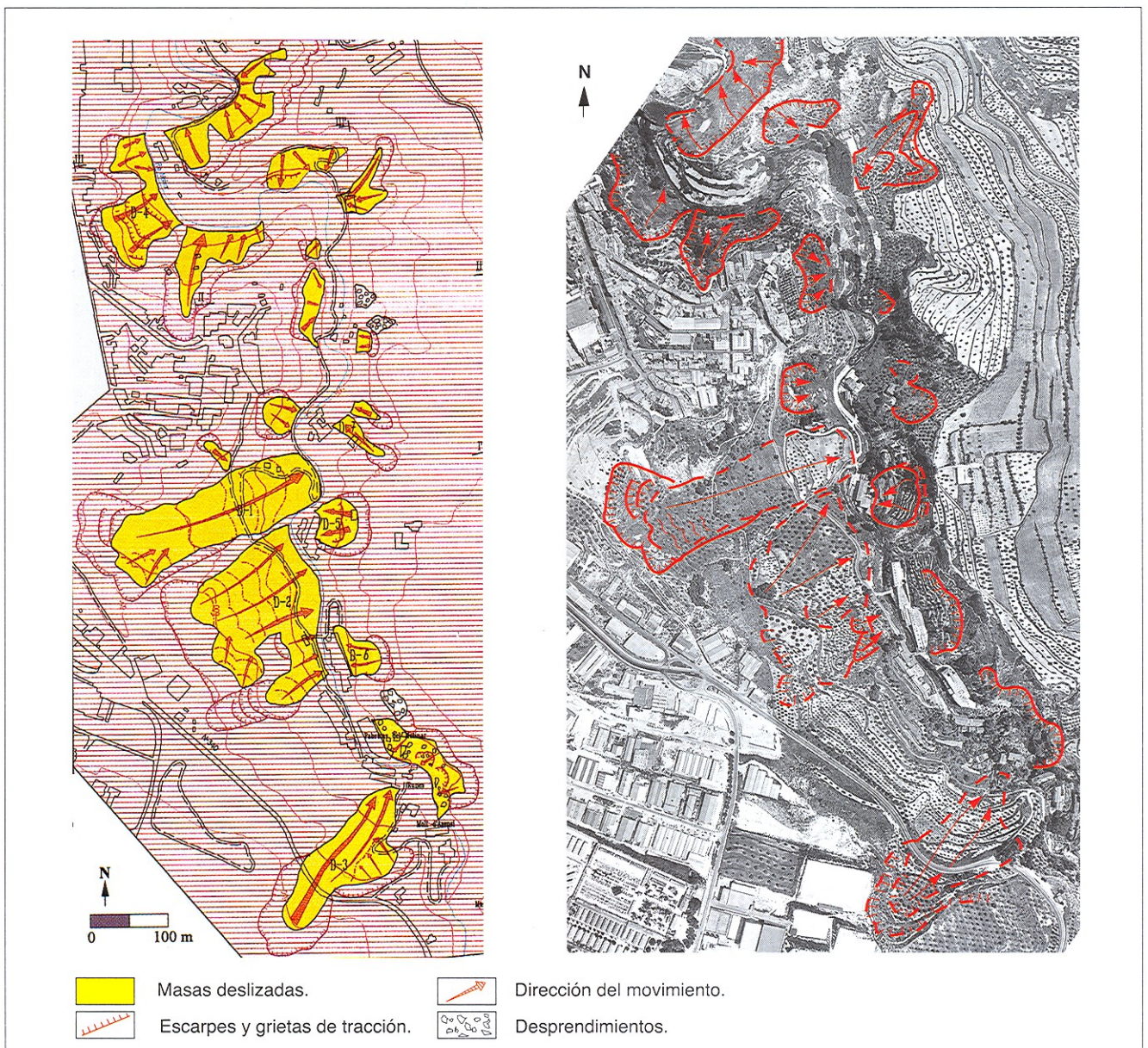


Figura 14.24 Mapa inventario de deslizamientos en la zona de Alcoy, Alicante, realizado a partir de foto aérea con apoyo de campo; escala original 1/5.000 (IGME, 1994).

- Reconocimiento de movimientos de ladera actuales y antiguos: deslizamientos, flujos, desprendimientos, etc.

Los métodos y técnicas para **identificar movimientos de laderas** activos o antiguos y para el reconocimiento de zonas inestables consisten, básicamente, en la identificación de rasgos propios de estos procesos, evidencias de movimientos y otros signos asociados a su aparición, como son:

- Formas erosivas y de acumulación (anomalías en la pendiente de las laderas).

- Depósitos deslizados.
- Grietas y escarpes.
- Daños en construcciones o estructuras, conducciones, obras lineales, etc.
- Tipos y características de la vegetación.
- Modelos de drenaje, zonas encharcadas, surgencias.
- Desvío de cauces, depósitos de masas deslizadas en llanuras de inundación, etc.

Estas tareas se realizan tanto en el campo como a partir de cartografías existentes (**mapas geomorfo-**

Factores característicos para la identificación de movimientos de ladera

Tipo de movimiento	Zona de cabecera y parte superior de la ladera	Zona baja de la ladera	Geometría
Desprendimientos	Laderas irregulares y rocosas escarpadas con material suelto o derrubios en la parte superior. Bloques independizados por discontinuidades o fracturas. Grietas tras el talud. Vegetación escasa.	Acumulación de bloques y fragmentos rocosos.	Pendientes elevadas > 50°.
Deslizamientos rotacionales	Grietas de tracción curvas cóncavas hacia la ladera. Escarpes curvos con estrías, que pueden ser verticales en la parte superior. Superficies basculadas con encharcamientos. Contrastes de vegetación. Malas condiciones de drenaje y encharcamientos en depresiones.	Depósitos convexos, lobulados. Desvío de cauces.	Pendientes entre 20-40° D/L < 0,3 a 0,1.
Deslizamientos traslacionales en rocas o suelos	Grietas de tracción verticales paralelas al talud. Escarpes verticales poco profundos. Material en bloques con grietas entre ellos. Sin encharcamientos en cabecera. Drenaje desordenado o ausencia del mismo.	Desvío de cauces. En ocasiones acumulaciones de material con forma de lóbulos.	Pendientes uniformes D/L < 0,1.
Desplazamientos laterales	Bloques desplazados y basculados en varias direcciones. Pendientes suaves o muy suaves. Grandes grietas separando los bloques. Bloques con formas irregulares controladas por fracturas. Sistemas de drenaje interrumpidos, obstrucciones en cauces, valles asimétricos.	—	Pendientes suaves, incluso < 10°.
Flujos de barro	Nichos cóncavos poco profundos. Pocas grietas. Contrastes en la vegetación con las zonas estables. Encharcamientos. Sin irregularidades importantes en el drenaje.	Lóbulos. Morfología irregular ondulada.	Pendientes 15-25° D/L = 0,05-0,01.
Flujos de tierra y derrubios	Concavidades y lóbulos en el área fuente. Varios escarpes. Depósitos con forma de corriente en valles. Ausencia de vegetación. Drenaje irregular y perturbado en la masa deslizada.	Lóbulos, depósitos convexos. Morfología irregular.	Pendientes > 25° D/L muy pequeño.

D/L = profundidad/longitud de la masa desplazada. Datos de Soeters y Van Westen, 1996, y otros autores.

lógicos, topográficos, geológicos, geotécnicos, etc.), **fotografías aéreas** (Figura 14.24) e imágenes multiespectrales de sensores remotos, de mucha mayor resolución que las imágenes convencionales, siempre en función de la escala de trabajo y de los objetivos del estudio (Apartado 6.2 del Capítulo 6). La información de interés que puede obtenerse a partir de las imágenes aéreas es la relacionada con la morfología, vegetación, condiciones de drenaje y lineaciones estructurales.

En el Cuadro 14.6 se presentan algunas características y rasgos predominantes, que pueden ayudar al re-

conocimiento de los distintos tipos de movimientos de laderas con vistas a su clasificación.

Es importante la identificación de las actuaciones antrópicas y factores medioambientales que modifican las condiciones naturales de las laderas, como excavaciones, embalses, minería, escombreras, cambios en acuíferos, zonas deforestadas, erosionadas, etc. Según el grado de detalle de los reconocimientos y la información disponible, se obtienen datos sobre la localización de los procesos, naturaleza, tipo, edad, extensión, factores condicionantes, etc., que pueden quedar plasmados en **mapas inventario** de los proce-

Clasificación de deslizamientos según su actividad

Clasificación y edad estimada	Descripción	Rasgos característicos
Activo < 100 años	Se mueve actualmente. Puede corresponder a una reactivación.	Topografía irregular y lobulada. Escarpe principal bien definido y sin vegetación. Depresiones encharcadas. Arroyos en los flancos. Depósitos a pie de ladera. Desvío de cauces.
Inactivo 100-5.000 años (Holoceno superior)	No presenta movimiento actualmente.	Relieve lobulado, escarpes vegetados en parte. Depresiones drenadas o sin drenaje. Vegetación diferente de las zonas adyacentes. El pie puede estar cortado por corrientes actuales.
Fósil o antiguo 5.000-10.000 años (Holoceno inferior)	Inactivo desde hace miles de años. Se reconoce en el relieve.	Relieve y escarpe suaves. Con vegetación. Drenaje modificado. Vegetación diferente de las zonas adyacentes. Terrazas fluviales cubiertas por la masa deslizada. Cauces actuales sobre la masa deslizada. Llanuras de inundación más anchas aguas arriba.
Relicto > 10.000 años (Pleistoceno superior)	Inactivo desde hace miles de años. No se reconoce en el relieve.	Topografía suave y ondulada. Sin escarpes. Terrazas excavadas en la masa deslizada. Llanura de inundación actual uniforme.

Modificado de Keaton y De Graff, 1996, y otros autores.

Clasificación preliminar del territorio frente a potenciales movimientos de ladera

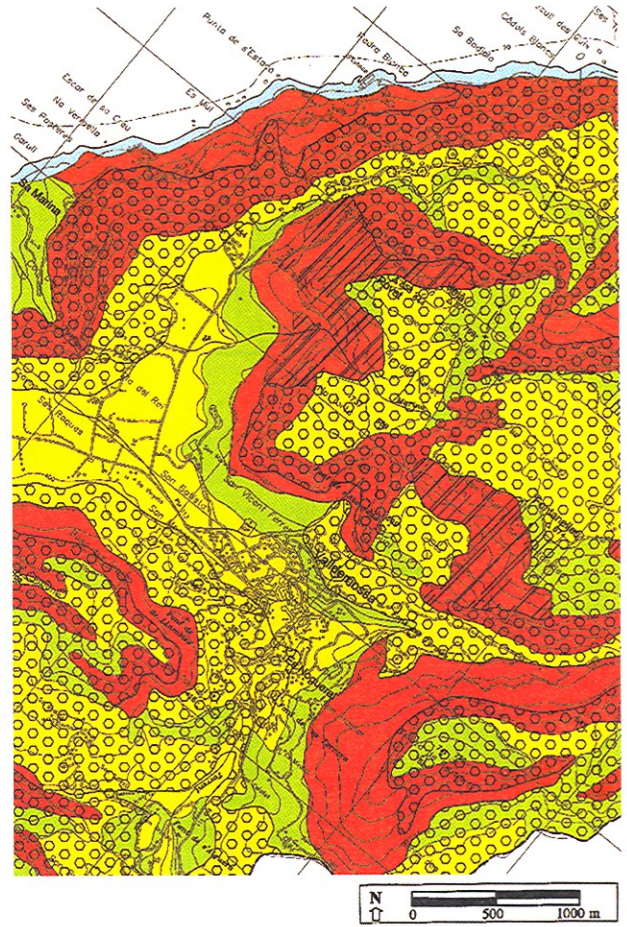
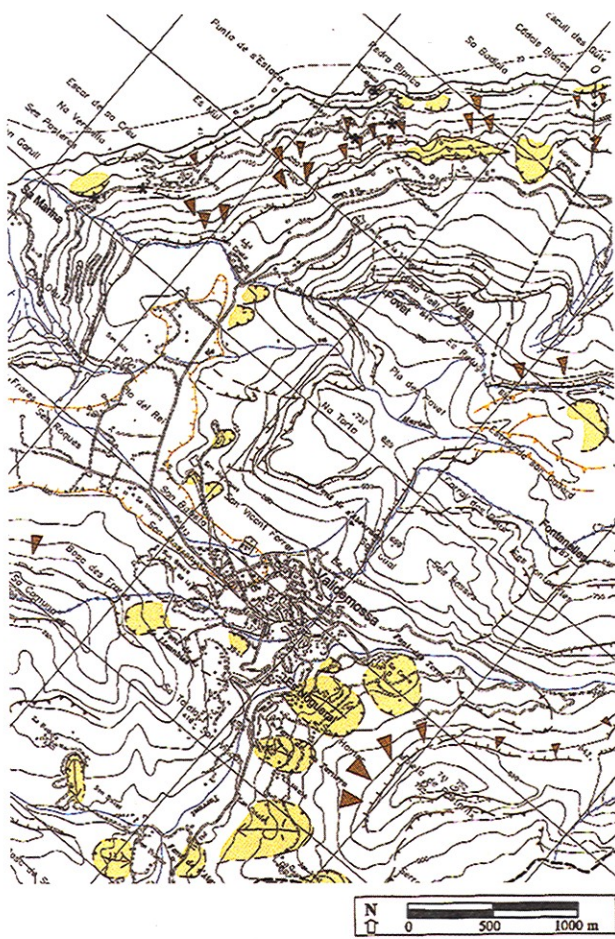
Presencia de movimientos y tipos de materiales		Pendiente		
		Muy baja (<10%)	Baja-media (10°-20°)	Media-alta (>20°)
Sin movimientos activos o antiguos	Sustrato estable	Estable	Estable	Moderadamente estable
	Depósitos superficiales no susceptibles		Generalmente estable	
Con movimientos antiguos	Sustrato estable	Estable	Moderadamente estable	
	Sustrato susceptible	Generalmente estable	Moderadamente inestable	
	Depósitos superficiales susceptibles		Moderadamente inestable	Inestable
Con movimientos actuales o activos		Inestable	Inestable	

Basado en Nilsen, 1979; en Varnes, 1984.

Actualmente y antiguos existentes en una zona (ver Apartado 13.5 del Capítulo 13). Estos mapas aportan, además de la localización de las zonas inestables, información indirecta de las áreas susceptibles o potencialmente peligrosas; no obstante, al mostrar únicamente los movimientos ocurridos, no quedan reflejadas todas las áreas potencialmente inestables. En la Figura 14.25 se presentan ejemplos de mapa inventa-

rio y de susceptibilidad de movimientos de ladera con la localización y tipología de las inestabilidades.

Un aspecto importante es la evaluación de la actividad de los procesos (Cuadro 14.7). Deben considerarse los casos en que los deslizamientos han sido estabilizados por actuaciones antrópicas, ya que posibles cambios en las condiciones geológicas, hidrogeológicas o de otro tipo podrían reactivar los movimientos.



Estructura tectónica	Procesos y formas				
	Gravitacionales		Litorales	Kársticos	Fluviales
Escarpe de falla. Anticlinal. Sinclinal.	Deslizamiento. Flujo.	Frente de caída de rocas. Cono de derrubios.	Acantilado activo. Valles colgados por retroceso de acantilado.	Depresión kárstica. Cañón.	Torrente. Cárcavas. Divisoria de aguas.

		Desprendimientos rocosos	Deslizamientos rocosos	Deslizamientos en suelos
Susceptibilidad	Alta	Rocas duras fracturadas, discontinuidades netas. Permeabilidad por fracturación. Pendientes: >35°. Frentes rocosos de caliza.	Rocas duras en contacto con rocas blandas. Discontinuidades muy marcadas. Pendientes: >35°.	Depósitos coluviales sobre materiales impermeables. Alteración superficial alta. Pendientes: >35°.
	Media	Intensidad de fracturación media. Pendientes: 20°-35°.	Rocas moderadamente duras. Intensidad de fracturación media. Pendientes: 10°-35°.	Suelos y rocas blandas. Alteración superficial grado medio. Permeabilidad media por fisuración. Pendientes: 10°-35°.
	Baja	Materiales masivos. Pendientes: <20°.	Rocas blandas. Intensidad de fracturación baja. Pendientes: <10°.	Rocas blandas. Alteración superficial. Permeabilidad por porosidad. Pendientes: <10°.
		Acantilados activos.		

Figura 14.25 Mapa geomorfológico e inventario de movimientos de ladera y mapa de susceptibilidad. Zona Esporles-Deià, Mallorca. Escala original 1:25.000 (Mateos, 2000).

La evaluación preliminar de las **condiciones de estabilidad** de una zona puede realizarse combinando factores como la presencia de masas deslizadas (por ejemplo en términos del porcentaje ocupado por deslizamientos con respecto al total del área estudiada) y otros factores condicionantes, como litologías susceptibles y grado de pendiente de las laderas. El Cuadro 14.8 incluye una clasificación de la estabilidad según estos parámetros.

Análisis de los procesos

El siguiente paso en la investigación de los procesos de inestabilidad de laderas incluye:

- La identificación de los mecanismos, modelos y tipos de rotura.
- El estudio de los distintos factores que controlan los procesos.
- La evaluación de la extensión, frecuencia y recurrencia de los movimientos.

Estos estudios están basados principalmente en observaciones de campo. Se trata de analizar los procesos, las causas y su contribución al movimiento y su alcance o importancia, sin llegar a los análisis de detalle sobre el grado de estabilidad de laderas particulares.

Los tipos de movimientos y los mecanismos de inestabilidad y rotura se describen en el Apartado 14.2 de este Capítulo y en el Apartado 9.4 del Capítulo de taludes, respectivamente.

La descripción general de los movimientos de ladera debe incluir (Cruden y Varnes, 1996):

- Tipo de movimiento (indicando si es complejo).
- Material.
- Dimensiones.
- Actividad (ver Cuadro 14.7).
- Distribución del movimiento dentro de la masa.
- Velocidad (ver Cuadro 14.9).
- Contenido en agua (seco, húmedo, muy húmedo, saturado).

Un aspecto importante es el contenido en agua del terreno, que ayuda además a la clasificación del movimiento; las descripciones pueden realizarse, de una forma simple, según:

- Ausencia de señales de humedad en la ladera.
- Presencia de agua, pero no libre; el material se puede comportar como plástico, pero no fluye.
- El material tiene suficiente agua para comportarse en parte como un líquido.

La Figura 14.26 presenta un esquema para la descripción de las características y dimensiones de los deslizamientos (ver también Figura 14.3). Para más detalles se remite a Dikau et al (1996).

Dentro del **estudio de los factores condicionantes y desencadenantes** que causan las inestabilidades debe prestarse especial atención a aquellos que más influencia ejercen en la ocurrencia de los movimientos de ladera, como son:

Escala de velocidad de los movimientos de ladera

Clase	Descripción	Velocidad (mm/seg)	Valores típicos	Daños probables
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5 m/s	Violento y catastrófico. Destrucción de edificios por impacto de la masa deslizada. Número elevado de muertos.
6	Muy rápido			Es difícil escapar. Algunos muertos. Destrucción de edificios y estructuras.
5	Rápido	5×10^1	3 m/min	Es posible escapar. Destrucción de edificios y estructuras.
4	Moderado	5×10^{-1}	1,8 m/h	Algunas estructuras pueden mantenerse temporalmente.
3	Lento	5×10^{-3}	13 m/mes	
2	Muy lento	5×10^{-5}	1,6 m/año	Pueden aplicarse medidas correctoras. Las estructuras y edificios pueden mantenerse.
1	Extremadamente lento	5×10^{-7}	16 mm/año	Las estructuras permanentes no resultan dañadas en general.
				Imperceptible si no es con instrumentación. Es posible la construcción con precauciones.

Cruden y Varnes, 1996.

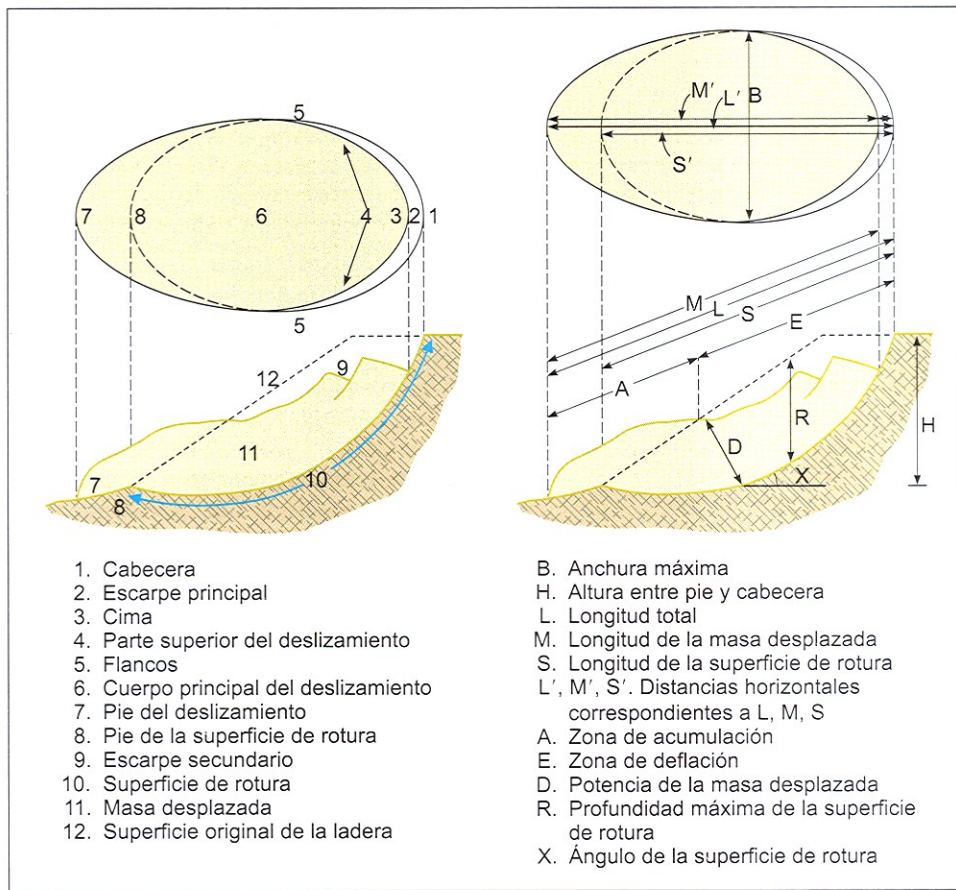


Figura 14.26 Descripción de los rasgos y dimensiones de un deslizamiento (modificado de Int. Geotech. Soc. UNESCO, 1993; en Dikau et al, 1996).

- Litologías y grado de meteorización o alteración.
- Estructura geológica, distribución y orientación de planos de discontinuidad (en caso de laderas rocosas).
- Comportamiento geomecánico y propiedades físicas y resistentes de los materiales.
- Parámetros hidrogeológicos, niveles piezométricos y su variación.
- Condiciones meteorológicas.
- Otros posibles factores desencadenantes naturales y antrópicos.

La información sobre los factores presentes en una zona debe ser obtenida de forma rigurosa, cuantificándola siempre que sea posible.

Existe una estrecha relación entre los factores descritos y los tipos de movimiento: los factores condicionantes definen los mecanismos de rotura y los tipos de movimiento, mientras que los factores desencadenantes, generalmente, influyen en la magnitud de los procesos. Estos últimos son variables o «transitorios» (como el contenido de agua en el terreno o las sacudidas sísmicas, respectivamente).

La estimación de la **frecuencia** de los movimientos se realiza a partir de estudios históricos y estadísticos, de series de precipitaciones (analizando la recurrencia o periodos de retorno, regímenes, máximos históricos) y de las relaciones entre movimientos de ladera y terremotos, inundaciones y actividad volcánica, según los casos.

Investigaciones de detalle

Estas investigaciones son necesarias para conocer en detalle el mecanismo de rotura de una ladera y realizar los análisis de estabilidad. Sus objetivos son:

- Determinar las propiedades geomecánicas e hidrogeológicas del terreno.
- Determinar las características del movimiento, principalmente la situación de los planos de rotura o deslizamiento y la velocidad.
- Definir los datos necesarios para los modelos y análisis de estabilidad.

Investigaciones de detalle en deslizamientos

Propiedades de los materiales	Superficies de rotura	Velocidad del movimiento
Métodos geofísicos (resistividad, sísmica de refracción). Calicatas y trincheras. Sondeos. Ensayos de laboratorio. Pozos de reconocimiento. Ensayos de campo. Análisis de estabilidad a posteriori.	Observaciones de campo. Métodos sísmicos y eléctricos. Excavaciones y calicatas. Medidas en el interior de sondeos. Testificación detallada de sondeos. Observaciones en pozos de gran diámetro. Inclinómetros y extensómetros. Análisis de estabilidad a posteriori.	Medidas en grietas y escarpes. Instalación de hitos o estacas. Medidas topográficas convencionales. Inclinómetros y extensómetros. Medidas electrónicas y con GPS. Análisis de imágenes de satélite (interferometría).

Las investigaciones son aplicables a laderas potencialmente inestables, con deslizamientos antiguos o con inestabilidades activas, siempre que la velocidad de los movimientos sea suficientemente lenta para permitir las diferentes actuaciones y reconocimientos.

La **caracterización geomecánica e hidrogeológica** se realiza en campo, mediante las observaciones y ensayos necesarios en afloramientos, sondeos y calicatas; la geofísica proporciona información sobre determinadas propiedades físicas y mecánicas. Los ensayos de laboratorio complementan la caracterización, aportando los valores de los parámetros físicos y geotécnicos de los materiales. En el Cuadro 14.10 se incluyen los métodos habituales de investigación *in situ*, descritos en el Capítulo 6.

Es importante realizar una topografía de detalle donde se reflejen las grietas de tracción, escarpes, saltos, zonas con movimientos diferenciales, situación de investigaciones y medidas, etc., así como mapas geológicos a gran escala (1/500 a 1/2.000, según la extensión de la ladera a estudiar).

Para la realización de los análisis de estabilidad o para evaluar la representatividad de los modelos matemáticos, en caso de realizarse, es necesario conocer la **situación de las superficies de rotura**, lo que también permite establecer el modelo geométrico de la masa inestable. Éstas pueden definirse a partir de:

- **Observaciones y medidas en superficie:** a) en la cabecera y flancos (escarpes y saltos) y en el pie del deslizamiento (dependiendo del comportamiento de la masa inestable, del tipo y fase evolutiva del movimiento puede aflorar el plano de rotura; Figura 14.27); b) en deslizamientos rotacionales la localización de la rotura puede inferirse a partir de la geometría de la masa movida y de la medida de la inclinación o basculamiento de la cabecera de la ladera; c) en deslizamientos traslacionales, puede medirse la profundidad de las grietas de tracción en cabecera, si éstas llegan hasta el plano de rotura.

- **Observaciones en excavaciones y calicatas**, realizadas sobre los límites del deslizamiento o sobre la masa deslizada en caso de tener profundidad accesible a la maquinaria.
- **Observaciones y medidas en sondeos** (inclinómetros, cámaras de TV, etc.).
- **Observación de deformaciones en pozos** de gran diámetro revestidos con anillos que se desplazan diferencialmente entre ellos siguiendo el movimiento del terreno (ver Figura 6.98 del Capítulo 6)
- **Métodos geofísicos**, como sísmica de refracción y resistividad eléctrica; las superficies de deslizamiento se deducen a partir de las diferencias en las propiedades de la masa movida y del sustrato estable de la ladera; no suele dar resultados en deslizamientos traslacionales a favor de planos paralelos a la estratificación.

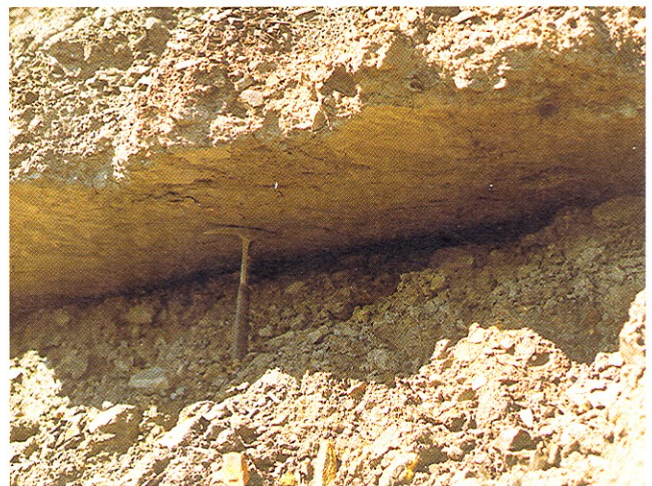


Figura 14.27 Superficie de rotura neta de un deslizamiento en materiales lutíticos, donde se observa el desplazamiento de la masa deslizada sobre la zona inferior estable. León (foto L. González de Vallejo).

En ocasiones, los reconocimientos geológicos de detalle permiten, al menos de forma aproximada, estimar la posible posición de los planos de deslizamiento a partir de criterios geológicos, estratigráficos o estructurales (contactos entre diferentes litologías, presencia de estratos o niveles de diferente competencia, contactos entre suelos y sustrato rocoso o entre rocas alteradas y material sano, presencia de fallas, etc.), lo que supone un punto de partida importante para las subsiguientes investigaciones de detalle.

La observación detallada de los **testigos de sondeos** permite detectar niveles arcillosos blandos, superficies estriadas, zonas alteradas, brechificadas y/o húmedas, planos con signos de presencia de agua, etc. La rotura puede ocurrir a favor de una o varias superficies netas o de zonas de cierto espesor.

En el **interior de sondeos** o perforaciones, cuya profundidad debe siempre superar la cota de la superficie de deslizamiento prevista o estimada, pueden efectuarse diferentes observaciones y medidas:

- Introducir una tubería y dejar que se corte por el plano de rotura, midiendo después su profundidad; este método presenta el inconveniente de que no se detectan planos de rotura inferiores.
- Introducir «testigos» (un trozo de tubo metálico suficientemente pesado para que deslice con facilidad por el interior del sondeo hasta el fondo del mismo) tras la entubación del sondeo, izándolo periódicamente hasta que la rotura producida por el deslizamiento impida su movimiento ascendente, indicando así la profundidad de los planos de corte (Figura 6.98 del Capítulo 6).
- Introducir cámaras de TV para observación directa del interior de los sondeos.
- Instalación de inclinómetros y extensómetros, teniendo en cuenta que si los movimientos son rápidos, éstos pueden cortar las tuberías inclinométricas.

Los **inclinómetros** deben introducirse varios metros por debajo del plano de rotura, por lo que para su instalación se debe tener una idea aproximada de la situación de dicho plano; estos instrumentos miden la desviación (inclinación) del sondeo en dos direcciones a ángulos rectos, proporcionando curvas de desplazamientos cuya inflexión denota la situación de los planos (ver Apartado 6.6 y Figura 6.95 del Capítulo 6). Los **extensómetros** miden movimientos relativos entre la boca del sondeo y uno o varios puntos situados en el interior.

Otros sistemas más o menos complicados han sido desarrollados para detectar los planos de rotura, basados en la introducción de diversos dispositivos o elementos en los sondeos, o en la introducción de elementos en las laderas. Para más detalles se remite a Hutchinson (1983).

Si no es posible detectar las superficies de rotura de forma directa, éstas pueden deducirse a partir de la comparación entre las propiedades y características del material deslizado y del terreno *in situ* no afectado por el movimiento. En determinados tipos de materiales (suelos y rocas blandas deformables) las masas desplazadas suelen estar alteradas, desorganizadas, con fisuras, etc., y, en el caso de suelos arcillosos, presentar contrastes en su fábrica con respecto al terreno *in situ*.

Mediante análisis mineralógicos de materiales arcillosos se pueden identificar orientaciones de minerales a favor del movimiento, pudiéndose deducir la situación de las superficies de corte.

En ocasiones, se pueden tomar muestras de la superficie de deslizamiento, y realizar ensayos de laboratorio para obtener los valores residuales de los parámetros resistentes.

Para la datación de los deslizamientos se emplean técnicas de **datación absoluta** y de **dendrocronología** (Moya y otros, 1992).

Los métodos descritos permiten conocer la posición de los planos de deslizamiento o de rotura en movimientos activos, aunque, como se ha indicado, con muy bajas velocidades, siendo también válidos para los **movimientos inactivos o antiguos**, excepto aquellos que se basan en la medida u observación de los desplazamientos. Para este último caso, también pueden aplicarse otro tipo de métodos, como los **análisis micropaleontológicos**, para detectar contactos discordantes entre diferentes niveles micropaleontológicos.

La cantidad y situación de las investigaciones *in situ* depende de las características de cada caso, pero como criterio general deben realizarse:

- Sondeos en la parte de cabecera, a media ladera y en el pie del deslizamiento.
- Perfiles geofísicos longitudinales y transversales al deslizamiento.
- Medidas de movimientos superficiales a lo largo de la masa desplazada y en las grietas principales (cabecera y flancos).
- Ensayos hidrogeológicos en la cabecera y en el cuerpo del deslizamiento.
- Medidas inclinométricas.

La profundidad de los sondeos y de la geofísica debe ser suficiente para alcanzar a las zonas estables bajo las masas deslizadas (límite que en ocasiones, como se ha indicado, puede determinarse aproximadamente a partir de criterios geológicos, estratigráficos o estructurales). Es recomendable que la campaña de investigación se divida en fases para poder modificar y complementar las investigaciones en caso necesario.

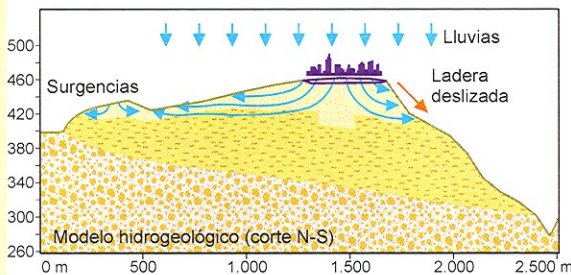
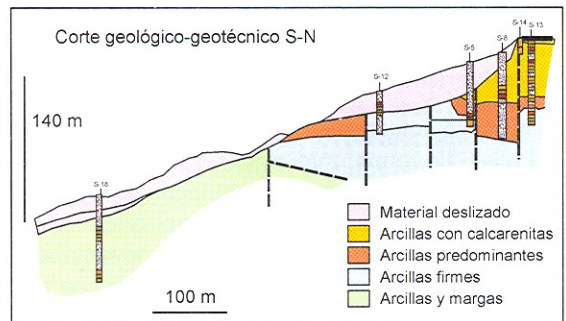
El deslizamiento de Benamejé (Córdoba)



Fotografía aérea de la ladera deslizada.



Cabecera y escarpe principal del deslizamiento.



LEYENDA

	Arenas y gravas. Cuaternario
	Caliche, calcarenitas, arcillas y costras de carbonatos. Pleistoceno-Holoceno
	Calcarenitas y arcillas con conglomerados, microbrechas y calcarenitas. Oligoceno-Mioceno Inf.
	Arcillas rojizas y verdosas con niveles calcareníticos. Plioceno-Eoceno
	Margas arenosas, margocalizas y arcillas margosas. Cretácico-Paleoceno
	Arcillas y margas abigarradas con niveles de areniscas vinosas y yesos. Facies Keuper
	Materiales deslizados
	Materiales deslizados retaluzados
	Grieta de tracción de cabecera
	Materiales deslizados antiguos
	Zonas deslizadas con bloques de conglomerados, cantos de calizas, cherts y microconglomerados
	Zonas encharcadas y arroyos
	Buzamiento de capas
	Fallas
	Fallas supuestas



Cartografía geológica de la ladera.

También deben investigarse las zonas limítrofes de la ladera inestable, sobre todo en lo que se refiere a detectar otras inestabilidades, a la caracterización geológica y al comportamiento hidrogeológico (en cuyo caso la extensión de la investigación vendrá dada por las zonas de procedencia de los flujos subterráneos).

En el Recuadro 14.1 se incluye un ejemplo del deslizamiento de Benamejé, Córdoba, con las diferentes fases y resultados de la investigación (IGME, 1998), cuyo objetivo fue diseñar las medidas de estabilización. El deslizamiento, con una longitud próxima a 1 km, en la ladera entre la población de Benamejé y el río Genil, había sufrido reactivaciones periódicas durante los últimos siglos, principalmente a causa de precipitaciones intensas, afectando a construcciones del sur de la población. En dicho Recuadro quedan reflejados los trabajos preliminares, reconocimientos de campo e investigaciones *in situ*, cartografía de detalle de la ladera y modelos establecidos en base a los resultados obtenidos. En la Figura 14.28 se presenta un esquema de las actuaciones llevadas a cabo para la estabilización del deslizamiento (Sopeña y Estaire, 2000); en la Figura 4.29 se muestra la ladera después de las obras de estabilización.



Figura 14.29 Vista de parte superior de la ladera de Benamejé tras las obras de estabilización (foto M. Ferrer).

Análisis de estabilidad

Una vez conocidos los datos geológicos, hidrogeológicos y geométricos, tanto de la masa deslizada como de la ladera, y las propiedades geomecánicas de los materiales, pueden establecerse los **modelos geo-**

lógico, hidrogeológico y geotécnico para llevar a cabo los **análisis a posteriori de la estabilidad** y del comportamiento de la ladera (*back analysis*).

La determinación cuantitativa de la estabilidad, en términos deterministas (mediante el cálculo del **coeficiente de seguridad** o mediante el cálculo de las relaciones tenso-deformationales y de los desplazamientos admisibles) o **probabilistas**, es un requisito fundamental en los proyectos de ingeniería que precisan actuaciones sobre laderas con inestabilidades. En el Apartado 9.5 del Capítulo de Taludes se describen los métodos de análisis de estabilidad.

Los análisis a posteriori mediante los **métodos de equilibrio límite** proporcionan:

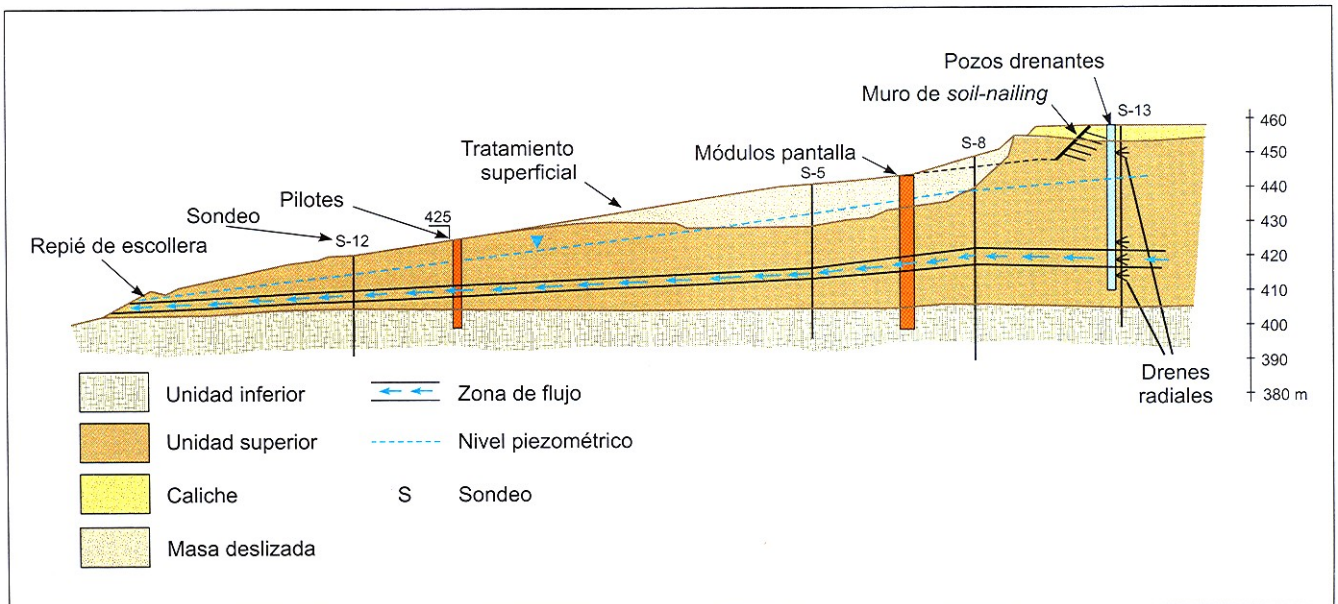


Figura 14.28 Esquema de las medidas de estabilización en el deslizamiento de Benamejé (cortesía del CEDEX, Ministerio de Fomento).

- El coeficiente de seguridad de la ladera, a partir del conocimiento de la superficie de rotura y de las propiedades de los materiales.
- Los parámetros resistentes, c y ϕ , del plano de rotura, fijando en el modelo la superficie de deslizamiento y el valor del factor de seguridad (para análisis en situaciones inestables o cercanas al equilibrio se toma $FS = 1,00$), lo que permite comparar los resultados con los datos obtenidos de laboratorio, y realizar análisis paramétricos o de sensibilidad para obtener los valores de los parámetros resistentes más representativos.

Las modelizaciones mediante **métodos tensión-deformación** permiten:

- Determinar las pautas y el modelo de comportamiento tenso-deformacional de toda la ladera, a partir de las propiedades de los materiales, y su comparación con el comportamiento real observado.
- Determinar los parámetros resistentes y deformacionales de los materiales de la ladera, modelizando o «reproduciendo» los rasgos y el comportamiento observado en campo, y la comparación de estos parámetros con los obtenidos en laboratorio.

Es conveniente comparar los resultados de ambos métodos. Debe tenerse en cuenta que los resultados de los ensayos en laboratorio, e incluso *in situ*, no suelen ser representativos de los parámetros a escala real, sobre todo en el caso de macizos rocosos, obteniéndose frecuentemente valores superiores a los que resultan de los análisis a posteriori.

El empleo de programas de ordenador permite la modelización detallada y el análisis de la rotura y del comportamiento de laderas en suelos y rocas. Programas como FLAC, UDEC, ZSOIL, PLAXIS, PHASE2, etc., permiten el análisis de casos complejos y de una gran variedad de condiciones hidrogeológicas, tensionales, etc., modelizándose también las medidas de estabilización.

Instrumentación

La instrumentación o auscultación de deslizamientos constituye la fase más avanzada de las investigaciones de detalle, y tiene por finalidad la vigilancia y la predicción del comportamiento de la ladera, además de la obtención de datos sobre el proceso. La instrumentación debe orientarse fundamentalmente a la investigación de:

- Situación de la superficie o superficies de rotura, aspecto tratado anteriormente.

- Velocidad del movimiento, su variación y distribución de los desplazamientos en la ladera.
- Posición del nivel freático y presiones de agua.

El tiempo de observación y medida de la instrumentación depende de varios factores, pero al menos debería ser de un ciclo meteorológico anual, y mayor si se quiere conocer la influencia de condiciones climáticas a más largo plazo (Sowers and Royster, 1988). Por ejemplo, si los estudios se realizan en un periodo de sequía, las medidas correctoras o estabilizadoras diseñadas, posiblemente no serán efectivas cuando cambien las condiciones y se den épocas lluviosas.

Las características y velocidad del movimiento depende del tipo de proceso, pendiente de la ladera, contenido en agua de los materiales, etc. Los datos de velocidad son necesarios para el diseño de medidas correctoras o mitigadoras. La medida de los desplazamientos y de la velocidad del movimiento puede llevarse a cabo mediante instrumentación en superficie y en profundidad (**inclinómetros**). Los valores de la velocidad, es decir de los desplazamientos en función del tiempo, permiten también conocer la evolución de los procesos y, en determinados casos, prever el «desenlace» de la rotura (ver Figura 9.72 del Capítulo 9).

Los **piezómetros** proporcionan la situación de los niveles piezométricos y las presiones de agua en los niveles en que han sido instalados. Para conocer las presiones actuando sobre la superficie de rotura, éstos deben instalarse en el plano de deslizamiento o inmediatamente por encima.

Los aspectos relacionados con la instrumentación se tratan en el Apartado 9.7 del Capítulo de Taludes, y los métodos se describen en el Apartado 6.6 del Capítulo de Investigaciones *in situ*.

Sistemas de alarma

Consisten en la instalación de diversos sistemas o instrumentos, en superficie o en profundidad, con la finalidad de detectar movimientos o medir determinados parámetros relacionados con los movimientos. Los más frecuentes son:

- Instalación de inclinómetros y piezómetros en deslizamientos o en laderas cuya inestabilidad supone riesgos importantes (por ejemplo, en laderas de embalses o de zonas urbanizadas).
- Instalación de vallas o redes de cables en laderas rocosas con peligro de desprendimientos.

En el primer caso deben ser establecidos los valores tolerables (de desplazamientos en el caso de inclinómetros o altura del agua en los piezómetros) a partir de los cuales se considera que los movimientos son peligrosos o que se puede producir la aceleración de

los mismos. Es muy importante realizar correctamente la toma de datos, preferiblemente automática, y la interpretación de las medidas obtenidas, y las decisiones deben basarse en juicios expertos. La frecuencia de medida está en función de las características del proceso y de la fase o estado de inestabilidad. Debe prestarse atención también al correcto funcionamiento y mantenimiento de los sistemas.

En base a las medidas de los niveles piezométricos pueden establecerse correlaciones con las precipita-

ciones, lo que ayuda a definir los niveles o umbrales de alarma, en relación a precipitaciones máximas horarias o diarias o precipitaciones acumuladas durante días o semanas.

Las vallas o cables para detectar la caída de bloques mediante señales eléctricas o de otro tipo (al golpear los bloques desprendidos) generalmente se instalan en laderas rocosas con vías de ferrocarril y carreteras a su pie. El sistema puede estar conectado con señales que avisen del peligro inminente.

14.4

Medidas de corrección

Las medidas de corrección o estabilización de laderas están encaminadas a prevenir los procesos y mitigar los daños. Su aplicación depende principalmente de la tipología, magnitud y velocidad de los movimientos, y pueden realizarse antes (en casos de laderas potencialmente inestables) o durante el movimiento, siempre que su velocidad lo permita. Los deslizamientos o flujos de dimensiones importantes, incluso con velocidades muy bajas, son muy difíciles o imposibles de detener. Las medidas de estabilización se describen en el Apartado 9.6 del Capítulo de Taludes.

Las actuaciones, una vez que el movimiento ha comenzado, se deciden en función de:

- El volumen de la masa inestable.
- Las pautas del movimiento, velocidad del proceso y comportamiento de la masa inestable.
- La profundidad de los planos de rotura.
- La pendiente y altura de la ladera.
- El tipo de materiales presentes.
- La accesibilidad a la ladera.

Las actuaciones más efectivas, y muchas veces las menos costosas, son las que intervienen directamente sobre las causas que desencadenan las inestabilidades. En el caso de los deslizamientos son recomendables, sobre todo cuando presentan cierta magnitud o profundidad, las **obras de drenaje** y la **modificación de la geometría**, al actuar sobre dos de los factores principales que condicionan las inestabilidades: las presiones intersticiales y la distribución de las fuerzas debidas al peso del terreno.

El drenaje y las medidas para evitar la entrada de agua son siempre beneficiosas para la estabilidad de la ladera, pero deben ser diseñadas según las características hidrogeológicas y en base a estudios de detalle, sobre todo los drenajes profundos.

En el caso de deslizamientos y movimientos tipo flujo no muy rápidos y poco profundos, las medidas más recomendables son las de drenaje superficial mediante excavación de zanjas perimetrales que eviten la llegada de agua a la masa en movimiento (Figura 14.30). Los drenajes superficiales sobre masas deslizadas deben realizarse una vez que éstas se han estabilizado (Figura 14.31).

Otras medidas, como la instalación de anclajes y bulones, son recomendables en caso de inestabilidades en macizos rocosos para evitar los deslizamientos y desprendimientos de bloques, no siendo efectivas en



Figura 14.30 Excavación de una zanja de drenaje perimetral para estabilización de un deslizamiento (foto M. Ferrer).

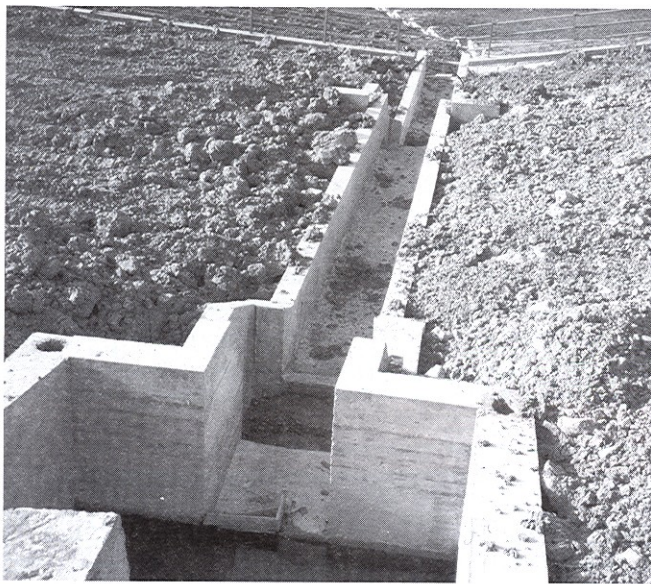


Figura 14.31 Sistema de zanjas de drenaje en «espina de pez» sobre una ladera inestable en el norte de Italia (foto M. Ferrer).

deslizamientos en suelos (a no ser que se instalen sobre muros o vigas que repartan las fuerzas de forma uniforme); en este último caso, son más efectivos los elementos resistentes como pilotes, muros o pantallas. En la Figura 14.32 se presenta un esquema de la estabilización de un extenso deslizamiento superficial en suelos residuales limo-arcillosos.

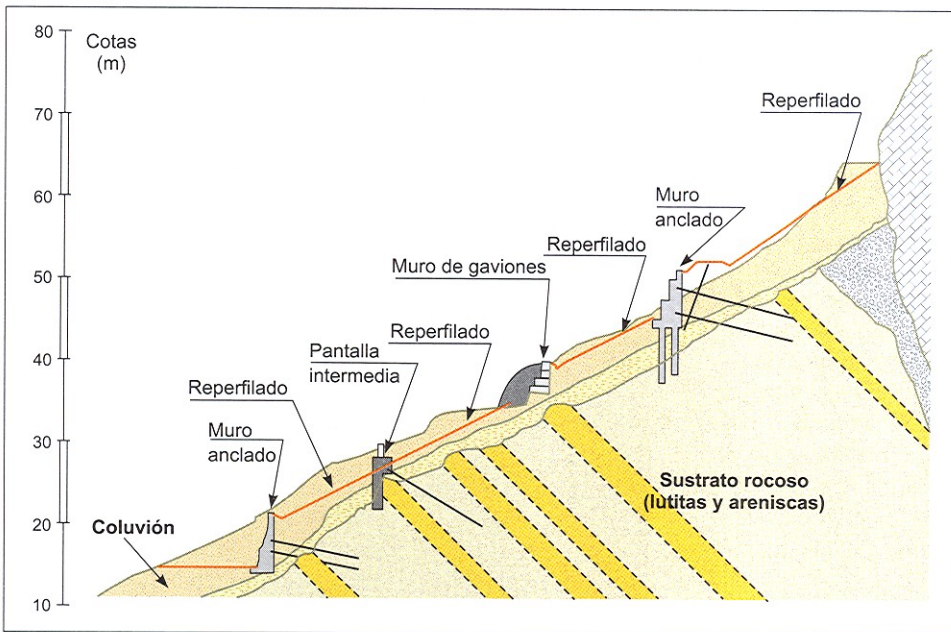


Figura 14.32 Esquema de las medidas de contención de un deslizamiento en un suelo coluvial arcillo-limoso sobre un sustrato formado por lutitas y areniscas; L'Estartit, Gerona (Rodríguez Ortiz, 1997).

Estabilización y protección frente a desprendimientos rocosos

En el Apartado 9.6 del Capítulo de Taludes se describen las medidas de protección superficial, aplicables igualmente a laderas naturales. También se describen en el mismo Apartado las **medidas activas** o de estabilización frente a desprendimientos potenciales de bloques rocosos, que consisten en:

- Instalación de bulones y anclajes para fijación de bloques.
- Instalación de sistemas de cables y mallas metálicas fijados o anclados a las laderas para estabilización de zonas muy fracturadas; consiste en la colocación de una malla metálica, de doble o triple torsión, sobre la que se superponen una serie de cables formando una retícula, anclados a la roca en sus extremos y tensionados (Figura 14.33).

Existe otro tipo de actuaciones, las denominadas **medidas pasivas**, cuya finalidad es evitar los daños que los desprendimientos puedan causar a edificaciones, estructuras y vías de comunicación. Estas consisten en:

- Mallas metálicas para guiado de pequeños bloques desprendidos.
- Cunetones o zanjas para recogida de los bloques caídos.

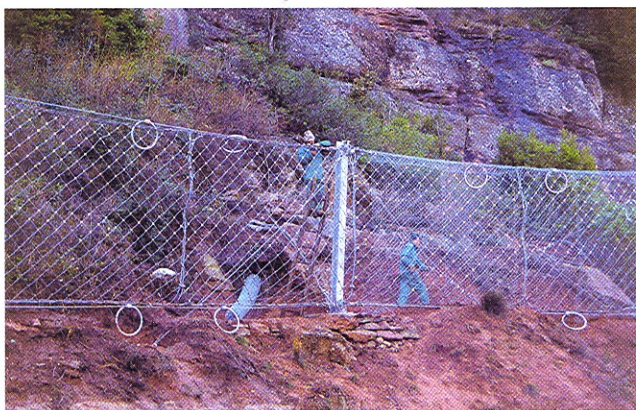


Figura 14.35 Barrera dinámica para contención de desprendimientos, Montserrat, Barcelona (foto L. González de Vallejo).

Estas barreras pueden instalarse también a modo de pórtico sobre vías de comunicación, para detener la caída libre de bloques con una energía cinética de hasta 1.000 kJ (Figura 14.36).

Los **túneles artificiales** protegen igualmente de los desprendimientos rocosos en carreteras y ferrocarriles. Se construyen de hormigón, y sobre su techo se coloca una capa de material granular para amortiguar el impacto de los bloques y evitar que reboten (Figura 14.37). Si los desprendimientos no son de gran volumen, el túnel artificial puede sustituirse por estructuras más ligeras o por galerías dinámicas.

El diseño de estas medidas se realiza en función de la cantidad, volumen y peso de los bloques, pendiente de la ladera, trayectoria de los bloques, ener-

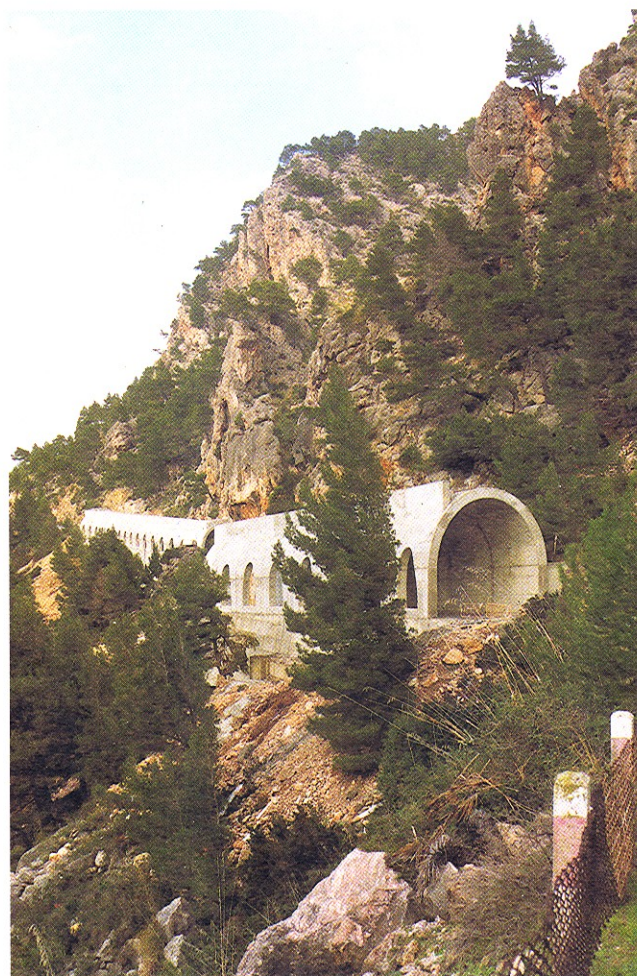


Figura 14.37 Túnel artificial para protección frente a desprendimientos en una carretera al norte de Mallorca (foto L. González de Vallejo).



Figura 14.36 Galería dinámica horizontal en la salida de un túnel para contención de desprendimientos, Montserrat, Barcelona (cortesía de Prospección y Geotecnia, S. L.).

gía de impacto, distancias de alcance, grado de riesgo potencial de los desprendimientos, accesibilidad a la ladera y disponibilidad de espacio para su instalación.

Las observaciones y medidas de campo proporcionan los datos más fiables para la elección y diseño de la medida más adecuada, siendo frecuente combinar varias de ellas. La estimación de los parámetros citados es importante, sobre todo en el caso de instalación de barreras y muros, debiéndose asegurar que no sufran desperfectos importantes y que los bloques no pasen por encima de ellos al rebotar en la ladera o en la zona entre el pie de la ladera y la barrera.

Existen programas de ordenador específicos (ROCK-FALL, ROTOMAP) para la simulación de las trayectorias de los bloques a partir del modelo geométrico de la ladera, situación de las áreas fuente, tamaño y forma de los bloques, pendiente y materiales de la ladera, etc. Según los resultados obtenidos, se decide la situación y altura de la barrera o muro. En ocasiones,

la altura de la barrera y la distancia al pie de la ladera a la que debería colocarse para asegurar el frenado de todos los posibles desprendimientos, no son asumibles (por resultar alturas muy elevadas, por falta de espacio, etc.) y estos dos parámetros se deciden en

función de análisis probabilistas, asumiéndose un nivel de riesgo aceptable según los daños potenciales. Dependiendo de la pendiente, de la situación de las áreas fuente y de la accesibilidad, pueden también instalarse barreras intermedias a media ladera.

14.5

Hundimientos y subsidencias

Tipos de movimiento y causas

Estos procesos se caracterizan por ser movimientos de componente vertical, diferenciándose generalmente entre hundimientos, o movimientos repentinos, y subsidencias. Se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Hundimientos de cavidades subterráneas en roca, con o sin reflejo en superficie.
- Hundimientos superficiales, en rocas o suelos.
- Subsidencias o descensos lentos y paulatinos de la superficie del terreno.

En el primer caso, los movimientos suelen ocurrir por **colapso** de los techos de cavidades subterráneas, más o menos profundas, al alcanzarse una situación límite en la resistencia de las rocas suprayacentes, sometidas a tensiones que no pueden soportar. Los materiales presentan un comportamiento frágil con roturas violentas. El que repercutan o no en superficie depende de la potencia y características geomecánicas de los materiales suprayacentes.

Hundimientos

Las **cavidades subterráneas** pueden tener origen natural o antrópico. La ocurrencia de hundimientos depende de los siguientes factores:

- El volumen y forma de las cavidades.
- El espesor de recubrimiento sobre las cavidades (o profundidad de los huecos).
- La resistencia y comportamiento mecánico de los materiales suprayacentes.

Las cavidades o cuevas naturales están asociadas a **materiales kársticos** o solubles, como las rocas carbonatadas y evaporíticas, donde los procesos de disolución crean huecos que, al alcanzar unas determinadas dimensiones, generan estados de desequilibrio e inestabilidad, dando lugar a la rotura de la bóveda o



Figura 14.38 Hundimiento en materiales aluviales sobre calizas (cortesía de J. J. Durán).

techo de la cavidad; si éste es poco potente o poco resistente, se hundirá la superficie del terreno. Las variaciones importantes del nivel freático en terrenos kársticos pueden dar lugar a reajustes tensionales que provocan hundimientos. También se forman cuevas en materiales volcánicos, como se trata más adelante.

El resultado en superficie de los hundimientos kársticos son las **dolinas** (*sinkholes*), aunque pueden también generarse por disolución de las rocas en superficie de forma paulatina o por subsidencia de los suelos blandos que recubren morfologías kársticas.

No se describen aquí los mecanismos de generación de cavidades kársticas ni los procesos de hundimiento, ampliamente tratados en la bibliografía sobre geomorfología y materiales kársticos. Los **materiales evaporíticos** (sales y yesos), mucho más blandos que los carbonatados, presentan mayor capacidad de disolución (ver Apartado 11.7 del Capítulo de Presas), y los movimientos de reajuste de los materiales a los huecos son continuos y paulatinos, frente al carácter generalmente brusco de los hundimientos en carbona-

tos. Las cavidades en yeso y sal no alcanzan profundidades superiores a los 200 m (Durán, 1988).

Las **coladas de lavas volcánicas** presentan cavidades debidas al enfriamiento diferencial de estos materiales, generalmente con formas tubulares (tubos volcánicos). A pesar de que los hundimientos no son frecuentes por la elevada resistencia de los materiales, sí suponen un riesgo frente a las cargas transmitidas por cimentaciones y otras obras (ver Apartado 8.5 del Capítulo de Cimentaciones).

Las **actividades antrópicas** que pueden dar lugar a hundimientos o colapsos son las **explotaciones mineras** de interior (excavación de minerales estratificados como el carbón, o minería de disolución en materiales salinos, etc.; Figuras 14.39 y 14.40) o excavaciones para otros usos, como túneles de carretera, ferrocarril o «metro», almacenamientos, etc.

Un caso de especial repercusión en cuanto a los riesgos derivados son las excavaciones en **zonas urbanas**, como los túneles del «metro», donde el escaso espesor de recubrimientos suele ser la causa principal de los colapsos o subsidencias que se producen sobre la excavación (ver Apartado 10.10 del Capítulo de Túneles).

Subsidencias

Las subsidencias son generalmente procesos muy lentos, aunque con frecuencia se aceleran por actuaciones antrópicas.

Pueden afectar a todo tipo de terrenos, generalmente a suelos, y son debidos a cambios tensionales inducidos en el terreno, por las siguientes causas:

- Descenso del nivel freático.
- Minería subterránea y túneles.
- Extracción o expulsión de petróleo o gas.



Figura 14.39 Socavón producido por el hundimiento de una antigua galería minera en la zona kárstica de El Calerizo, Cáceres (cortesía de J. J. Durán).



Figura 14.40 Hundimiento por explotación de sal por disolución, actualmente ocupado por un lago salobre: Polanco, Cantabria (cortesía de J. Gómez de las Heras).

- Explotación intensiva de acuíferos.
- Procesos lentos de disolución y lavado de materiales.
- Procesos morfotectónicos y de sedimentación.
- Procesos de consolidación de suelos blandos y orgánicos.

El **descenso del nivel freático**, por periodos de sequía o por extracción de agua de los acuíferos, afecta a materiales no consolidados, que, como consecuencia de la pérdida del agua, sufren cambios en el estado tensional (se incrementan las tensiones efectivas al disminuir la presión intersticial), reduciendo su volumen, con descenso de la cota de superficie; son procesos lentos, pero pueden afectar a grandes extensiones. Es frecuente la subsidencia en suelos arcillosos por sobreexplotación de acuíferos arenosos intercalados. La importancia de la subsidencia depende del tipo de sedimentos, su espesor y de la magnitud del descenso del nivel freático. La velocidad del proceso puede ser de varios centímetros al año. En ocasiones, las deformaciones del terreno son recuperables en parte ante nuevos cambios en las condiciones hidrológicas si no han superado el límite elástico.

La subsidencia supone un riesgo cuando ocurre en zonas urbanas, al dañar y agrietar las edificaciones y afectar a sus cimientos. Otras consecuencias son las inundaciones en zonas costeras, los cambios en el drenaje, etc. Un ejemplo de subsidencia por descenso del nivel freático en una zona urbana se presenta en el Recuadro 14.2.

Hay materiales especialmente susceptibles a los procesos de subsidencia, como los suelos orgánicos o turberas y los rellenos no compactados. Los suelos tipo *permafrost* de las regiones frías (ver Apartado 2.9 del Capítulo 2), que permanecen permanentemente congelados por debajo de la superficie, pueden sufrir

Recuadro 14.2

Ejemplo de subsidencia por descenso del nivel freático en la ciudad de Murcia

En el periodo 1994-1996 se manifestaron en la ciudad de Murcia los efectos de una subsidencia generalizada a causa de un descenso del nivel freático de hasta 8 m, resultando asientos y agrietamientos en unas 150 edificaciones, siendo los edificios antiguos con cimentación superficial los más dañados. Las pérdidas parciales estimadas superaron los 36 millones de euros.

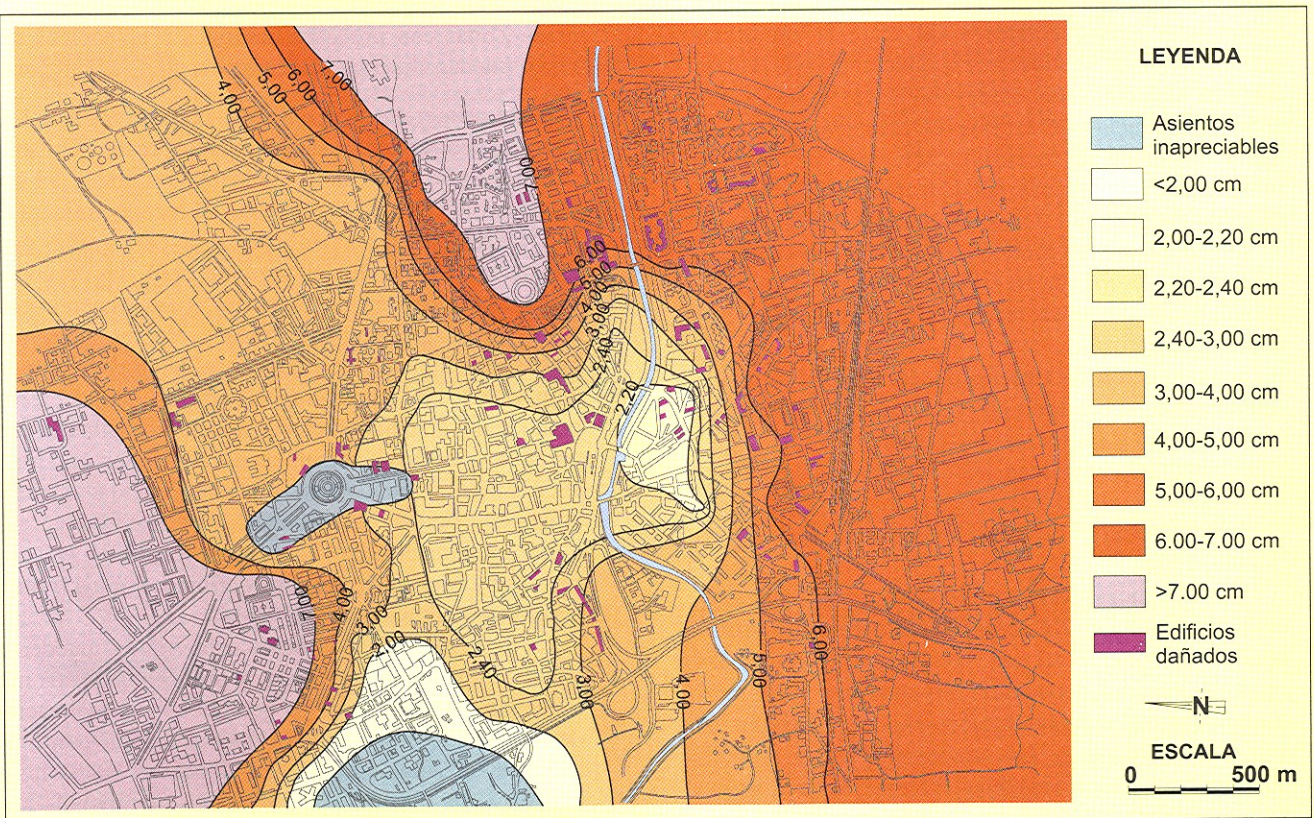
Los factores determinantes del proceso fueron:

- La ubicación de la ciudad sobre depósitos de llanura de inundación, fundamentalmente compuestos por arcillas y limos blandos.

- La sequía que afectó a la zona desde 1992.
- La extracción de agua subterránea.

La reducción de las presiones intersticiales en el subsuelo dio lugar a la consolidación del terreno en los tramos blandos superficiales. El asentamiento medio se estimó en 2-3 cm, obteniéndose valores máximos teóricos por modelización matemática de 8 cm.

En la Figura adjunta se presenta un mapa de los asentamientos estimados en el casco urbano.



Mapa de asentamientos estimados en la ciudad de Murcia por subsidencia provocada por descenso del nivel freático (cortesía del IGME y COPOT, Región de Murcia)

subsidencia si por algún motivo se aumenta la temperatura del subsuelo y se descongela el agua.

La **extracción de gas y petróleo** da lugar a que el terreno suprayacente se deforme en función de la profundidad y volumen extraído. Cuando las extracciones tienen lugar a gran profundidad, donde la compre-

sibilidad de las rocas es baja, juega un papel importante la rotura de los granos minerales de las rocas que contienen a los fluidos.

Ejemplos espectaculares de subsidencia por combinación de extracción de petróleo y agua han ocurrido en Long Beach, Los Ángeles, y en el Valle de S. Joa-

quín, California (EE.UU.), superándose los 9 m; en el segundo caso, los niveles freáticos se han deprimido en algunas zonas hasta 150 m, y la cuenca de subsidencia es la mayor del mundo, con una extensión de 9.900 km² (Walthan, 1989).

La **subsidencia minera** se produce como consecuencia de las deformaciones inducidas en el terreno por las explotaciones. Su magnitud y extensión está relacionada con el tipo de materiales y con el volumen y método de explotación. Las subsidencias más frecuentes aparecen asociadas a la explotación de yacimientos estratificados subhorizontales y masivos (carbón, evaporitas) y depósitos metálicos con disposición vertical o inclinada (diques, venas). La predicción de la subsidencia es difícil, y puede aparecer años después de abandonada una explotación minera; en el caso de capas subhorizontales, suele ser de menor magnitud, aunque puede alcanzar una gran extensión, y es más fácil de predecir. Los modelos basados en medidas instrumentales y los análisis numéricos permiten evaluar la subsidencia minera (IGME, 1986); también existen correlaciones empíricas entre la máxima subsidencia y el espesor de las capas, profundidad y extensión de la explotación. Los procesos de subsidencia por minería pueden afectar a suelos y a macizos rocosos, así como a laderas. Los fenómenos de subsidencia y hundimiento pueden aparecer simultáneamente; la Figura 14.40 corresponde a un hundimiento local dentro de una zona afectada por subsidencia generalizada.

La **excavación de túneles** puede también provocar subsidencias, sobre todo en zonas de bajo espesor de recubrimiento y en suelos poco resistentes.

En **terrenos kársticos** pueden darse subsidencias por disolución en dolinas rellenas de arcilla o en zonas con coberteras de suelos relativamente potentes (Durán, 1988).

La subsidencia puede también estar asociada a **procesos tectónicos y de consolidación de sedimentos arcillosos**, como es el caso de los deltas, donde las tasas de material depositado suponen una carga creciente sobre el sustrato, produciéndose movimientos verticales de reajuste. Las **turbas** (depósitos no consolidados de restos vegetales descompuestos) sufren frecuentemente subsidencia por disminución del contenido en agua o por cargas externas, dada su elevada comprensibilidad.

La ciudad de Venecia es un ejemplo clásico de subsidencia, acentuada desde la década de los 40 del siglo pasado por la extracción de agua subterránea, incrementándose varias veces los valores medios de la subsidencia natural, menores de 0,5 mm/año, hasta alcanzar 1-2 cm/año en la década de los 60. La subsidencia se desaceleró al suspenderse el bombeo intensivo (Murk y otros, 1996; Walthan, 1989).

La ciudad de México es otro ejemplo de subsidencia regional, con valores máximos superiores a los 8 m en los últimos 250 años, debida fundamentalmente a la consolidación de las arcillas lacustres sobre las que se asienta.

Investigación de los procesos

Los reconocimientos para evaluar la posibilidad de movimientos en una zona deben ir encaminados a identificar:

- Litologías susceptibles de sufrir hundimientos o colapsos por procesos naturales: rocas carbonatadas, yesos, sales, etc. (en general materiales kársticos y salinos) y zonas con cavidades subterráneas y hundimientos superficiales.
- Litologías blandas y deformables.
- Zonas con procesos naturales o antrópicos que puedan desencadenar procesos de subsidencia.

En el primer caso, el relieve y la morfología del terreno suelen ser indicadores de los procesos de disolución que están actuando sobre los materiales, y del grado de evolución de los procesos; el reconocimiento de las litologías es inmediato a partir de cartografías geológicas de detalle. En el segundo caso, las litologías susceptibles pueden ser variadas, pero generalmente corresponden a materiales finos y blandos, deformables, con baja resistencia (zonas de llanuras de inundación, rellenos de lagos, fangos, turberas, etc.). El tercer punto incluye, generalmente, las áreas con minería subterránea y las áreas sometidas a variaciones importantes del nivel freático (tanto por cambios estacionales o pluri-anales como por explotación de acuíferos).

La combinación de litologías susceptibles y factores desencadenantes permite definir las áreas potencialmente peligrosas.

La **detección de cavidades** subterráneas puede resultar difícil según su tamaño y profundidad. Los métodos más efectivos son los geofísicos y la realización de sondeos. Los primeros se pueden aplicar con limitaciones en zonas amplias en donde se sospecha la existencia de huecos, siendo los más efectivos la gravimetría y microgravimetría (para cavidades a poca profundidad) y el geo-radar. Los **sondeos** son los más fiables, pero cuentan con el inconveniente de que si no se conoce o sospecha la situación posible de las cavidades, puede ser necesario un gran número de ellos en la investigación. No permiten conocer el volumen de los huecos, pero sí su profundidad. Además de los sondeos convencionales, pueden realizarse perforaciones a rotoperCUSión menos costosas. En el interior de los sondeos o taladros a rotoperCUSión pueden introducirse cámaras de televisión para la obser-

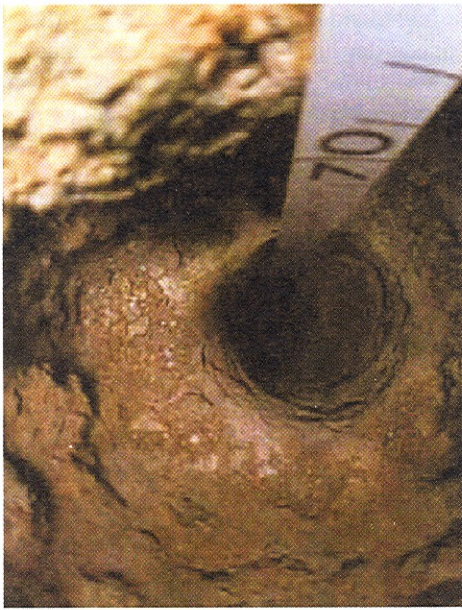


Figura 14.41 Imagen de una grabación con cámara de televisión en el interior de un taladro realizado a rotopercusión, donde se observa una cavidad en coladas basálticas (cortesía de L. Cabrera).

vación de las características y magnitud de las cavidades (Figura 14.41).

La **subsistencia**, incluso con desarrollo muy lento, se puede medir con instrumentación adecuada (medidas taquimétricas, extensómetros, etc.), estimando las

velocidades del proceso para predecir la evolución y consecuencias futuras. Los procesos causados por la extracción de agua, gas o petróleo pueden predecirse con antelación, en función de los volúmenes que se extraigan.

Medidas de corrección

Ante la imposibilidad de evitar los procesos de hundimiento y subsidencia de cierta magnitud, las medidas para paliar sus efectos deben basarse en la prevención de estos fenómenos.

En el caso de cavidades, la solución es el relleno de las mismas, previo conocimiento de su volumen y profundidad, y asegurarse de que el proceso no esté activo; en ocasiones, si el proceso es activo, los rellenos deben ser realizados periódicamente (ver Apartado 8.5 del Capítulo de Cimentaciones).

La subsidencia puede prevenirse y controlarse actuando sobre los procesos que la provocan. Si los materiales afectados no han sobrepasado las deformaciones elásticas, éstas pueden recuperarse si se vuelve a las condiciones iniciales de equilibrio, por ejemplo en el caso de descenso del nivel freático. En las excavaciones subterráneas, la subsidencia puede prevenirse mediante inyecciones y tratamientos previos de consolidación del terreno (ver Apartado 10.10 del Capítulo de Túneles).

14.6

Prevención de riesgos por movimientos del terreno

Los daños causados por los deslizamientos y los hundimientos dependen de la velocidad y magnitud de estos procesos. Los movimientos de ladera rápidos son los que ocasionan mayores riesgos y pueden causar víctimas, mientras que los lentos y las subsidencias presentan menor potencial de daños. Los hundimientos causan daños cuando repercuten en superficie; el riesgo está asociado, más que al proceso en sí, a los efectos en superficie. En muchas ocasiones los procesos de mayor riesgo son de pequeña escala, como los desprendimientos de bloques rocosos y los colapsos repentinos. Frente a los movimientos de gran magnitud, la **prevención** es la actuación más efectiva para evitar los riesgos.

Los movimientos de ladera implican a cualquier tipo de materiales, relieve y zona climática, extendiéndose por toda la superficie terrestre, mientras que los hundimientos se circunscriben a zonas con unas características litológicas, o de otro tipo, determinadas, descritas anteriormente.

En España, debido a factores como su accidentado relieve, variada geología y condiciones climáticas, los **movimientos de ladera** tienen gran importancia, suponiendo las mayores pérdidas económicas provocadas por procesos geodinámicos externos (sin considerar la erosión y las inundaciones), y ocasionando daños sobre todo en zonas urbanas y en vías de comunicación. Las pérdidas estimadas son de unos 150 mi-

llones de euros anuales (IGME, 1987); la reducción de pérdidas por aplicación de medidas de prevención y mitigación ha sido evaluada en torno al 90 %. En países como Japón o Italia, las pérdidas estimadas superan los 2.000 millones de dólares anuales, y los 1.300 en Estados Unidos (Schuster, 1996a). Según la UNESCO-IAEG, entre 200 y 300 muertos son atribuibles directamente a deslizamientos cada año en el mundo, sin considerar los deslizamientos provocados por terremotos. El mayor número de víctimas causado en España por deslizamientos, casi 100 muertos, se produjo en Azagra, Navarra, en 1874, como consecuencia del desplome de un talud de yesos que sepultó parte del pueblo.

A pesar de las mejoras en el reconocimiento, prevención y sistemas de emergencia, los daños por movimientos de ladera en el mundo van en aumento. Según Schuster (1996a) las causas son:

- Aumento de la urbanización y desarrollo en áreas expuestas a deslizamientos.
- Deforestación de áreas con deslizamientos potenciales.
- Aumento en la precipitación regional en determinadas zonas debido a cambios climáticos.

Cuando los deslizamientos se producen como consecuencia de terremotos o tormentas que actúan con intervalos de tiempo muy irregulares, su ocurrencia no se puede predecir en el tiempo, pero sí conocerse y cartografiarse los factores y condiciones geológicas que hacen que una zona sea susceptible, mostrando las áreas de alta peligrosidad durante una posible tormenta o terremoto. Este tipo de mapas ayuda a planificadores, propietarios y aseguradores a valorar los riesgos potenciales.

Los deslizamientos masivos o los grandes flujos de cientos de miles de toneladas, que pueden alcanzar velocidades superiores a los 100 km/h, son mecanismos poco frecuentes; por lo general, cuanto mayores son los deslizamientos con menos frecuencia se producen. Este tipo de fenómenos normalmente deja cicatrices y otros signos reveladores en el paisaje, que permiten reconocer las zonas afectadas durante muchos años, incluso siglos, después de producirse. Los grandes movimientos naturales se pueden prevenir a partir de evidencias de antiguos deslizamientos prehistóricos y estudios de peligrosidad. El desastre de Vajont en Italia pudo haberse evitado ante las abundantes señales de deslizamientos en el valle, y las condiciones geológicas propicias para la generación de roturas masivas.

Con respecto a los **hundimientos**, a pesar de su velocidad, es difícil que causen víctimas o daños importantes, excepto en zonas urbanas o en vías de comunicación. En muchas ocasiones, se producen ante la carga de estructuras y edificios construidos en zonas

kársticas. La **subsistencia** causada por actividades antrópicas puede dar lugar a pérdidas económicas cuantiosas cuando los procesos son extensos y afectan a zonas urbanas. La asociada a procesos geológicos naturales se desarrolla a unas velocidades tan lentas que no tiene incidencia a corto o medio plazo. Los daños causados por estos procesos suelen estar muy localizados, y generalmente consisten en (Suárez y Regueiro, 1997):

- Destrucción y daños por asientos diferenciales y grietas en el terreno.
- Invasión del agua sobre las zonas bajas junto a mares, ríos o lagos.
- Pérdidas y filtraciones en embalses.
- Cambios en el flujo de agua en canales, drenajes, desagües, etc.
- Colapso de tuberías de pozos de agua y petróleo.
- Contaminación de agua subterránea a favor de grietas producidas por la subsistencia.

Las pérdidas por estas causas en Estados Unidos se han evaluado en 500 millones de dólares anuales.

Por lo general, los movimientos de laderas y las subsidencias y hundimientos se pueden prevenir, lo que unido al hecho de que los costes de los trabajos de prevención generalmente son menores que los de corrección una vez que los procesos se han desencadenado, hace que los daños económicos y sociales causados tengan que ver con actuaciones negligentes y con la falta de conocimiento de los procesos que afectan al medio geológico y sus interacciones con las obras y actividades humanas.

La prevención se basa en la identificación y estudio de los procesos y factores que los controlan, lo que permite la realización de mapas previsores para su aplicación a labores de ordenación y uso del territorio. La mitigación de los riesgos puede llevarse a cabo mediante medidas pasivas (restricciones de uso, desarrollo de sistemas de control de movimientos, etc.). Las **medidas de prevención y mitigación** frente a los movimientos del terreno se describen en el Apartado 13.4 del Capítulo 13.

Mapas de susceptibilidad y de peligrosidad

Los mapas de **movimientos del terreno** tienen por finalidad, además de asegurar el correcto uso del territorio y prevenir los riesgos, servir de base para los estudios de detalle para el diseño y construcción de obras de ingeniería. Las representaciones cartográficas pueden incluir:

- Localización de los procesos y zonas afectadas (densidad, distribución y grado de actividad de los procesos).

- Representación de los factores que los condicionan.
- Representación de las zonas susceptibles.
- Zonificación de la peligrosidad.

Estos tipos de mapas, sus contenidos y metodologías generales se describen en el Apartado 13.5 del Capítulo 13. La identificación directa o indirecta (por sus efectos o daños) de inestabilidades y de los factores que las condicionan no presenta problemas importantes, excepto los asociados a la obtención de los datos representativos y cuantitativos del terreno y de los procesos, sobre todo en profundidad. Sin embargo, la diversidad de factores de tipo geológico, geomorfológico, geomecánico, meteorológico, etc., que controlan los movimientos del terreno, hace que los trabajos cartográficos para establecer las zonas de inestabilidades potenciales y su posibilidad de ocurrencia sean complejos, máxime si se intenta la cuantificación y el tratamiento determinista o probabilista de los factores. La cartografía está basada en estudios de campo, apoyados con técnicas de sensores remotos, entre los que se incluyen fotografía aérea y de satélite, y en la aplicación de los sistemas de información geográfica (ver Figura 14.25 y Figura 13.3 del Capítulo 13).

Las **cartografías de peligrosidad** representan la posibilidad o probabilidad de ocurrencia de los procesos en un área determinada y para un periodo de tiempo dado, zonificando el territorio en diferentes grados. Para ello, deben ser considerados, además de los factores condicionantes, todos los posibles factores desencadenantes, tanto naturales como antrópicos. La metodología general para la realización de mapas de peligrosidad se presenta en la Figura 13.4 del Capítulo 13.

Mapas de movimientos de ladera

Los **mapas de susceptibilidad** pueden prepararse por diferentes métodos:

- **Evaluación directa** o «experta» a partir de reconocimientos y **cartografía geomorfológica** de campo; la calidad depende de la experiencia y criterios del profesional a la hora de evaluar la potencialidad de los fenómenos según los materiales y características de las laderas y de los deslizamientos presentes, que son reflejados con el mayor detalle posible que permita la escala de trabajo. Al basarse en trabajos de campo, es más frecuente en estudios locales, aunque el método puede aplicarse a escala regional.
- **Superposición de mapas de factores** condicionantes (pendientes, litologías, depósitos de materiales sueltos, etc.) con el mapa de procesos inestables, definiendo las zonas susceptibles y el

grado de susceptibilidad cualitativa por la presencia de los factores que confluyen en las zonas inestables (por ejemplo, pendientes elevadas, materiales blandos y alterados, niveles freáticos cercanos a superficie, falta de vegetación en la ladera, etc.); aplicable a escalas medias.

- **Combinación de factores**, dividiendo cada uno de ellos en varias clases y asignando un peso a cada clase (en términos cuantitativos) según su contribución a la inestabilidad, evaluada con criterios basados en los reconocimientos de campo y a partir de la distribución y densidad de las inestabilidades presentes en la zona. El área de estudio se suele dividir en celdas o polígonos, y se definen funciones matemáticas o matrices para obtener las puntuaciones finales de cada celda para diferentes combinaciones de factores, decidiendo las más representativas según el ajuste con el mapa inventario de procesos. Este método es válido en zonas con condiciones homogéneas y a escalas medias. La aplicación de **sistemas de información geográfica** permite el tratamiento automático de la información y la realización de numerosos análisis con diferentes combinaciones.
- **Métodos probabilistas**, con la misma metodología anterior pero basados en la determinación estadística de la contribución de los diferentes factores a los movimientos (a partir del análisis de los procesos en la zona) y las combinaciones entre ellos.
- **Métodos deterministas** basados en el cálculo de la estabilidad de las laderas de una zona; aplicable únicamente a gran escala (1:5.000 o mayor).

En el caso de los **mapas de peligrosidad**, la predicción temporal de ocurrencia de movimientos se puede establecer en base a (Alonso, 1987):

- Correlación directa con las lluvias.
- Medición de los movimientos.
- Medición de presiones intersticiales.

El primer método se basa en la relación entre precipitaciones y movimientos de ladera, al actuar las primeras como factor desencadenante; su validez es mayor en caso de zonas propensas a movimientos superficiales en materiales sueltos o blandos, y puede emplearse para prevención a largo plazo. Los métodos basados en la observación de movimientos implican el control y la instrumentación de las laderas inestables con la finalidad de medir los desplazamientos, obtener las relaciones tiempo-desplazamiento y predecir, en base a los movimientos registrados, el momento de la rotura (ver Figura 9.72 del Capítulo 9); son apli-

cables a gran escala y corto plazo, lo mismo que sucede con el tercer método, basado en la relación existente, en determinados casos, entre la posición del nivel freático y la ocurrencia de deslizamientos.

El principal inconveniente de la predicción temporal de movimientos de ladera es que se necesitan datos cuantitativos de los factores que desencadenan las inestabilidades en una zona determinada (registros históricos detallados, datos instrumentales). Las predicciones pueden ser válidas en deslizamientos concretos o en áreas limitadas, no siendo aplicables a grandes extensiones por su complejidad y el elevado coste de la instrumentación. Los datos obtenidos para una determinada zona no son extrapolables, por la variabilidad de las condiciones.

También pueden establecerse correlaciones entre terremotos y ocurrencia de movimientos en zonas sísmicas a partir de observaciones y datos históricos.

Mapas de hundimientos y subsidencias

La diferencia fundamental con los mapas de movimientos de ladera es que tanto los factores condicionantes como los desencadenantes son más limitados. En la cartografía de hundimientos y subsidencias, se pueden diferenciar dos casos:

- Zonas donde la ocurrencia de los procesos depende de la presencia de determinadas litologías susceptibles, como zonas kársticas o suelos blandos (independientemente de los factores desencadenantes, naturales o antrópicos).
- Zonas donde las actuaciones antrópicas (generalmente excavaciones) pueden desencadenar procesos en materiales no susceptibles a priori.

En el primer caso los **mapas de susceptibilidad** se basan, al igual que para los movimientos de ladera, en la cartografía de procesos existentes y de factores condicionantes. Así, para evaluar la potencialidad de hundimientos en zonas kársticas, los factores a considerar son la litología y el grado de karstificación, lineaciones estructurales (a favor de las cuales se desarrollan los procesos de disolución), propiedades geomecánicas de los materiales, factores hidrogeológicos y climáticos, etc., considerando también, si es el caso, factores sísmicos y antrópicos. Los karst yesíferos y salinos y los karst cubiertos son más susceptibles a los movimientos.

En el caso de susceptibilidad por subsidencia, se deberá considerar la presencia de materiales blandos compresibles, las posibles variaciones del nivel freático y aquellos otros factores, antrópicos y naturales, que puedan incidir en los movimientos. La Figu-

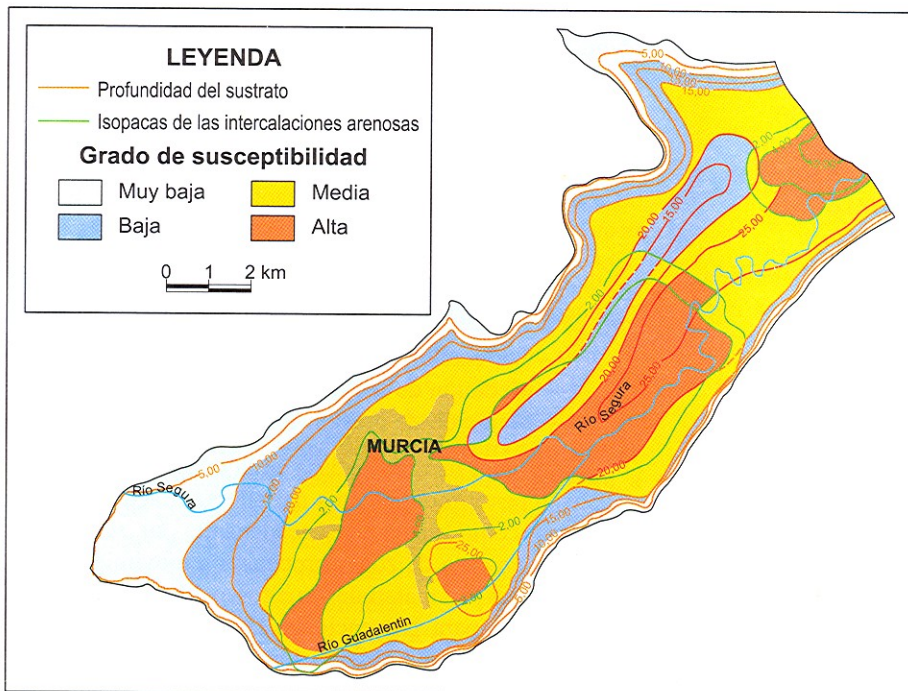


Figura 14.42 Mapa de susceptibilidad a la subsidencia de la Vega media del Segura, Murcia, por descenso del nivel freático, considerando un periodo de sequía de 2 años; la estimación se ha realizado en función de la profundidad del sustrato firme y de la intercalación de niveles arenosos entre los materiales blandos que constituyen el subsuelo (cortesía del IGME y COPOT, Región de Murcia).

ra 14.42 presenta un ejemplo de mapa de susceptibilidad a escala media.

Cuando las causas son humanas, los mapas de susceptibilidad y de peligrosidad se realizan en base a la situación de las labores mineras o excavaciones de otro tipo que pueden ser causa de inestabilidades, de-

biendo considerar también las características mecánicas de los materiales y la influencia de las variaciones del nivel freático en su comportamiento.

En ambos casos pueden realizarse mapas cuantitativos siempre que se disponga de datos, o sea posible evaluar los valores de subsidencia en una zona determinada.

Bibliografía recomendada

- Corominas, J. Ed. (1989). Estabilidad de taludes y laderas naturales. Monografía n.º 3. Soc. Esp. de Geomorfología. Zaragoza.
- Dikau, R., Brundsen, D., Schrott, L. e Ibsen, M. L., Eds. (1996). Landslide recognition. Identification, movement and causes. John Wiley & Sons.
- Schuster, R. L. y Krizek, R. J., Eds. (1988). Landslides. Analysis and control. 5th printing. Special Rep. 176. Trans. Research Board. Nat. Academy of Sciences. U.S.A.
- Turner, A. K. y Schuster, R. L., Eds. (1996). Landslides. Investigation and mitigation. Special Rep. 247. Trans. Research Board. Nat. Academy Press. U.S.A.
- Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Natural Hazard, 3. UNESCO.

Referencias bibliográficas

- Alonso, E. (1987). Riesgos geológicos asociados a las avenidas y su previsión. En: Avenidas. Sistemas de previsión y alarma. Berga, L. y Dolz, J., Eds. Colegio de Ing. de Caminos. Madrid, pp. 37-58.
- Bernal, A. (2001). Estabilidad de taludes en terremotos. El deslizamiento de las Colinas, El Salvador, en el terremoto del 13 de enero de 2001. II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. Asoc. Esp. Ing. Sísmica. Madrid.
- Casale, R. y Margottini, C., Eds. (1995). Meteorological events and natural disaster. Report on a CEC field mission in Piedmont of 4-6 november 1994. Enea-Civita Consorcio.
- Corominas, J. y García Yagüe, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada, vol. III, pp. 1051-1072.
- Corominas, J., Remondo, J., Farias, P. y otros (1996). Debris flow. En: Landslide recognition. Identification, movement and causes. Dikau, Brundsen, Schrott e Ibsen Eds. John Wiley & Sons. pp. 161-180.

- Cruden, D. M. y Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. En: Landslides. Investigation and mitigation. Turner and Schuster Eds. Special Rep. 247. Trans. Research Board. Nat. Academy Press. U.S.A. Chapter 3.
- Dikau, R., Brundsen, D., Schrott, L. e Ibsen, M. L. (1966). Introduction. En: Landslide recognition. Identification, movement and causes. Dikau, Brundsen, Schrott e Ibsen Eds. John Wiley & Sons. pp. 1-12.
- Durán, J. J. (1988). Riesgos asociados al karst. En: Riesgos geológicos. IGME. Pp. 261-279.
- EPOCH (1993). Flageolet, J. C. Ed. Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, vol. 1. Contract n.º 90.0025.
- Ferrer, M. y Ayala, F. (1996). Landslides climatic susceptibility map of Spain. En: Landslides. Proc. 8.ª Int. Conf. and Field trip on Landslides. Chacón, Irigaray y Fernández Eds. pp. 323-333.
- Ferrer, M. y Ayala, F. (1997). Relaciones entre desencadenamiento de movimientos y condiciones meteorológicas para algunos deslizamientos de España. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. I, pp. 185-198.
- Gostelow, T. P. (1991). Rainfall and landslides. En: Prevention and control of landslides and other mass movements. Commission of the European Communities. Almeida-Teixeira, Fantechi, Oliveira and Gomes Coelho Eds. Report EUR 12918 EN. Pp. 139-161.
- Hutchinson, J. N. (1983). Methods of locating slip surfaces in landslides. Bull. Assoc. Eng. Geologists. Vol. XX, n.º 3, pp. 235-252.
- Hutchinson, J. N. (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology. Proc. 5th Int. Symposium on Landslides, Lausanna. Tomo 1, pp. 3-36.
- IGME (1986). Hundimientos mineros. Madrid.
- IGME (1987). Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España. Madrid.

- IGME (1994). Meteorological factors influencing slope stability. Report European Project Meffist.
- IGME (1998). Informe sobre el deslizamiento de Benamejí. Madrid.
- Keaton, J. R. y De Graff, J. V. (1996). Surface observation and geologic mapping. En: Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board. Spec. Rep 247. Turner and Schuster Eds. Chapter 9.
- Mateos, R. (2000). Los movimientos de ladera de la Serra de Tramuntana (Mallorca). Tesis doctoral. Dpto. de Geodinámica. Universidad Complutense. Madrid.
- Moya, J., Corominas, J., Gutierrez, E. y Vilaplana, J. M. (1992). Datación de movimientos de ladera mediante la dendrocronología. III Simp. Nac. de Taludes y Laderas Inestables, La Coruña. Vol. I, pp. 27-38.
- Murk, B. W., Skinner, B. J. y Porter, S. C. (1996). Environmental geology. John Wiley and Sons.
- Rib, H. T. y Liang, T. (1988). Recognition and identification. En: Landslides. Analysis and control. 5th printing. Schuster and Krizek Eds. Special Rep. 176. Trans. Research Board. Nat. Academy of Sciences. U.S.A. Chapter 3.
- Rodríguez Ortiz, J. M (1997). La utilización de pilotes y pasadores en la corrección de deslizamientos. Teoría y aplicaciones. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. III, pp. 1013-1049.
- Schuster, R. L. (1996a). Socioeconomic significance of landslides. En: Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board. Spec. Rep 247. Turner and Schuster Eds. Chapter 2.
- Schuster, R. L. (1996b). The 25 most catastrophic landslides of the 20th century. En: Landslides. Proc. 8.^a Int. Conf. and Field trip on Landslides. Chacón, Irigaray y Fernández Eds. Pp. 53-62.
- Soeters, R. y Van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. En: Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board. Spec. Rep 247. Turner and Schuster Eds. Chapter 8.
- Sopeña, L. M. y Estaire, J. (2000). Dimensionamiento de las pantallas de contención del deslizamiento de Benamejí, Córdoba. Procc. Simp. Geotecnia e Infraestr. del Transporte, Barcelona. Soc. Esp. Mec. del Suelo e Ing. Geotécnica, pp. 649-659.
- Sowers, G. F. y Royster, D. L. (1988). Field investigation. En: Landslides. Analysis and control. 5th printing. Schuster and Krizek Eds. Special Rep. 176. Trans. Research Board. Nat. Academy of Sciences. U.S.A. Chapter 4.
- Suárez, L. y Regueiro, M., Eds. (1997). Varios autores. Guía ciudadana de los riesgos geológicos. The American Institute of Professional Geologists. Versión española. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. Madrid.
- Varnes, D. J. (1984). Landslides hazard zonation: a review of principles and practice. Natural Hazard 3. UNESCO.
- Varnes, D. J. (1988). Slope movement types and processes. En: Landslides. Analysis and control. 5th printing. Schuster and Krizek Eds. Special Rep. 176. Trans. Research Board. Nat. Academy of Sciences. U.S.A. Fifth printing. Chapter 2.
- Walsh, A. C. (1989). Ground subsidence. Blackie. Chapman and Hall.