

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera o deslizamientos (término, este último, que se utilizará genéricamente en la presente memoria) constituyen un riesgo geológico (Ayala et al., 1987) de origen natural o inducido, que debe tenerse en cuenta en la planificación del territorio, sobretodo en áreas de montaña. Sin embargo, la percepción de este tipo de procesos naturales es baja en comparación a las inundaciones, los volcanes o los terremotos. Ello se debe, en gran parte, al menor número de víctimas mortales producidas por los deslizamientos aunque no ocurre así con las pérdidas materiales causadas por ellos. Los deslizamientos, en general, tienen lugar en zonas de difícil acceso y poco pobladas lo que causa impactos a pequeña escala y de poca consideración, a excepción de algunos eventos catastróficos como el de Aberfan en el Reino Unido (Bishop et al., 1969), el del Nevado Huascarán en Perú (Plafker y Ericksen, 1979), el del Mount Sant Helens en Estados Unidos (Voigth et al., 1983) y el de Vaiont en Italia (Shuster, 1996) entre otros. Aunque también es cierto que los deslizamientos han sido una de las principales causas de daños y pérdidas de vidas humanas en algunos terremotos recientes (Kobayashi, 1981; Keefer, 1984; Plafker y Galloway, 1989; Schuster, 1996). En enero de este mismo año 2001 se produjo un gran deslizamiento provocado por un fuerte terremoto en El Salvador, que enterró una parte del barrio de Las Colinas en Santa Tecla. Además, en los últimos años, la creciente demanda de servicios como turismo y actividades deportivas en áreas de montaña, ha incrementado el uso y frecuentación de las mismas ampliando las áreas pobladas que pueden verse afectadas por deslizamientos.

La mejor estrategia para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, que precisa de la percepción de la existencia del fenómeno peligroso, de la evaluación de la peligrosidad y la adopción de medidas para mitigar los efectos (Corominas, 1992). En este sentido la primera fase en la prevención del peligro a deslizamiento es la identificación y caracterización de éste. La caracterización del peligro se expresa usualmente de forma cartográfica mediante la zonación del territorio. Los mapas resultantes (mapas de susceptibilidad y mapas de peligrosidad) son una herramienta básica para la planificación del territorio (Irigaray et al., 2000), sobre todo, en zonas montañosas.

Actualmente los Sistemas de Información Geográfica (en adelante SIG) permiten el análisis de la susceptibilidad a la rotura por deslizamiento así como la elaboración de mapas de susceptibilidad y peligrosidad de manera sistemática, rápida y eficiente. Ello ha ampliado considerablemente la posibilidad de tratar con grandes bases de datos y realizar cálculos para la estimación de la susceptibilidad que eran inviables en grandes áreas. En este sentido, la posibilidad de regionalizar los análisis de susceptibilidad se ha visto enormemente facilitada con el uso de los SIG.

El presente capítulo pretende introducir los conceptos básicos relativos a los deslizamientos, así como los métodos utilizados para la estimación de la susceptibilidad, la peligrosidad, la confección de mapas y la integración de todo ello en un SIG.

1.1. Los deslizamientos y su clasificación

Sharpe en 1938 definió los deslizamientos como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas. Según Crozier (1986) un deslizamiento se define como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierras o rocas sin la ayuda del agua como agente de transporte. A pesar que el término deslizamiento se utiliza para movimientos de ladera que se producen a lo largo de una superficie de rotura bien definida, en la presente memoria se utilizará de forma genérica para cualquier tipo de rotura de ladera.

Existen varias clasificaciones de deslizamientos, basadas todas ellas en el mecanismo de rotura y la naturaleza de los materiales involucrados (Varnes, 1984; Hutchinson, 1988; WP/WLI, 1993; Cruden y Varnes, 1996). La clasificación utilizada aquí es la propuesta por Corominas y García (1997) basada en las anteriores exceptuando lo que los autores definen como deformaciones sin rotura o previas a ésta (tabla 1). El criterio básico que permite separar los distintos tipos de deslizamientos en la mayoría de las clasificaciones son los mecanismos de rotura. Se pueden encontrar cinco mecanismos principales (figura 1.1) (Corominas, 1989a):

- Desprendimientos o caídas
- Vuelcos
- Deslizamientos como término concreto
- Expansiones laterales y
- Flujos

Según Corominas y García (1997) existe un último grupo (en cuanto a mecanismo se refiere) que son las deformaciones sin roturas o previas a la rotura de las laderas y los movimientos complejos.

Un desprendimiento es aquel movimiento de una porción de suelo o roca, en forma de bloques aislados o masivamente que, en una gran parte de su trayectoria desciende por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodaduras (Corominas, 1989a). Los vuelcos son movimientos de rotación hacia el exterior, de una unidad o de un conjunto de bloques, alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida. Los deslizamientos son movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o que pueden ser inferidas razonablemente o bien corresponder a una franja relativamente estrecha. Se considera que la masa movilizada se desplaza como un bloque único, y según la trayectoria descrita los deslizamientos pueden ser rotacionales o traslacionales. El movimiento dominante en las expansiones laterales es la extrusión plástica lateral, acomodada por fracturas de cizalla o de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización. Finalmente los flujos son movimientos de una masa desorganizada o mezclada donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas. Debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas (Corominas, 1989a).

El término deslizamiento superficial se aplicará en la presente memoria a aquellos deslizamientos cuya superficie de rotura se sitúa a una profundidad media de 1 a 2 metros,

TIPO DE MECANISMO	SUBTIPO	TIPO DE DESLIZAMIENTO	(INGLÉS)
Movimientos donde predomina la trayectoria vertical		Desprendimientos o caídas	Falls
Movimientos de giro de bloques determinados por la fracturación en escarpes		Vuelcos	Topples
Movimientos de grandes bloques al iniciarse la rotura	Superficies de desplazamientos planas o asimilables a ellas	Resbalamientos o deslizamientos Desplazamientos concordantes Desplazamientos discordantes	Slides
	Desplazamientos sobre superficies curvadas	Deslizamiento rotacional	Rotational slides
Movimientos de una masa desorganizada	Flujos	Reptación	Creep
		Coladas de tierra	Earthflows
		Soliflucción	Solifluction
		Corrientes de derrubios	Debris flows
		Golpes de arena y limo	Sand and silt flows
		Flujos de roca	Rock flows
		Avalanchas	Avalanches
Movimientos con extrusión plástica lateral		Expansión lateral	Lateral spreading
Otros movimientos	Deformaciones sin rotura o previas a la rotura	Reptación por fluencia	Flexural toppling Cambering Bulging Sagging Confined failure
		Cabeceo de estratos	
		Combadura	
		Pandeo en valle	
		Deformaciones gravitacionales profundas	
		Rotura confinada	
	Movimientos complejos	Colapso de volcanes Flujos deslizantes	Flow slides

Tabla 1.1: Clasificación simplificada de los movimientos de ladera modificada de Corominas y García (1997) con la terminología en inglés.

afectando la formación superficial o la parte alterada del sustrato. El término se utiliza aquí de forma genérica y comprende diversos tipos de movimientos de ladera (coladas de tierra, deslizamientos y corrientes de derrubios).

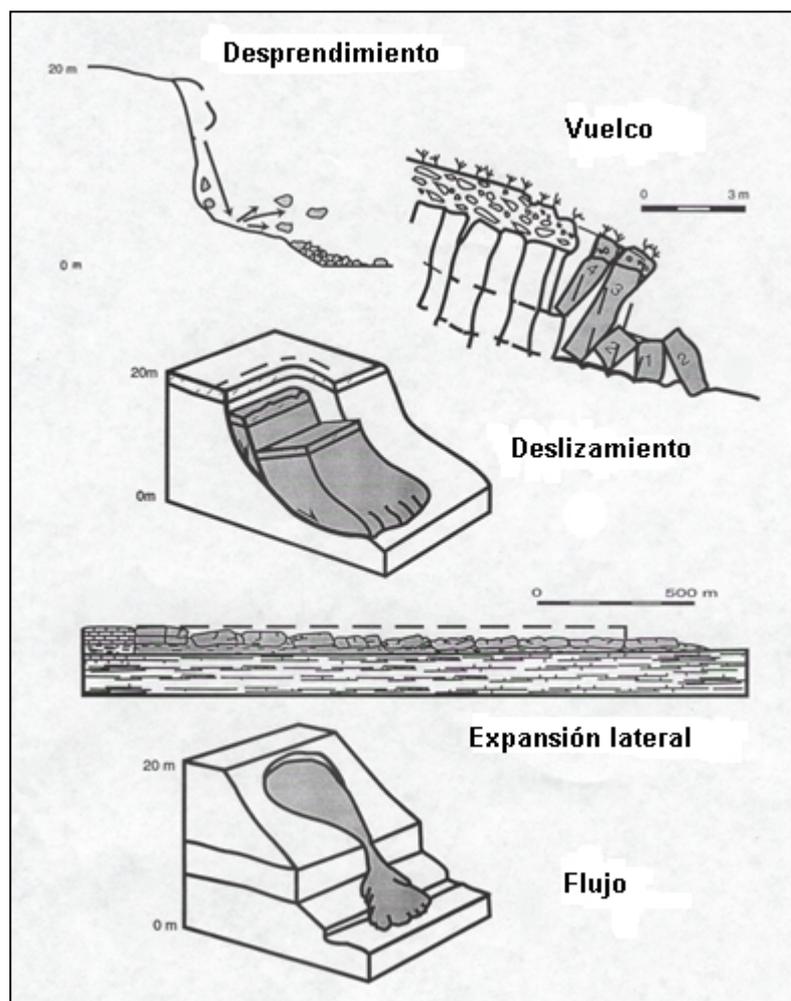


Figura 1.1: Mecanismos principales de roturas de deslizamientos.

1.2. Factores que afectan la estabilidad del terreno.

La estabilidad de las laderas está condicionada por la acción simultánea de una serie de factores. Desde un punto de vista físico los deslizamientos se producen como consecuencia de los desequilibrios existentes entre las fuerzas que actúan sobre un volumen de terreno. Los factores que influyen en la estabilidad de las laderas se pueden separar en dos grandes grupos (Ferrer, 1987): factores internos y externos.

Los factores internos condicionan las diferentes tipologías de deslizamiento, los mecanismos y modelos de rotura. Dentro de ellos encontramos *características intrínsecas* relativas a las propiedades del material y a su resistencia y las *características extrínsecas* no relacionadas con el material y sí con la morfología de la ladera y condiciones ambientales de ésta. Las primeras incluyen parámetros como la litología, textura (granulometría, cementación), consolidación y espesor de los materiales y parámetros estructurales relativos a

planos de estratificación y de debilidad (diaclasas, fallas y fracturas). En las características extrínsecas podemos encontrar las morfológicas como la pendiente de la ladera y su disposición respecto a discontinuidades geológicas y la orientación (relacionada con la humedad del terreno), y factores de tipo ambiental como cambios estacionales de temperatura y tipo y cambios en la vegetación. La pendiente del terreno así como la morfología propia de la ladera es un factor y condicionante previo a partir del cual el resto de factores se combinarán influyendo en la estabilidad.

Los factores externos actúan sobre el material y dan lugar a modificaciones en las condiciones iniciales de las laderas, provocando o desencadenando las roturas debido a las variaciones que ejercen en el estado de equilibrio de aquéllas. Tres tipos de acciones se incluyen aquí: la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones y las modificaciones antrópicas. La *infiltración de agua* provoca el aumento de la presión intersticial disminuyendo la resistencia de los materiales. La relación entre ocurrencia de deslizamientos y períodos lluviosos o de deshielo es bien conocida. Las variaciones del nivel de agua subterránea pueden ser debidas a intensas precipitaciones o épocas de deshielo, intervenciones humanas, etc. Las *vibraciones*, por otra parte, provocan aceleraciones en el terreno favoreciendo la rotura y la licuefacción. Éstas pueden ser debidas a movimientos sísmicos naturales o inducidos por el hombre como explosiones mineras o por obras públicas. La sacudida debida a terremotos naturales es una de los principales agentes que generan deslizamientos siendo capaces, en el caso de los terremotos más grandes, de desencadenar miles de deslizamientos a lo largo de áreas de más de 100.000 km² (Keefer, 1984). Finalmente, las *actividades humanas* alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación, explotaciones mineras y construcciones de presas. Asimismo los cambios en el recubrimiento vegetal como la tala de bosques, la repoblación con especies alóctonas, incendios forestales y otros también influyen en la estabilidad de las laderas.

Aunque no se puede incluir como factor, existe un parámetro fundamental a tener en cuenta en la estabilidad, y que determina el factor de seguridad en los taludes: el tiempo. Éste influye sobre aspectos como la geometría del talud, la resistencia del material y la oscilación de los niveles piezométricos (Alonso, 1986). Su influencia se observa en la distinción entre estabilidad a corto, medio y largo plazo. Un ejemplo de ello es la degradación progresiva de la resistencia de algunos materiales que provoca inestabilidad a medio y largo plazo. Algunos de los factores definidos anteriormente cambian con el tiempo.

1.3. Actividad y peligrosidad de los deslizamientos. Conceptos básicos.

Atendiendo al estado de actividad en que se encuentra un deslizamiento se pueden definir los siguientes términos (WP/WLI, 1993) representados en la figura 1.2:

- 1) Deslizamiento activo es el que se está moviendo en el momento de la observación.
- 2) Deslizamiento en suspenso es el que se ha movido en los últimos 12 meses, pero actualmente no es activo.
- 3) Deslizamiento reactivado es un deslizamiento activo que previamente ha sido inactivo (se conoce por reactivaciones de un deslizamiento).
- 4) Deslizamiento inactivo es aquel que no se ha movido en los últimos 12 meses. Los inactivos se pueden subdividir en los siguientes estados:

- 5) Deslizamiento latente (conocido como *dormant* en inglés) es un movimiento inactivo que se puede reactivar por las causas que lo originaron.
- 6) Deslizamiento antiguo es un deslizamiento inactivo que no ha vuelto a ser afectado por sus causas originales.
- 7) Un deslizamiento estabilizado es aquel inactivo en el que se han adoptado medidas correctoras.
- 8) Deslizamiento relicto es aquel inactivo que se desarrolló bajo condiciones climáticas o geomorfológicas considerablemente diferentes de las que prevalecen actualmente.

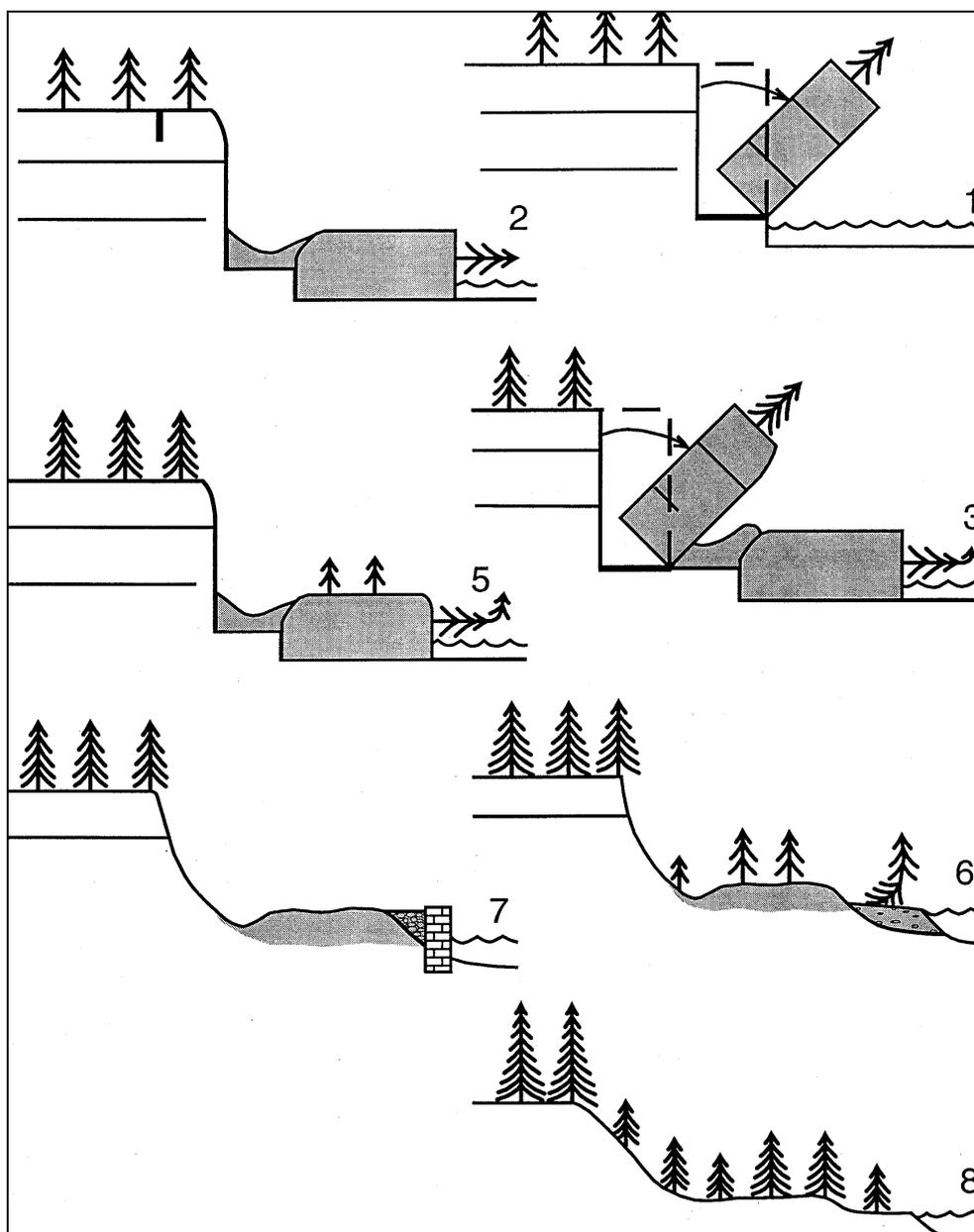


Figura 1.2: Estados de actividad de los deslizamientos (WP/WLI, 1993). Consultar el texto para la leyenda de los 8 casos.

Los términos más utilizados sobre la actividad de un deslizamiento son activo, latente y relicto cuando se recoge información en el campo en forma de listado. Aparte de estos términos también se utilizan las expresiones de las primeras roturas de un deslizamiento,

refiriéndose a sus estados iniciales y cuando se produce por primera vez, y de reactivaciones cuando el deslizamiento que estaba parado vuelve a moverse.

Como ya se ha comentado los deslizamientos son procesos naturales que conllevan un riesgo geológico nada despreciable. Aunque el peligro de producir roturas en un lugar sea muy alto, el riesgo no lo será si ello no produce daños en la población o en las infraestructuras. El riesgo trae consigo la existencia de un peligro, pero un fenómeno peligroso no conduce necesariamente a un riesgo para la población. Los siguientes conceptos basados en Varnes (1984) definen bien la relación entre peligrosidad y riesgo.

La peligrosidad (P) es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente perjudicial dentro de un período de tiempo determinado y en un área específica.

La vulnerabilidad (V) es el grado de pérdida provocado por la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada sobre un elemento o conjunto de elementos.

El riesgo específico (Rs) es el grado de pérdida esperado debido a un fenómeno natural y se expresa como el producto de P por V. Los elementos bajo riesgo (E) de un área son la población, las propiedades, etc.

Finalmente el riesgo total (Rt) corresponde al número de vidas perdidas, daños a la propiedad y a las personas, etc. debidas a un fenómeno natural concreto. El riesgo total se define como el producto del riesgo específico y de los elementos bajo riesgo como se observa en la siguiente expresión:

$$R_t = E * R_s = E * (P * V)$$

El primer paso en la evaluación del riesgo consiste en la estimación de la peligrosidad a roturas de laderas y ésta, a su vez, se evalúa determinando los siguientes aspectos (Varnes, 1984; Corominas, 1987; Hartlén y Viberg, 1988):

- Evaluar la susceptibilidad de la ladera a las roturas por deslizamientos
- Determinar el comportamiento del deslizamiento (movilidad y dimensiones del mismo)
- Establecer la potencialidad del fenómeno (probabilidad de ocurrencia).

El término susceptibilidad hace referencia a la predisposición del terreno a la ocurrencia de deslizamientos y no implica el aspecto temporal del fenómeno. La mayor parte de estudios de peligrosidad evalúan únicamente la susceptibilidad a la rotura, siendo pocos los que estudian el peligro de alcance por deslizamientos (segunda cuestión) y reduciéndose aún más los que establecen la potencialidad. El siguiente apartado pretende dar una visión sobre los aspectos a tener en cuenta en la evaluación de la peligrosidad.

1.4. Estimación de la peligrosidad.

La peligrosidad en una ladera es la probabilidad de ocurrencia de una rotura de determinada magnitud. El análisis de la peligrosidad permite la confección de mapas de peligrosidad que expresan cartográficamente los resultados del análisis. El primer paso consiste en la obtención y tratamiento de los parámetros que se van a utilizar (normalmente

factores que se relacionan con la estabilidad), para estimar la peligrosidad. En un segundo paso se estima la contribución relativa de estos factores en la generación de deslizamientos para, finalmente, clasificar el territorio en áreas con distinto grado de peligro.

Aunque existen diversas técnicas de estimación de la peligrosidad, todas ellas se basan en el principio del actualismo. El principio expresado según Varnes (1984) afirma que “el estudio del pasado y del presente es la clave de lo que puede ocurrir en el futuro”. En referencia a los deslizamientos significa que las roturas que pueden ocurrir en un futuro es probable que lo hagan en las mismas condiciones que las de los deslizamientos antiguos o actuales. El principio se aplica al estudio de los deslizamientos siempre y cuando las condiciones geológicas, geomórficas e hidrológicas no varíen.

En los siguiente párrafos se comentan los tres elementos que permiten evaluar la peligrosidad.

1.4.1. Localización de áreas potencialmente inestables (evaluación de la susceptibilidad).

Para identificar áreas potencialmente inestables existen diversos métodos que se pueden agrupar en (Corominas, 1987, 1992):

- Instrumentación de la ladera
- Técnicas de reconocimiento geomorfológico de deslizamientos previos
- Índices morfológicos de inestabilidad
- Índices de potencialidad mediante tratamiento de datos

La instrumentación de la ladera es el mejor método para controlar la existencia de deslizamientos. Se puede controlar la superficie mediante técnicas topográficas o bien se puede instrumentar la ladera en profundidad para obtener información sobre la superficie de deslizamiento, el volumen movilizado y la posición del nivel freático (Gili, 1989). Este método es muy costoso y sólo se aplica en laderas en las que se estudia en profundidad algún deslizamiento.

El reconocimiento geomorfológico de deslizamientos previos muestra que las áreas con deslizamientos anteriores son las más susceptibles (Kojan et al., 1972). El reconocimiento se realiza mediante el estudio de las formas del relieve (formas de erosión y de deposición y elementos del modelado), las características de los depósitos deslizados y con indicadores de actividad como la vegetación, daños en infraestructuras, etc. (Corominas, 1986). Con todo, la identificación de deslizamientos previos, sobre todo si son antiguos y de grandes dimensiones, no es inmediata y se han observado confusiones de zonas deslizadas en mapas geomorfológicos y de riesgo (Antoine, 1977).

Mediante los índices morfológicos de inestabilidad se evalúa la inestabilidad potencial de las laderas por analogía con otras de la misma litología y entorno geográfico. Diversos ejemplos son la topografía cóncava (Reneu y Dietrich, 1987) que favorece la acumulación de coluviones en hondonadas que concentran el flujo subsuperficial, favoreciendo la formación de corrientes de derrubios; las pendientes umbral o críticas, por encima de las cuales se producía la rotura (Skempton, 1952; Colin-Rouse y Farhan, 1976); envolventes que, para alturas determinadas, incluyen los ángulos que permiten mantener los taludes estables (Crozier, 1984), etc. También se ha relacionado la superficie de cuenca superficial con la

susceptibilidad de rotura de una ladera mediante las características topográficas, derivándose algunos índices críticos, como el de Hatano y Okimura (Oyagi, 1984) que permiten separar laderas caídas de las no caídas. Ogawa y Kawamura (1989) propusieron un método de predicción de deslizamientos introduciendo un índice topográfico global para evaluar la influencia de la escorrentía subterránea. Jackson et al. (1987) utilizaron datos morfométricos relativos a superficies de conos de deyección, pendiente media de los mismos y área y desnivel de la cuenca de drenaje para discriminar entre conos construidos por corrientes de derrubios y conos debidos a torrentes.

Finalmente, las técnicas de tratamiento de datos permiten estimar la susceptibilidad a los deslizamientos evaluando la participación de un conjunto de distintos factores asociados a la estabilidad y la contribución relativa de cada uno de ellos. El resultado final es un índice de potencialidad indicando la susceptibilidad a la rotura. Existen varios métodos que se han aplicado a los deslizamientos (Stevenson, 1977; Neuland, 1976; etc.). Una de las técnicas más utilizadas es el análisis estadístico multivariante (Jones et al., 1961; Carrara, 1983; Baeza, 1994) basado en la regresión múltiple y en el análisis discriminante como técnicas estadísticas más utilizadas.

A parte de estos criterios, y situándose casi exclusivamente dentro de las técnicas de tratamientos de datos citadas, se encuentran los métodos utilizados de estimación de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos, que son el paso previo a la confección de mapas de susceptibilidad. Existen diversas clasificaciones de éstos métodos y por su importancia en la presente memoria se dedicará un apartado posterior.

1.4.2. Estimación del alcance y comportamiento del deslizamiento.

El tipo de deslizamiento, su tamaño y su movilidad son aspectos fundamentales para estimar la peligrosidad. No todos los mecanismos de rotura deben interpretarse como fenómenos catastróficos. La reptación, por ejemplo, con su baja velocidad limita el nivel de daños (Corominas, 1987), mientras que deslizamientos como pequeñas avalanchas de derrubios pueden causar enormes daños (Corominas y Alonso, 1984). El alcance de los deslizamientos se puede estimar mediante dos clases de aproximaciones (Corominas, 1992):

- Métodos empíricos
- Modelos numéricos

Los métodos empíricos se basan en relaciones observadas entre el volumen del movimiento y su alcance. Diversos autores han encontrado estas relaciones en grandes deslizamientos (Hsü, 1975), en acantilados de creta de las costas británicas y en flujos deslizantes de escombreras de minas de carbón (Hutchinson, 1988) y en deslizamientos superficiales y desprendimientos (Corominas et al., 1988; Corominas et al., 1990).

Los modelos numéricos se basan en la simulación de la trayectoria de los deslizamientos de tipo desprendimiento y de las corrientes de derrubios. Los modelos se desarrollan con ordenador mediante modelos numéricos de 2D (López, 1982; Gili y Guitierrez, 1992; Luo et al., 2000) y en 3D (Rochet, 1987; Deangeli y Grasso, 1996).

1.4.3. Potencialidad del fenómeno.

La predicción temporal de la ocurrencia de una rotura en una ladera es el aspecto más difícil de definir en la evaluación de la peligrosidad a deslizamientos. Para intentar acotar el momento de la rotura existen diversas aproximaciones que se pueden agrupar en cuatro grandes grupos (Alonso, 1987; Corominas, 1992):

- Métodos basados en la observación de movimientos.
- Métodos basados en la observación de las presiones intersticiales.
- Métodos empíricos indirectos.
- Métodos probabilísticos.

Los métodos basados en la observación de movimientos se basan en la constatación que tanto en suelos como en rocas la rotura suele estar precedida por deformaciones (Skempton, 1964). Analizando las deformaciones algunos autores han desarrollado modelos de rotura (funciones) que proporcionan una predicción temporal (Voight y Kennedy, 1979), o bien establecer la relación entre la velocidad de deformación y el tiempo (Rat, 1988). Otros han analizado curvas de fluencia para determinar de forma matemática la deformación que lleva a la rotura (Saito, 1965, 1969; Fukuzono y Terashima, 1985; Voight, 1989).

Los métodos basados en la observación de presiones intersticiales correlacionan la profundidad del nivel freático con el coeficiente de seguridad del talud, puesto que existe una relación directa entre la posición del nivel freático y los desplazamientos de una ladera. Son métodos útiles en taludes de pequeñas dimensiones e instrumentados para predecir a corto plazo. No son útiles en grandes extensiones de territorio para la predicción a largo plazo.

Los métodos empíricos indirectos correlacionan los deslizamientos ocurridos en un área con los factores desencadenantes. Entre ellos destaca los que correlacionan los deslizamientos con los episodios de lluvias conocidas (Onodera et al., 1974; Lumb, 1975; Caine, 1980, etc). Romana (1992) propuso unos umbrales para la formación de deslizamientos basados en lluvia recogida en 24 horas para diversas zonas climáticas en la península ibérica. Moya y Corominas (1997) y Corominas y Moya (1999) han encontrado los umbrales de lluvia necesarios para desencadenar deslizamientos superficiales y reactivar grandes deslizamientos en los Pirineos Orientales. Cabe tener en cuenta que los umbrales tienen carácter local y no se pueden extrapolar a otras zonas. Otros autores correlacionan los deslizamientos con otros factores como el área de la cuenca vertiente y la pendiente de la ladera (Oyagi, 1984).

Por último los métodos probabilísticos intentan determinar la recurrencia de los deslizamientos mediante información que ha quedado registrada. En este sentido técnicas como la datación con radiocarbono (Corominas et al., 1992), liquenometría (Innes, 1983) y dendrocronología se utilizan para obtener series largas de deslizamientos. Los daños observados en los árboles causados por desprendimientos y corrientes de derrubios también se han utilizado para completar series (Hupp, 1983; Braam et al., 1987; Moya et al., 1992). Al utilizar estas técnicas hay que tener en cuenta que no todos los eventos de deslizamiento tienen porque quedar reflejados en los árboles.

1.5. Confección de mapas de peligrosidad

Como ya se ha comentado la mayoría de los estudios para evaluar la peligrosidad a los deslizamientos en realidad se limitan a estimar la susceptibilidad a la rotura de una ladera, siendo muy pocos los que llegan a estimar el alcance y la recurrencia, aspectos que también forman parte de la peligrosidad. Los resultados de esta evaluación, a menudo se expresan en forma cartográfica, resultando en mapas de peligrosidad (o en su caso de susceptibilidad), mediante la zonificación del territorio. Ésta divide el terreno en áreas homogéneas según rangos de peligrosidad (o susceptibilidad) actual o potencial causadas por deslizamientos (Varnes, 1984).

Según Corominas (1987, 1992) los diversos métodos de zonación y cartografía de la peligrosidad a la rotura por deslizamientos se pueden clasificar en cuatro grupos:

- Mapas con base geomorfológica
- Mapas basados en la susceptibilidad relativa
- Mapas obtenidos mediante técnicas de tratamiento de datos
- Mapas obtenidos a partir de datos instrumentales

1.5.1. Mapas con base geomorfológica

Dentro de los mapas con base geomorfológica encontramos la zonación basada en inventarios de deslizamientos y los mapas geomorfológicos. Los primeros se basan en un índice de susceptibilidad que viene indicado por la presencia o ausencia de deslizamientos en el terreno. Se obtienen mediante fotointerpretación y un mínimo reconocimiento de campo y son los mapas base a partir de los cuales se realizan estudios más detallados sobre la peligrosidad. Los segundos son mapas más elaborados donde la zonación de la peligrosidad precisa trabajo adicional para la transformación del mapa geomorfológico en mapa de peligrosidad. Éstos precisan un conocimiento profundo de la morfología del relieve así como una buena interpretación de las formas del paisaje y procesos asociados a ellas. Ejemplos españoles de mapas de inventario los encontramos en Macau (1983) y Clotet y Gallart (1984).

La principal limitación de estos mapas radica en el grado de subjetividad en su realización, mientras que la principal ventaja del método es la rapidez de estimación de la susceptibilidad por parte de un experto (Carrara, 1984; Corominas, 1987).

1.5.2. Mapas basados en la susceptibilidad relativa

Los mapas basados en la combinación de factores estiman la susceptibilidad relativa según una ponderación definida por el autor para cada factor, en base a su contribución respecto a la estabilidad de ladera. Normalmente los distintos factores se cartografían en mapas temáticos separados que luego se combinarán para obtener el mapa de susceptibilidad. El principal inconveniente de estos mapas es el grado de subjetividad que se introduce cuando se seleccionan y se ponderan los factores que contribuyen a la inestabilidad de las laderas y el coste en tiempo y dinero para la adquisición de los datos necesarios (Carrara, 1984). La ventaja principal es que se puede automatizar la recogida y posterior análisis de los

datos mediante un SIG. Diversos autores han utilizado este método (Brabb et al., 1972; Nilsen et al., 1979; Chacón et al., 1992; Irigaray, 1995; etc.).

1.5.3. Mapas obtenidos mediante técnicas de tratamiento de datos

Cuando se puede disponer de un número suficiente de datos se pueden utilizar tanto métodos estadísticos como métodos probabilísticos para estimar la peligrosidad y su posterior zonación. Con estos métodos se evalúa la influencia de cada factor en la estabilidad. La principal ventaja es la objetividad del método puesto que los resultados pueden ser repetidos por distintos autores y compararse. El principal inconveniente estriba en que los resultados normalmente sólo son aplicables a la zona de donde se han extraído las funciones estadísticas que son las que determinan la contribución de cada factor en la estabilidad. Las técnicas estadísticas más comunmente utilizadas son las técnicas multivariantes, y en ellas el análisis discriminante y la regresión múltiple. Algunos de los autores que han utilizado las técnicas discriminantes son Jones et al. (1961), Carrara (1983), Carrara et al. (1995) y Baeza (1994). Ejemplos de regresión múltiple se encuentran en Irigaray (1995).

1.5.4. Mapas obtenidos a partir de datos instrumentales

Estos mapas escasean debido a al elevado coste que comporta su elaboración. A pesar de ello, si la calidad de la información es buena, permiten establecer modelos de comportamiento del deslizamiento bastante exactos. Se utilizan en áreas pobladas donde se requiere un análisis preciso de la estabilidad de la ladera. Mediante métodos de control de la deformación se detectan las zonas en movimiento y se calcula la velocidad de desplazamiento.

1.6. Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos

Como ya se ha comentado, para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos existen diversas aproximaciones basadas la mayor parte de ellas en la determinación de los factores que influyen en la aparición de las roturas. En general, estos factores se combinan para definir los distintos grados de susceptibilidad, expresándose los resultados de forma cartográfica mediante los mapas de susceptibilidad.

La clasificación de los métodos empleados para evaluar la susceptibilidad a la rotura de una ladera así como para la realización de mapas, varían según los autores (Hansen, 1984; Hartlén y Viberg, 1988; Corominas, 1987 y 1992; Van Westen, 1993 y 1994; Carrara et al., 1995; y Leroi, 1996). La clasificación y la descripción de los procedimientos expuesta aquí se basa en una adaptación de las anteriores.

Existen cuatro principales procedimientos utilizados en la evaluación y confección de mapas de susceptibilidad del terreno a producir roturas de las laderas (en adelante, mapas de susceptibilidad): métodos determinísticos, heurísticos, probabilísticos y métodos geomorfológicos.

Los **métodos determinísticos** se utilizan para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud concreto. Se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos teniendo, pues, una base física, lo que es de una gran ventaja respecto a otros métodos. Los datos de entrada son derivados de ensayos de laboratorio y se utilizan para determinar el factor de seguridad de la ladera. Estos métodos muestran un grado de fiabilidad alto en el caso en que los datos utilizados sean correctos. Su principal inconveniente es su baja idoneidad para zonificaciones rápidas y áreas extensas – regionalización- (Van Westen, 1993).

Los **métodos heurísticos** se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área objeto de investigación. Los factores son ordenados y ponderados según su importancia asumida o esperada en la formación de deslizamientos (Carrara et al., 1995). El principal inconveniente radica en que en la mayor parte de los casos, el conocimiento disponible entre los factores ambientales que pueden causar inestabilidad y los deslizamientos es inadecuado y subjetivo, dependiendo de la experiencia del experto.

Las **aproximaciones probabilísticas** se basan en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución de deslizamientos actual y pasada (Carrara et al., 1995). Se utilizan cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, aplicándose los modelos estadísticos que pueden ser univariantes y multivariantes. La principal ventaja es la objetividad del método. La potencia de los métodos estadísticos depende directamente de la calidad y cantidad de los datos adquiridos. El coste de la adquisición de algunos factores relacionados con la inestabilidad de laderas es el principal inconveniente.

Los **métodos geomorfológicos** se basan en la determinación de condiciones de inestabilidad de ladera mediante técnicas geomorfológicas, cartografía y zonificación. La principal ventaja es la validez y detalle del análisis y mapa resultantes, en el caso de estar realizados por un buen experto. El inconveniente de estos métodos es el alto grado de subjetividad dependiente de la experiencia del autor.

1.6.1. Métodos determinísticos

Los métodos determinísticos utilizan análisis mecánicos y modelos de estabilidad con base física para determinar el factor de seguridad de una ladera concreta. Son métodos muy fiables y precisos cuando se dispone de datos válidos sobre los parámetros resistentes de la ladera. Permiten el análisis no sólo de la susceptibilidad a la rotura, sino también del alcance (como los modelos de caídas de bloques) y de la frecuencia del fenómeno. Existe una amplia variedad de métodos determinísticos disponibles para realizar análisis de estabilidad, desde análisis de talud infinito en su caso más simple hasta modelos complejos tridimensionales (Graham, 1984). El método más usual se aplica para deslizamientos traslacionales utilizando el modelo de talud infinito (Ward et al, 1982; Brass et al, 1989; Murphy y Vita-Finzi, 1991). Estos métodos generalmente requieren el uso de modelos de simulación del agua subterránea (Okimura y Kawatani, 1986). A veces se utilizan métodos estocásticos para seleccionar los parámetros de entrada (Mulder y Van Asch, 1988; Mulder, 1991; Hammond et al, 1992).

Aunque los métodos determinísticos son más adecuados para evaluar la inestabilidad en áreas pequeñas (una única ladera), se han utilizado en análisis de susceptibilidad para grandes áreas (regionalización) con el objetivo de discriminar zonas con parámetros de seguridad significativamente distintos (Van Westen, 1993; Van Westen y Terlien, 1996; Luzi y Pergalani, 1996; Leroi, 1996). El análisis se puede llevar a término en distintas condiciones

(Luzi, 1995): *estáticas*, considerando la estabilidad del deslizamiento sin introducir fuerzas dinámicas externas; *pseudoestáticas*, evaluando la entidad de la mínima fuerza dinámica externa que podría desencadenar el deslizamiento y *condiciones dinámicas*, en donde se introduce una fuerza dinámica externa comparable a un terremoto.

1.6.2. Modelos heurísticos

Los métodos heurísticos se basan en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de deslizamientos (Brabb et al., 1972; Nilsen et al., 1979; Anbalagan, 1992). Son métodos conocidos como indirectos, los resultados de los cuales se pueden extrapolar a zonas sin deslizamientos con una combinación de factores similar. Un procedimiento de este tipo es el análisis cualitativo basado en combinación de mapas de factores (Lucini, 1973; Stevenson, 1977; Bosi, 1984). Cada uno de estos factores forma un mapa que se combinará con los demás para la obtención del mapa final de zonificación de inestabilidad. El inconveniente de este método bastante popularizado recae en la ponderación exacta de los distintos factores, dado que a menudo, se basa en un conocimiento insuficiente en el campo de los factores importantes para definir la estabilidad. Estos métodos permiten la regionalización o estudio a escala regional y son adecuados para aplicaciones en el campo de los sistemas expertos (Carrara et al., 1995).

El análisis heurístico introduce un grado de subjetividad que imposibilita el comparar documentos producidos por diferentes autores.

1.6.3. Métodos probabilísticos

Dentro de este grupo se encuentran los métodos estadísticos y el análisis de frecuencia de deslizamientos. Son métodos indirectos cuyos resultados se pueden extrapolar a zonas distintas de las utilizadas para estimar la susceptibilidad, con condiciones geológicas y climáticas homogéneas. Estas aproximaciones permiten regionalizar los resultados.

Los métodos estadísticos univariantes se dividen en 2 grupos: los que utilizan el análisis condicional y los que no lo utilizan. El análisis condicional trata de evaluar la relación probabilística entre diversos factores relevantes para las condiciones de inestabilidad y las ocurrencias de deslizamientos. Se basan en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de deslizamientos, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de deslizamientos. Como resultado de la combinación de todos los factores se obtiene un mapa de polígonos de características homogéneas conocidas como unidades de condición única. Para integrar y combinar toda la información se utiliza la técnica de las funciones de favorabilidad (Chung y Fabbri, 1993; Chung y Leclerc, 1994). Con ellas se realiza una transformación de cada clase continua o discreta para cada factor estudiado asignándole un valor entre 0 y 1. Posteriormente, estos factores transformados se combinan entre ellos mediante reglas de integración y sus resultados se interpretan en términos de probabilidad según el teorema de Bayes (Morgan, 1968; Chung y Leclerc, 1994), certeza o *certainty factor* (Heckerman, 1986; Luzi y Fabbri, 1995), según conjuntos difusos – *fuzzy sets*- (Zadeh, 1965, 1978; Mahdaviifar, 2000) o según plausibilidad –*Dempster-Shafer function*- (Shafer, 1976).

Otros modelos estadísticos no basados en las funciones de favorabilidad son el modelo basado en la combinación de tres factores en Brabb et al. (1972) considerado como el primer análisis cuantitativo de susceptibilidad a deslizamientos y su modificado (Irigaray,

1990), el modelo del valor de información –*information value*– (Yin y Yan, 1988; Kobashi y Suzuki, 1991; Irigaray, 1995), el modelo de mensaje lógico –*logical message model*– (Runqiu y Yuangua, 1992) y el modelo probabilístico (Gonzalez, 1992; Sabto, 1991) según van Westen (1993), así como el método de la matriz (Degraff y Romesburg 1980; Irigaray, 1995; Fernández et al., 1997; Irigaray et al., 1999).

Los métodos estadísticos multivariantes estudian la interacción y dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente en la ocurrencia de deslizamientos, para establecer la implicación que tienen cada uno de ellos. Se trata de una aproximación más objetiva que otras técnicas situándose hoy como uno de los procedimientos con mejores resultados en la predicción espacial de los deslizamientos. Las técnicas estadísticas más utilizadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante (Jones et al., 1961; Neuland, 1976; Carrara, 1983 a y b; Mulder, 1991; Mora y Vahrson, 1994; Baeza, 1994; Irigaray, 1995; Chung et al., 1995; Dhakal et al., 2000). El resultado de ambos métodos son funciones basadas en la combinación lineal de los factores de mayor significación estadística para definir las condiciones de inestabilidad, estando basadas en la presencia / ausencia de deslizamientos. El análisis discriminante permite separar varias poblaciones de una misma muestra caracterizadas por las mismas variables a partir de la función discriminante. Ésta es una combinación lineal de las variables independientes que refleja el distinto comportamiento de los individuos dentro de la muestra. La regresión múltiple, por su parte, considera una única población y varios grupos de variables, siendo útil cuando se buscan relaciones explicativas entre diversas variables. El método determina la influencia de un grupo de variables independientes sobre una o más variables dependientes (Baeza, 1994).

Según la obtención y localización de los datos a tratar existen dos métodos de análisis multivariantes (van Westen, 1993):

- a) Análisis estadístico utilizando una población de laderas cuyos atributos son recogidos y asociados a deslizamientos individuales (Neuland, 1976; Carrara et al., 1977b; Lessing et al 1983; Corominas et al., 1992; Othman et al 1992; Baeza, 1994).
- b) Análisis estadísticos realizados en unidades de terreno que cubren el área entera de estudio. Para cada unidad se recogen los datos de un número de factores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y morfométricos y se analizan utilizando regresión múltiple o análisis discriminante (Carrara et al., 1978, 1990, 1991; Carrara, 1983, 1988, 1992).

Por último, el análisis de frecuencia de deslizamientos (van Westen, 1993) evalúa la peligrosidad a los deslizamientos, a diferencia de los comentados anteriormente, que suelen utilizarse para evaluar la susceptibilidad. La valoración de la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un cierto lugar y dentro de un periodo de tiempo sólo es posible cuando se puede hallar la relación entre la ocurrencia de deslizamientos y la frecuencia de factores desencadenantes como lluvias intensas o terremotos (van Westen, 1993). Se han desarrollado diversas técnicas que determinan valores umbrales de lluvias *históricas* (Crozier, 1986; Keefer et al., 1987; Capecchi y Focardi, 1988).

1.6.4. Métodos geomorfológicos

Son métodos directos que se basan en cartografía geomorfológica a partir de la cual el autor identifica y localiza los deslizamientos y procesos asociados a éstos directamente en el campo. Con las observaciones, el experto extrae unos criterios para la determinación de áreas

potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad y/o peligrosidad final. La elaboración de estos mapas exige conocer la morfología y tipología de movimientos (Hansen, 1984; Hansen y Frank, 1991).

Estos métodos así como los heurísticos y los probabilísticos se basan en una información de partida que es el mapa inventario de deslizamientos de un área. Este mapa se elabora a partir de fotointerpretación, trabajo de campo y recogida de información de eventos históricos. Para este tipo de cartografía, que como ya se ha comentado es básica para la mayor parte de las técnicas restantes, resulta de vital importancia la experiencia del experto. La experiencia que se tiene de centenares de estudios realizados en distintas partes del mundo (Brabb y Harrod, 1989; Brabb, 1995) demuestran que un investigador puede detectar y cartografiar la mayoría de deslizamientos ocurridos en un área aplicando técnicas de interpretación de foto aérea y chequeos sistemáticos de campo (Carrara et al., 1995). A pesar de ello existen cuerpos de deslizamientos latentes, deslizamientos históricos o modelados por procesos erosivos posteriores o bien áreas deslizadas modificadas por actividades ganaderas, o cubiertas por una densa vegetación que no pueden ser identificados fácilmente ni clasificados de forma correcta. Ello introduce un factor de incertidumbre no evaluado y que no se podrá incorporar en las fases posteriores del análisis. Este factor depende de la experiencia del investigador, de la calidad y escala de las fotos aéreas así como de los mapas de base utilizados (Carrara et al., 1995). También hay que tener en cuenta la existencia de deslizamientos que pueden ser indetectables dependiendo del momento de la toma de la foto aérea (van Westen, 1993), en el caso de técnicas que no utilicen el trabajo de campo.

Dentro de los métodos geomorfológicos se pueden encontrar los siguientes:

1. Análisis de la densidad de deslizamientos
2. Análisis de la actividad de deslizamientos
3. Análisis de susceptibilidad geomorfológica a los deslizamientos
4. Análisis de las unidades del paisaje (land system)

El análisis de densidad de deslizamientos es una variante del de distribución, dado que la distribución de deslizamientos se puede representar como un *mapa de densidad* (Wright et al., 1974). Estos autores describen un método para calcular las densidades a partir del recuento de deslizamientos incluidos en círculos. Los valores de densidades resultantes del recuento son interpolados y presentados como medias de líneas de igual número (*isopletas*) *de deslizamientos*. El método no investiga las relaciones entre deslizamientos y factores causantes de los mismos.

El análisis de actividad de deslizamientos se basa en la interpretación multitemporal de fotos aéreas (Canutti et al., 1979 y 1986) obteniendo un mapa de actividad de deslizamientos. Este método permite estudiar primeras roturas y reactivaciones de un mismo deslizamiento a lo largo de un periodo de tiempo. Ello permite obtener datos para estimar la recurrencia de los periodos de actividad del deslizamiento.

El análisis geomorfológico se basa en la cartografía de deslizamientos y de procesos geomorfológicos asociados. La base metodológica se puede encontrar en Kienholz (1977) quién desarrolló un método para elaborar un mapa de susceptibilidad combinado basado en la cartografía de “testigos silenciosos”. El grado de susceptibilidad se evalúa en cada lugar en el terreno en base a unos criterios expertos establecidos por el investigador que varían de un sitio a otro. Se trata de un método subjetivo cuyos resultados no pueden ser reproducidos por otro autor. Algunos ejemplos de mapas de susceptibilidad y/o peligrosidad

geomorfológicos se encuentran en: Carrara y Merenda (1974), Brunsdén et al. (1975), Malgot y Mahr (1979), Kienholz (1977, 1978), Kienholz et al. (1983), Ives y Messerli (1981), Rupke et al. (1987, 1988), Perrot (1988), Sijmonsbergen (1992) y Petley y Murphy (2000).

El método de las unidades de paisaje o *land system* (van Westen, 1993) es un método de reconocimiento rápido en la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos sobre grandes áreas, principalmente a escala regional. El método se basa en asumir que el paisaje se puede dividir en áreas con una combinación de geología, formas del terreno, suelos, vegetación y procesos asociados. Se evalúa entonces la distribución de deslizamientos para cada forma del terreno. El método es similar al utilizado en el análisis geomorfológico con la única diferencia en la escala. Así mientras en el análisis geomorfológico se cartografía cada forma del terreno, con este método algunas formas del terreno se asocian con unidades del terreno.

1.7. Integración de los métodos de susceptibilidad a la rotura de una ladera con los Sistemas de Información Geográfica

1.7.1. Introducción

Cuando se pretende realizar una cartografía de una zona, sea del tipo que sea – geológica, geomorfológica, estructural, etc-, se mezclan dos conceptos: la situación georeferenciada del dato o información que se va a cartografiar y el dato, o la información temática en sí mismo. Estas dos características, la componente espacial y la información temática asociada, configuran la base para entender los Sistemas de Información Geográfica.

Se han realizado varias definiciones en torno a los Sistemas de Información Geográfica -en adelante SIG o GIS, en siglas inglesas- (Cebrián y Mark, 1986; Burrough, 1988; Bracken y Webster, 1990; NCGIA, 1990). De manera simple un Sistema de Información Geográfica se puede contemplar como un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto (como puede ser el etiquetado con la letra A de la figura 1.3) tiene la misma localización en todos los mapas incluidos en el sistema de información (Bosque, 1992). Así es posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento de esa zona. Un S.I.G. se puede considerar esencialmente como una tecnología (un sistema de *hardware* y *software*) aplicada a la resolución de problemas territoriales (Bosque, 1992).

En un S.I.G., como programa de ordenador con unas capacidades específicas, se pueden encontrar las siguientes funciones (Bosque, 1992):

- Funciones para la entrada de información
- Funciones para la salida/representación gráfica y cartográfica de la información
- Funciones de gestión de la información espacial y
- Funciones analíticas.

Un S.I.G. puede contener varios modelos de datos de los objetos geográficos: el modelo vectorial, el modelo *raster*, el jerárquico-recursivo, etc., todos ellos válidos para los mapas planos formados por puntos, líneas y polígonos. Cada modelo está mejor preparado para realizar unas determinadas tareas (Bosque, 1992). También existen modelos de datos

espaciales para realizar mapas tridimensionales o de volúmenes (como por ejemplo, el modelo basado en una red de triángulos irregulares).

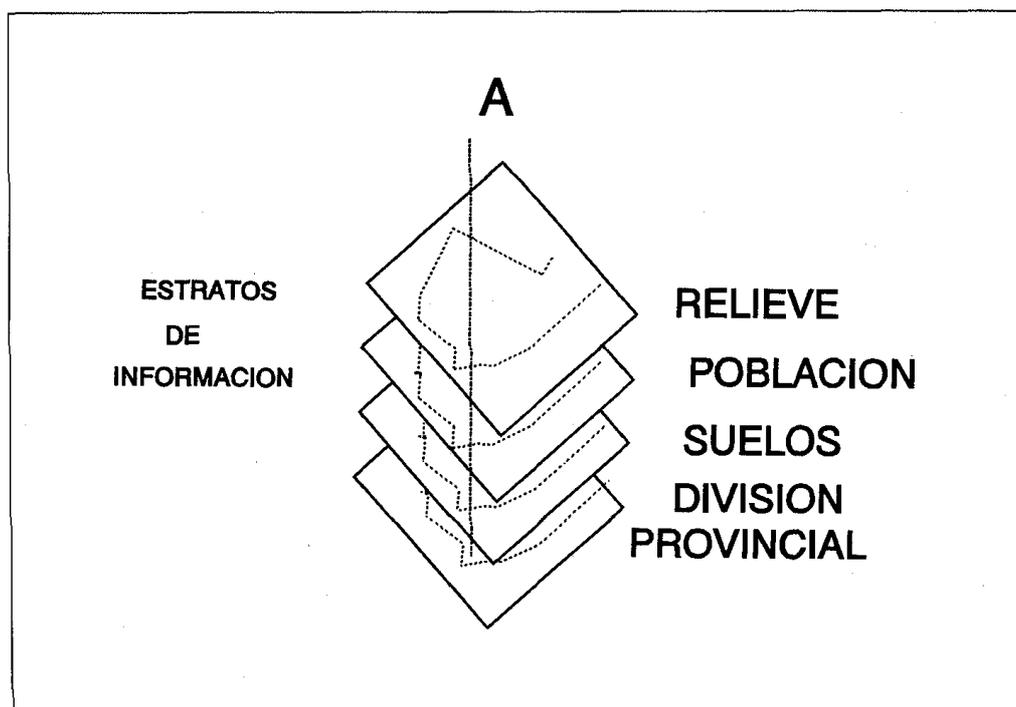


Figura 1.3: Estratos temáticos de un Sistema de Información Geográfica (Bosque, 1992).

Visto así, un S.I.G. es una herramienta perfectamente aplicable para realizar el análisis y la posterior cartografía de la susceptibilidad, de la peligrosidad y/o del riesgo a deslizamientos. El desarrollo de los SIG ha incrementado enormemente la disponibilidad de las técnicas de evaluación de susceptibilidad a deslizamientos y su aplicación (van Westen 1994).

1.7.2. Integración de los SIG con las técnicas de evaluación de la peligrosidad a deslizamientos. Breve repaso histórico.

Las primeras aplicaciones con “prototipos” de SIG en zonificación de peligrosidad /susceptibilidad a deslizamientos datan de los años 70 (Newman et al., 1978, Carrara et al., 1978; Huma y Radulescu, 1978 y Radbruch-Hall et al, 1979). En ellas se utilizaba el análisis cualitativo, combinando factores, y el estadístico multivariante.

Durante los años 80 el desarrollo comercial de los sistemas SIG, así como la mayor disponibilidad de los ordenadores personales incrementó el uso de SIG en los análisis de susceptibilidad. Ejemplos de análisis cualitativo con SIG son Stakenborg (1986), Brabb (1984) y Brabb et al. (1989), y ejemplos de análisis estadístico multivariante con SIG se puede encontrar en Carrara (1983, 1988) y Bernknopf et al (1988).

En los años 90, con la oferta comercial y la ampliación de las capacidades de los SIG, han aumentado las aplicaciones sobre el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos (Kingsbury et al., 1992; Alzate y Escobar, 1992; Lopez y Zink, 1991; Choubey y Litoria,

1990; Carrara et al 1990, 1991; Chacon et al., 1992). En 1993 van Westen publicó un manual completo sobre la aplicación de un SIG en la zonificación de inestabilidad de laderas.

Inicialmente la mayoría de las aplicaciones de los mapas de susceptibilidad con SIG utilizaban las técnicas basadas en la superposición de mapas (entendidos éstos como factores relacionados con la inestabilidad). Ello sólo permitía comparar cada valor de un mapa en la misma posición espacial (la misma celda de una malla regular de un sistema *raster*). Posteriormente, con la aparición de las operaciones de vecindad, las cuales tienen en cuenta las relaciones espaciales de cada celda con su entorno, se han podido extraer características morfométricas e hidrológicas a partir de un Modelo Digital de Elevaciones. Estas características (pendiente, orientación, convexidad, líneas de valles y de divisorias de aguas, área cuenca, orden de la red de drenaje, etc.) se pueden utilizar como parámetros para realizar análisis estadísticos univariantes o multivariantes combinando los factores con los deslizamientos (Carrara et al., 1991, 1995; Niemann y Howes, 1991; Campus et al., 2000; Dhakal et al., 2000; Feiznia, 2000; Zêzere et al., 2000; Thurston y Degg, 2000), análisis para modelizar distancias recorridas por caída de bloques (Van Dijke y van Westen, 1990) y análisis para definir la susceptibilidad de alcance por deslizamientos de tipo *debris flow* (Michael-Leiba et al., 2000).

El uso de un SIG también permite reconstruir la topografía previa al deslizamiento como han demostrado Thurston y Degg (2000). Mediante el uso de SIG es posible realizar la zonificación del peligro de desplazamiento de un gran deslizamiento, llevado a cabo en China por Wu et al. (2000), utilizando un Sistema de Análisis de Información (Yin y Yan, 1987 y 1988).

También los modelos determinísticos han experimentado un auge utilizando SIG (Brass et al., 1989; Murphy y Vita-Finzi, 1991; Hammond et al., 1992; Luzi, 1995; Luzi y Pergalani, 1996; Leroi, 1996). Lee et al (2000) han aplicado un modelo de talud infinito, modificado para incluir carga sísmica, para el análisis de la susceptibilidad a deslizamiento de dos zonas de la plataforma marina de California.

El desarrollo más reciente (esta última década) en la cartografía de la susceptibilidad a los deslizamientos es la aplicación de sistemas expertos (Pearson et al., 1991; Mayoraz et al., 1996 y 1997; Vulliet y Mayoraz, 2000).

En España, la aplicación de SIG a la evaluación de la susceptibilidad del terreno a movimientos de ladera se inició en la Universidad de Granada (Chacón et al., 1992; 1993 a y b; 1994; Irigaray, 1995).

1.7.3. Escalas de trabajo

Cuando se preparan mapas de susceptibilidad, se debe valorar la influencia que un número de factores incidirá en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (Rengers et al., 1992). Cuanto más detallado sea el mapa más factores deberán ser estudiados. La escala de análisis es uno de los primeros puntos a considerar en un proyecto. De ella dependerá la metodología utilizada, los factores o datos considerados, la unidad de terreno etc.. en general, se pueden distinguir tres escalas (IAEG, 1976) para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos:

- Escala regional (< 1:100.000)

- Escala media (1:25.000 a 1:50.000)
- Gran escala (1:5.000 a 1:10.000)
- Más una cuarta escala, la escala detallada ($> 1:5.000$), que se puede añadir a las tres anteriores (Luzi (1995).

En la escala regional los mapas se usan para identificar áreas con problemas de deslizamiento de una forma genérica. Son utilizados por organizaciones que trabajan con planificación regional (Luzi, 1995; Rengers et al., 1992). Utilizan métodos semicuantitativos como la superposición de mapas, y las unidades del terreno se basan en características morfológicas obtenidas de imágenes estereográficas a pequeña escala (1:60:000 a 1:50.000) (Rengers et al., 1992).

La escala media es utilizada para planificación intermunicipal y para estudios ingenieriles locales. Se emplean distintos métodos analíticos, principalmente estadísticos, así como modelos digitales de elevaciones detallados y otros mapas temáticos. Se usan imágenes estereográficas a escalas 1:15.000 a 1:25.000 (Rengers, et al., 1992). Los métodos estadísticos de análisis de susceptibilidad son apropiados para esta escala (Mulder, 1991; Dhakal et al., 2000).

En la cartografía a gran escala los mapas son creados para estudiar problemas locales de inestabilidad, para planificar infraestructuras de proyectos de edificios e industriales (Luzi, 1995). Los métodos de análisis utilizados son métodos cuantitativos que incluyen estadística multivariante y modelos numéricos de estabilidad. Esta escala requiere información cartográfica de muy buena calidad, así como imágenes estereográficas de 1:5000 a 1:10.000) (Rengers et al., 1992). Finalmente, la escala detallada es utilizada por compañías o administraciones municipales que evalúan la susceptibilidad de áreas concretas de diversas hectáreas de tamaño máximo (Luzi, 1995).

1.7.4. Unidad de terreno utilizada

Para realizar un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de una zona mediante un SIG es necesario seleccionar la **unidad del terreno** que se va a utilizar en el análisis. Se entiende como unidad del terreno o unidad cartográfica a la porción de una superficie del área que contiene una serie de condiciones del terreno que difieren de las unidades adyacentes mediante límites bien definidos (Hansen, 1984). La selección de la unidad de terreno influencia enormemente todos los análisis siguientes (Carrara et al., 1995).

Se han propuesto varios métodos para definir la unidad del terreno (Meijerink, 1988). A grandes rasgos se pueden definir de 4 a 5 unidades del terreno (Carrara et al., 1995; Pachauri y Pant, 1992):

- Unidades geomorfológicas
- Unidad celda (*pixel*) de una malla regular
- Unidades de condición única
- Unidad de ladera (*slope unit*)
- Unidad faceta (*facet*)

Las unidades geomorfológicas se basan en límites morfológicos que frecuentemente reflejan diferencias geomorfológicas y geológicas. Se han utilizado en algunas investigaciones (Speight, 1977; Verstappen, 1983; Meijerink, 1988; Hansen et al., 1995). El

principal inconveniente es la subjetividad de la técnica en la definición de las unidades. Son unidades definidas de forma manual que deben ser convertidas a formato digital para entrar en el SIG.

Las celdas de una malla regular implican la división de una zona en unas unidades de tamaño regular, normalmente cuadradas, donde en cada celda se asigna un valor para un factor determinado. Análisis estadísticos y obtención de muestras es un proceso fácil en este tipo de unidades en un SIG. En celdas de tamaño muy grande el significado físico de la unidad es bajo, aumentando su validez física a medida que el tamaño de la celda disminuye. En este último caso se necesita más capacidad de ordenador para manejar y almacenar los datos, si bien se puede optar por reducir el área de estudio.

Las unidades de condición única (Chung et al., 1995) son dominios homogéneos del terreno obtenidos a partir de la superposición de mapas de distintos factores, previamente categorizados en clases o rangos. El número, tamaño y naturaleza de estas unidades depende estrictamente de los criterios utilizados en la clasificación de los factores y de los factores utilizados. Aunque la técnica parece objetiva existe una subjetividad inherente al proceso de clasificación de los factores (Carrara et al., 1995). Cuando se utilizan más de 5 a 7 factores pueden aparecer unidades muy pequeñas con un significado estadístico bajo, pudiendo resultar de errores en la obtención de los datos. Esto se puede evitar aplicando técnicas de filtro, que no se aplicarán en aquellas pequeñas unidades con significado físico. La técnica es útil para aplicar en situaciones donde conceptual, o operacionalmente, es imposible predefinir una unidad basada físicamente.

Las unidades de ladera son divisiones de un área en subcuencas o en unidades principales de ladera (*main slope-units*). Si se tiene en cuenta la clara relación física entre deslizamientos, drenaje y líneas divisorias parece adecuado el utilizar estas unidades (Carrara et al., 1995). La limitación en la obtención manual de las subcuencas ha sido superada en los últimos años con la aparición en el mercado de técnicas de generación automática de redes de drenaje y división de éstas (Band, 1986; Burrough, 1986, Carrara , 1988; Jenson y Domingue, 1988). El tamaño apropiado de la unidad debería depender del tamaño de los deslizamientos presentes en el área de estudio, aunque este criterio se aplica cuando se trabaja con un solo tipo de deslizamientos (Carrara et al., 1995). Campus y Forlati (2000) utilizan cuencas hidrográficas derivadas automáticamente en un SIG, como unidades de terreno.

Las facetas (*facets*) son unidades del terreno basadas en la pendiente y la dirección de la pendiente del terreno desde crestas, divisorias y cimas, pasando por escarpes hasta laderas con poca pendiente y zonas llanas (Anbalagan, 1992; Pachauri y Pant, 1992). Se trata de partes de laderas que tienen unas características más o menos similares en cuanto a pendiente y dirección de ésta. En un SIG esto se puede extraer de forma automática de la malla regular correspondiente a la pendiente, derivada del modelo digital de elevaciones, aunque dependiendo del tamaño de la celda el mapa con estas unidades del terreno puede ser poco adecuado.

1.7.5. Métodos de evaluación de la peligrosidad y SIG

Los métodos de evaluación de la peligrosidad mediante un SIG son los mismos que se han comentado en el apartado 1.6. En este apartado se comentará el uso de un SIG en cada uno de los métodos basándonos en van Westen (1993).

• Métodos determinísticos.

Estos métodos que calculan la estabilidad en términos de factor de seguridad requieren de modelos para el cálculo de este factor. En este caso un SIG se puede aplicar en diversos procedimientos determinísticos:

- Usando un modelo de talud infinito, calculando el factor de seguridad para cada celda.
- Selección de un número de perfiles extraídos de un modelo digital de elevaciones y de otros mapas de factores, exportando luego estos datos a un modelo de estabilidad de talud tridimensional.
- Muestreando datos en puntos predefinidos de una malla regular, y exportando los mismos a un modelo de estabilidad tridimensional.

Según van Westen (1993) el método determinístico es sólo aplicable a grandes escalas y sobre áreas pequeñas, debido a que a escalas mayores (media y regional), el detalle de los datos de entrada (niveles de agua subterránea, perfiles del suelo, y descripciones geotécnicas) es insuficiente.

Los primeros análisis determinísticos aplicando SIG analizaron deslizamientos traslacionales utilizando modelos de talud infinito que calculaban el factor de seguridad para cada celda (Brass et al., 1989; Murphy y Vita-Finzi, 1991). Hammond et al. (1992) presentaron métodos donde la variabilidad del factor de seguridad se calculó a partir de variables seleccionadas siguiendo la técnica de Monte Carlo.

Normalmente estos métodos se aplican a laderas específicas y la regionalización de los procedimientos es limitada debido a la inversión de tiempo y dinero, necesaria para obtener los parámetros para el análisis. A pesar de ello, algunos autores han aplicado métodos determinísticos a escala regional con la ayuda de SIG (Van Westen, 1993; Luzi, 1995; Van Westen y Terlien, 1996; Luzi y Pergalani, 1996; Leroi, 1996; Jibson et al., 2000). Según Luzi et al. (2000) se utiliza el modelo de talud infinito a escala regional debido a que el uso de modelos más precisos podrían conducir a error, dadas la baja precisión de los parámetros geotécnicos y la no bien definida geometría de los deslizamientos. En estos estudios se utilizan, en general, parámetros geotécnicos de la literatura o de informes de proyectos ingenieriles existentes en el área (proveniente de ensayos de laboratorio), de los cuales se hace la media, o se utilizan máximos y mínimos, se extrapolan o se asignan valores estimados a todo el área de estudio. Algunos parámetros como el espesor de la zona saturada no se conocen exactamente y se utilizan distintos valores simulando distintos escenarios para el cálculo del factor de seguridad o de los desplazamientos durante un terremoto mediante el método de Newmark (Luzi, 1995) (en el caso de calcular aceleraciones sísmicas). Igualmente se estima una profundidad de superficie a deslizar que coincide con una superficie geológica (por ejemplo el contacto entre depósitos superficiales y substrato rocoso), o bien se utiliza un mapa con el grosor de un material determinado, o el espesor medio de deslizamientos inventariados en el área. En última instancia, en los trabajos citados previamente que aplican el método determinístico a escala regional, se obtiene un mapa con el factor de seguridad, o bien con los desplazamientos, calculados celda a celda, y sólo en algunos de ellos se validan los resultados obtenidos (Van Westen y Terlien, 1996).

Jibson et al (2000) proponen un método para realizar mapas digitales de peligrosidad a deslizamientos provocados por sismos mediante un método probabilístico. El método se ejecuta en un SIG y se basa en el cálculo del factor de seguridad en cada celda con la

ecuación del talud infinito, para calcular en un paso posterior, la aceleración crítica y luego el desplazamiento de Newmark. Los parámetros geotécnicos utilizados han sido extraídos de distintas fuentes y se han utilizado valores representativos para cada unidad geológica. Los autores han utilizado un MDE con una malla de 10 * 10m, ocupando una buena parte de los deslizamientos más de una celda para la zona de rotura.

Luzi et al. (2000) calculan la susceptibilidad de laderas a roturas causadas por terremotos, en términos de aceleración horizontal crítica, a escala subregional utilizando el método del talud infinito. Los autores evalúan la variabilidad de los parámetros geotécnicos utilizados mediante análisis estadístico para asignar la distribución más probable a la cohesión, el ángulo de fricción y el peso específico del suelo. También utilizan un método bayesiano para calcular un mapa de probabilidad de fuentes de agua usado como indicador de agua subterránea. Finalmente, los métodos de Monte-Carlo y de primer-orden segundo-momento son utilizados como estimadores del error en la evaluación de la susceptibilidad a la rotura.

Sakellariou y Ferentinou (2001) proponen un método basado en SIG para estimar la estabilidad de un talud calculando el factor de seguridad sobre rotura circular. El método llamado "Landslide Hazard Assessment Tool" se ejecuta en ARC/INFO y precisa de una serie de parámetros de entrada algunos de los cuales son derivados de un MDE. El método permite regionalizar el análisis y es aplicable para estimar el efecto de alteraciones en la geometría del talud en laderas sometidas a construcción (debido a infraestructuras de tráfico y de industria). El procedimiento permite trabajar en distintos escenarios como condiciones del terreno secas o mojadas, dando como resultado un mapa de zonación de peligrosidad a deslizamientos de un área.

• Métodos heurísticos

En el análisis cualitativo el SIG se puede utilizar en todo el proceso desde la división de cada parámetro en un número significativo de clases (en el caso de parámetros continuos), hasta el mapa final de susceptibilidad. Con el SIG se puede asignar el valor ponderado a cada categoría para cada parámetro, así como un valor a cada mapa, realizando posteriormente el cálculo para cada celda, combinando los distintos mapas, y clasificando el mapa final en unas cuantas categorías de susceptibilidad.

• Métodos probabilísticos

Para el análisis estadístico univariante el SIG es una herramienta muy adecuada, debido a que esta técnica permite un gran número de cruce de mapas y de manejo de datos temáticos. El SIG ejecuta los pasos del análisis cualitativo añadiendo la técnica estadística que se utilizará para la creación del mapa de susceptibilidad final. Es posible combinar varios mapas de factores en un único mapa de unidades homogéneas que se superpone entonces con el mapa de deslizamientos, dando una densidad o una probabilidad por cada combinación de los factores de entrada.

En el análisis estadístico multivariante de la susceptibilidad de deslizamiento el SIG se utiliza en buena parte del proceso. Dependiendo de la técnica analítica utilizada y del SIG de que se disponga, se requerirá un programa estadístico externo al SIG para realizar el cálculo. En el análisis multivariante el SIG se utiliza para crear un mapa de unidades del terreno, que junto con el mapa de deslizamientos y los distintos mapas de factores relacionados permite realizar mapas de categorías para cada factor, cruzar los mapas de

factores con los de unidades del terreno y presencia/ausencia de deslizamientos, etc.. El SIG es fundamental para manejar la gran cantidad de datos para cada unidad de terreno, crear una muestra de la población para ser analizada (fuera, o en algún caso dentro del SIG), y clasificar el mapa final en unas cuantas clases de susceptibilidad. Tanto para el caso de los métodos determinísticos como para los heurísticos y los probabilísticos, con un SIG y un modelo digital de elevaciones se pueden derivar automáticamente otros parámetros relacionados con la ocurrencia de deslizamientos.

Keefner (2000) utiliza análisis estadístico bivalente para relacionar 3 factores por separado (distancia al epicentro del terremoto, pendiente de la ladera y tipo de roca) con la concentración de deslizamientos, expresada ésta como el número de zonas de rotura de deslizamientos por kilómetro cuadrado de superficie. Parte del análisis lo realiza mediante un SIG derivando del MDE la pendiente y utilizando bandas concéntricas para determinar la distancia de cada deslizamiento al área fuente del terremoto. Parise y Jibson (2000) también utilizan un SIG y un MDE para analizar con estadística descriptiva la relación entre la distribución de deslizamientos provocados por un terremoto del año 1994 en California, y 3 factores por separado: intensidad de la sacudida sísmica, la pendiente de la ladera y la unidad geológica.

Las principales técnicas multivariantes utilizadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante, aunque también se han utilizado otras técnicas como la clasificación no supervisada –clustering- (Niemann y Howes, 1991), la regresión logística y el modelo de red neuronal linear (Carrara et al., 1991) En un principio, en Carrara (1983 y 1988) se llevaron a cabo los análisis multivariantes (con la técnica de regresión múltiple) con celdas de una malla regular como unidad de terreno en un SIG. Posteriormente se utilizaron unidades morfométricas delineadas automáticamente de un modelo digital de elevaciones, como unidad utilizada (Carrara et al., 1991; 1992). Chung et al. (1995) han utilizado tanto celdas de una malla regular como unidades de condición única para el análisis de regresión múltiple concluyendo que las primeras son un caso especial de las unidades de condición única, que el método de regresión es útil y se ha validado con buenos resultados y que se pueden utilizar otras unidades con este método.

Carrara et al. (1991) utilizaron el análisis discriminante para calcular la susceptibilidad a la rotura de varias tipologías de deslizamientos, con una muestra aleatoria del 65 % de 266 unidades de ladera, donde el 35 % de unidades restantes fueron utilizadas para validar el método. Las unidades se definieron automáticamente, transformándose luego a formato vectorial y el análisis estadístico posterior fue llevado a cabo con el paquete estadístico SPSS. De 40 variables se seleccionaron 15 para el análisis discriminante concernientes a litología, uso del suelo, orientación, elevación, rugosidad, hidrogeología y estructura. El estudio muestra tres análisis discriminantes con tres muestras aleatorias distintas y sus respectivas muestras de validación. Mientras que las muestras de análisis mostraban clasificaciones correctas entre 82 y 84 %, las de validación reducían el acierto entre 75 y 82 %. Posteriormente, Carrara et al. (1995) utilizan el análisis discriminante en otra zona de Italia para analizar la susceptibilidad de 3 grupos distintos de deslizamientos (grandes deslizamientos complejos bastante antiguos, deslizamientos de recientes a antiguos y flujos superficiales). Los resultados de las clasificaciones de aciertos oscilan entre un 74.8 y un 92.4%, aunque los mejores resultados se encuentran en los análisis con poblaciones (estables/inestables) distintas en cuanto al número de individuos. En este caso se utilizaron dos nuevos factores derivados del MDE: curvatura y longitud máxima de la ladera. En el mismo trabajo los autores comparan el análisis discriminante utilizando unidades del terreno y unidades de condición única para un grupo de deslizamientos. Las diferencias en los

resultados evidencian las divisiones del terreno utilizadas: la unidad el terreno definida hidrológica y morfológicamente y las unidades de condición única derivadas de una combinación multifactorial.

En el análisis de frecuencia de deslizamientos se valora la relación entre la ocurrencia de deslizamientos y la frecuencia de factores desencadenantes, como por ejemplo terremotos o lluvias. Para el caso de lluvias se determina el valor umbral de las lluvias necesarias para producir rotura. Éstas son la cantidad acumulada de precipitación caída en los días previos a la rotura. En este análisis la componente espacial no es muy importante y, por tanto, el SIG no es una herramienta crucial. No obstante, se puede utilizar para analizar la distribución espacial de la lluvia, en el caso de análisis de frecuencia basados en la relación entre la lluvia y la ocurrencia de roturas.

• Aproximaciones geomorfológicas

En el análisis de la distribución de deslizamientos (aunque por si no constituye un método de susceptibilidad) el SIG sólo se usa para almacenar la información y visualizar los mapas en diferentes formas como por ejemplo escarpes, o visualizar sólo deslizamientos activos, etc.. El análisis en un SIG para esta técnica es muy simple, aunque tiene la gran ventaja de que el usuario puede seleccionar combinaciones específicas de parámetros de deslizamientos, y obtener una mejor percepción de la distribución espacial de distintos tipos de movimientos.

Para el análisis de actividad de deslizamientos el SIG se utiliza en el cálculo de las diferencias en actividad entre los deslizamientos de dos eventos distintos. Ello es posible si los dos eventos están en formato digital e introducidos en sistemas de coordenadas que puedan ser comparables

En la técnica de análisis de densidad de deslizamientos el SIG es utilizado en la combinación o cruce de mapas de factores con el mapa que contiene la información sobre presencia/ausencia de deslizamientos. También se utiliza en la creación de este último mapa así como en el cálculo del porcentaje de área ocupada por deslizamientos para cada categoría de un factor.

Para el análisis de la susceptibilidad geomorfológica a deslizamientos el SIG no se utiliza como herramienta de análisis de los factores relacionados con la ocurrencia de deslizamientos. Antes bien, se utiliza como herramienta de dibujo, permitiendo una rápida recodificación de las unidades geomorfológicas y corrección de aquellas que se han codificado erróneamente, así como facilitar las posteriores actualizaciones.

1.7.6. Entrada de datos en un SIG

La entrada de datos en un SIG se puede agrupar a grandes rasgos en tres métodos distintos:

- 1- Digitalización de datos analógicos (de tipo georeferenciado). Puede realizarse con una tabla digitalizadora o bien escaneando la información de tipo vectorial georeferenciada (mapas), realizando con posterioridad los retoques pertinentes. Esta información entrará en el SIG en estructura vectorial y podrá ser manejada una vez se realice la topología.

- 2- Entrada de base de datos temática, previamente existente en algún formato, y que está asociada a información georeferenciada que ya se dispone en formato digital. Esta información permitirá crear nuevos mapas conservando la topología inicial de la información georeferenciada a la que están asociados.
- 3- Entrada e interpretación de imágenes satélite u otras imágenes, a partir de las cuales se dispone de información georeferenciada (normalmente en estructura raster).

1.7.7. Factores de inestabilidad y SIG

En los SIG una parte de los factores asociados a la inestabilidad de laderas pueden derivar de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de manera automática. Ello agiliza enormemente la disponibilidad de factores, aunque hay que tener en cuenta que su fiabilidad y precisión dependerán de los algoritmos y del MDE utilizado y, por tanto, de la precisión y resolución de éste. Los factores derivados de un MDE y que se han utilizado en la literatura para el análisis de la susceptibilidad a los deslizamientos (utilizados de manera continua o bien reclasificados) se enumeran seguidamente (Gupta y Joshi, 1990; Carrara et al., 1991; Niemann y Howes, 1991; Lopez y Zinck, 1991; Van Westen, 1993; Naranjo et al., 1994; Carrara et al., 1995; Chung et al., 1995; Nagarajan et al., 1998; Borga et al., 1998; etc):

Relacionados con la topografía y geometría de la ladera

Elevación

Pendiente (en grados o en porcentaje)

Orientación

Convexidad/ concavidad de la ladera (media)

Convexidad/concavidad en la dirección de máxima pendiente

Convexidad/concavidad en la dirección transversal a la pendiente

Rugosidad (diferencia entre pendiente media y pendiente)

Índice topográfico (área cuenca dividida por la longitud del contorno de la misma)

Relacionados con la hidrología

Orden del río más alto en el pixel

Densidad de drenaje

Distancia a líneas de drenaje

Distancia desde ríos de primer orden (segundo, tercer, quinto orden, etc)

Distancia desde ríos de primer y segundo orden (u otras combinaciones)

Distancia a las cabeceras de valles

Distancia a divisorias de aguas (líneas de cresta)

Tamaño de cuenca

Algunos factores sólo se pueden obtener mediante estudio de campo y interpretación de fotografías aéreas, aunque en algunos casos cierta información se puede obtener de imágenes de sensores remotos (tipos vegetación / usos del suelo, humedad, etc). En el primer caso se tratará de información que deberá convertirse a formato digital de tipo vectorial con topología polígono, línea o punto según el caso. En el segundo caso la información podrá introducirse y analizarse dentro del SIG. Los factores que suelen requerir una captura al margen del SIG y que han sido utilizados en la literatura son los siguientes:

Relacionados con la geología

Litología

Formaciones/depósitos superficiales
Grosor depósitos superficiales
Procesos y formas geomorfológicos
Estructura (fallas y lineaciones)
Magnitud/frecuencia de eventos sísmicos
Propiedades geotécnicas del suelo (ángulo de fricción, cohesión, peso específico, etc)
Fuentes (utilizando el número de fuentes)

Relacionados con el uso del suelo

Vegetación (tipo o densidad)
Usos del suelo

Relacionados con el clima

Intensidad de lluvia

Finalmente algunos factores utilizados están creados a partir de una información inicial, normalmente en formato vectorial, utilizada en el SIG para analizar y obtener nueva información (en una estructura raster o bien en una vectorial) y utilizando o no el MDE. En algunos casos los mapas de factores se crean mediante funciones de interpolación. Estos factores son:

Relacionados con la estructura y sismicidad

Distancia a fallas principales
Distancia a alineaciones
Distancia a epicentros sísmicos

Relacionados con red viaria o núcleos urbanos

Distancia a carreteras
Distancia a ciudades

Relacionados con la hidrogeología

Nivel de agua subterránea
Espesor de la zona saturada

1.7.8. Ventajas e inconvenientes del uso de SIG

Según Van Westen (1993) las ventajas del uso de SIG para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos son:

- La aplicación que se puede realizar con un SIG de una gran variedad de técnicas de análisis de la susceptibilidad. Debido a la velocidad de cálculo de un SIG se pueden aplicar técnicas complejas que requieren gran número de cruce de mapas y cálculos de tablas.
- La posibilidad de mejorar modelos, evaluando sus resultados y ajustando las variables de entrada. El usuario puede obtener los mejores resultados en un proceso de prueba y error, ejecutando los modelos varias veces.
- En el transcurso de un proyecto de evaluación de la susceptibilidad los mapas de entrada derivados de observaciones de campo se pueden actualizar rápidamente. De la misma forma, una vez concluido el proyecto los datos pueden ser utilizados por otros usuarios de manera efectiva.

A pesar de las ventajas existen unos inconvenientes que no hay que perder de vista en el análisis de la susceptibilidad (Van Westen, 1993):

- La enorme cantidad de tiempo que se necesita para entrar los datos (en el caso que se entren mediante digitalización).
- El error en que se puede caer poniendo el énfasis en el análisis de los datos y no en la calidad de obtención y manejo de los mismos. Es posible utilizar varios métodos distintos de análisis pero a menudo faltan los datos necesarios para aplicarlas. A veces se dispone de muchas técnicas, pero éstas no se pueden usar debido a la incertidumbre o a la falta de estos datos.

1.7.9. Evaluación de los errores

La enorme cantidad de datos que se manejan y el gran número de operaciones que se realiza en los SIG, hacen que los errores que se pueden producir sean importantes y deban tenerse en consideración. A pesar de que siempre se obtiene un resultado final (mapa de susceptibilidad, mapa de peligrosidad) éste puede no reflejar la realidad. En este sentido, el análisis de errores es un requisito indispensable en todos los procedimientos en que se utilizan los SIG. La valoración de la calidad y veracidad de los mapas finales dependerá de los errores acumulados en todo el proceso.

La tabla 1.2 muestra los errores asociados a un proyecto aplicado con SIG (Aronoff, 1989).

Aunque se puede observar en la tabla 1.2 los distintos tipos de errores asociados a un proyecto con SIG, son los errores relacionados con la aplicación de éste en la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos los que trataremos aquí. En Burrough (1986) se puede encontrar una amplia descripción de errores en un SIG.

La distinción entre error e incertidumbre es un tema importante en la evaluación de los errores, puesto que implican cosas distintas. El **error** en un mapa se puede evaluar sólo si se dispone de otro mapa o de información de campo libre de error, y con la cual se pueda verificar el primero (Van Westen, 1993). El error no sólo implica el concepto de “fallo” sino que también incluye un concepto estadístico de variación (Luzi, 1995). La **incertidumbre** está asociada a aquellos aspectos del análisis que tienen un grado alto de subjetividad, como la definición de unidades geomorfológicas, ponderaciones, etc., así como al limitado conocimiento entre las relaciones existentes entre factores e inestabilidad. El grado de incertidumbre se relaciona con algunos factores como la escala de análisis, el tiempo y la financiación para la recogida de datos, el tamaño del área de estudio, la experiencia del investigador y la disponibilidad y veracidad de mapas existentes (Van Westen, 1993). En la tabla 1.3 se muestran algunos de los principales factores relacionados con la susceptibilidad a deslizamientos junto con el grado de incertidumbre estimado. Un grado de incertidumbre bajo significa que los datos contienen un error aceptable, debido a acertadas especificaciones de las unidades y de sus localizaciones, o bien datos temáticos exactos. Por el contrario, una incertidumbre alta significa que los datos contienen errores debido a extrapolaciones de valores o a estimaciones subjetivas (Luzi, 1995).

1. Errores en los datos originales

Errores geométricos (posición) y semánticos (clasificación) en la recogida de mapas
Errores geométricos y de clasificación en datos de sensores remotos
Errores en otros datos fuente (ej. de muestreo de campo)
Imprecisiones debidas al carácter indefinido de los límites naturales
Errores debidos a datos originales fuera de lugar

2. Errores ocurridos durante la entrada de datos

Errores de digitalización producidos por el operador y por la limitada precisión del digitalizador
Errores en la entrada de datos temáticos (errores de transcripción)

3. Errores en el almacenaje de datos

Errores debido a la precisión limitada en la que han sido guardados coordenadas y otros datos numéricos
Errores debido a la conversión vectorial a raster

4. Errores en el análisis y manipulación de los datos

Propagación de errores durante la combinación de mapas
Errores debido al uso incorrecto de fórmulas
Errores procedentes de la interpolación (ej. para determinar la pendiente)

5. Errores en la salida de los datos y aplicaciones

Errores cartográficos debido a la limitación de aparatos de salida
Aplicación incorrecta o inapropiada de salidas de SIG

Tabla 1.2: Fuentes de error en un análisis aplicado en SIG (Aronoff, 1989).

Además del error y la incertidumbre se debe tener en cuenta la **precisión** (accuracy) de la información y de los mapas utilizados de partida. En este sentido, el uso de modelos digitales de elevaciones a partir de los cuales se derivan otros modelos del terreno que se utilizan, posteriormente, como factores relacionados con la estabilidad, debe tener en cuenta la precisión del MDE de partida. Si el MDE se ha construido a partir de la digitalización de un mapa topográfico, la precisión de éste influirá en el MDE y en sus derivados. Por ello es necesario valorar esta precisión y el error que pueda derivar de la misma.

Los errores relacionados con el análisis de susceptibilidad a deslizamientos mediante un SIG son:

1. Errores asociados a datos preexistentes
2. Errores en los datos nuevos recogidos
3. Errores de procesamiento de datos

Factor	Incertidumbre
Angulo de pendiente	Baja
Dirección de la ladera	Baja
Convexidad	Baja
Zonificación litológica general	Baja
Composición litológica detallada	Alta
Contexto tectónico general	Baja
Estructura detallada de la roca	Alta
Aceleración sísmica	Alta
Distribución de lluvia	Intermedia
Marco geomorfológico	Baja
Situación geomorfológica detallada	Intermedia
Distribución de movimientos de masa actuales	Intermedia
Tipología de movimientos de masa actuales	Intermedia
Actividad de movimientos de masa actuales	Intermedia/alta
Distribución de movimientos de masa pasados	Alta
Distribución de tipos de suelo	Baja/intermedia
Características del suelo	Intermedia/alta
Espesor del suelo	Alta
Condiciones del agua subterránea	Alta
Uso del suelo	Baja
Condiciones climatológicas pasadas	Alta

Tabla 1.3 : Estimación del grado de incertidumbre de los principales factores asociados a la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos (Carrara et al, 1992, revisado por Van Westen, 1993).

Errores asociados a datos preexistentes

En este grupo los errores pueden ser causados según Van Westen (1993) por:

- Incorrecta interpretación de imágenes
- Uso de distintas leyendas
- Datos no actualizados
- Datos incompletos
- Tiempo insuficiente para la recogida de los datos

Los errores en los mapas topográficos, geológicos, de suelos, etc., disponibles afectarán la fiabilidad de los mapas finales. El caso de los mapas topográficos reviste más importancia puesto que en algunos proyectos son la fuente de datos para crear un modelo digital de elevaciones (MDE).

Con el uso de los SIG, una buena parte de los factores relacionados con los deslizamientos son derivados de forma automática a partir de los MDE (Van Westen, 1993; Carrara et al., 1995). Los datos de elevación digital y sus derivados (pendiente, orientación, etc.) pueden estar afectados por todo un abanico de incertidumbres o errores que dependen de la calidad de las líneas de contorno originales digitalizadas y de los algoritmos utilizados para interpolar valores de elevación o parámetros morfométricos (Carrara et al., 1995). Por lo tanto, una cuestión inicial en cualquier proyecto en el que ya se dispone de un MDE, se refiere a cuál es el origen de la información de base utilizada para crear éste MDE (Bosque,

1992). Esta información a su vez, puede proceder básicamente de dos fuentes: el mapa topográfico o la restitución tridimensional de fotografías aéreas del terreno (Cebrián y Mark, 1986; Carrara et al., 1995).

Algunos investigadores han intentado cuantificar los errores en un MDE y valorar su influencia en el mapa de deslizamiento final (Reichenbach et al., 1993). Van Westen (1993) comparó MDE derivados de mapas topográficos de distintos años encontrando discrepancias en un orden de ± 10 m. Por otro lado, a partir del mismo MDE, Skidmore (1989) encontró variaciones de entre $\pm 5^\circ$ y $\pm 70^\circ$ utilizando distintos algoritmos para el cálculo de la pendiente y la orientación respectivamente. Bitelli et al. (1993) han demostrado que los interpoladores disponibles en algunos programas SIG comerciales (ARC/INFO, IDRISI, ILWIS, GRASS, INTERGRAPH, etc) producen MDE distintos con los mismos datos de partida.

Luzi et al. (2000) han utilizado técnicas estadísticas como la simulación de Monte Carlo y el modelo numérico de primer-orden segundo-momento (*first-order second-moment*) para cuantificar el error asociado a estimación de la aceleración horizontal crítica, y por tanto, la susceptibilidad a la rotura de la ladera provocada por la sacudida de un terremoto.

Finalmente cabe destacar que los métodos para la identificación automática de líneas de drenaje, cuencas, etc. (Band, 1986; Burrough, 1986; Jenson y Domingue, 1988; Lammers y Band, 1990) implantados ya en SIG comerciales no han sido contrastados y no se ha demostrado su exactitud topológica (Carrara et al., 1995).

Errores en los nuevos datos recogidos

Los errores en la recogida de datos son debidos, en general, a una incorrecta interpretación de imágenes, así como una incorrecta interpretación de campo, tiempo limitado de recogida de datos, errores en la transcripción de datos, en la situación geográfica de los mismos etc.. Así revisten especial importancia los errores habidos en el mapa de distribución o localización de los deslizamientos, así como en el mapa de unidades del terreno (ej. geomorfológicas) en el caso que se utilicen unidades definidas de forma manual o subjetiva. En este sentido la experiencia del investigador definirá en buena parte el error del mapa final. Ejemplos de comparaciones de mapas de deslizamientos realizados por distintos investigadores y valoración de los errores se pueden encontrar en (Carrara et al., 1992; Guzzetti, 1993; Fookes et al, 1991; Van Westen 1993).

Errores en el procesamiento de datos

La combinación de capas en un SIG puede generar errores operacionales (Van Westen, 1993). Ello significa que se pueden generar algunas clases de pocas celdas cuando se combinan varios mapas, clases que pueden no tener significado físico y que no juegan un papel muy importante en la validez del mapa final. Por ello hay que utilizar la combinación de mapas con cautela y utilizar esta opción basada en la experiencia de campo (Van Westen, 1993).

1.8. Tendencias actuales y futuras

El avance y desarrollo de las tecnologías tanto de los SIG, como la capacidad y asequibilidad de los ordenadores y los sensores remotos, permiten vislumbrar nuevas

tendencias en el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos mediante SIG. En este apartado se comenta brevemente algunas de estas tendencias. Dos grandes grupos constituyen lo que, a nuestro parecer, son las nuevas tendencias: la captura y obtención automática de los datos y la aplicación de Redes Neuronales.

1.8.1. Captura y obtención automática de datos

La obtención rápida y precisa de MDE así como de otra información relacionada con deslizamientos (factores causantes y detección automática de deslizamientos) son campos interesantes que comportan una reducción del tiempo destinado de un proyecto a esta tarea.

Creación de MDE detallados

Aleotti et al. (2000) han utilizado el altímetro laser (Airbone Laser Terrain Model, ALTM) creado por Aquater, que es un sistema de escaneado laser altamente preciso diseñado para recoger datos morfológicos del terreno en coordenadas XYZ. La resolución espacial depende de la elevación y velocidad del avión oscilando entre 40cm a 300 m de elevación y hasta 7 m a 1200m de altitud. Permite crear un MDE caracterizado por una alta densidad de puntos de altitud, precisión geométrica alta y disponibilidad inmediata de los datos adquiridos y entrada en un SIG. La precisión de los puntos de referencia es : $X, Y < 1.0$ m; $Z < 15$ cm.

Según Davis et al. (2000) la exactitud de MDE generados automáticamente se puede mejorar cambiando unos parámetros en el programa ERDAS OrthoMAX. Los MDE se construyeron a partir de fotos aéreas. Posteriormente estos modelos se utilizaron para ortorectificar las fotografías y producir mapas de imágenes corregidas del terreno. Los autores demuestran como se pueden producir vistas en 3D de deslizamientos a partir de MDE y ortofotografías, aplicando el método en la provincia de Almería.

Detección automática de deslizamientos

Las imágenes de sensores remotos (fotografías aéreas, imágenes de satélite e imágenes de radar) constituyen una fuente de información en la estimación de la susceptibilidad a roturas de laderas. Las fotografías aéreas son el producto más utilizado dentro de los sensores remotos, mediante la técnica de fotointerpretación. Las imágenes de satélite se han utilizado desde mediados de los 70 en el estudio de deslizamientos (Mantovani et al., 1996). En las últimas décadas diversos autores han utilizado imágenes de sensores remotos (LANDSAT I, SPOT, etc.) para identificar movimientos de masa (Gagon, 1975; McDonald y Grubbs, 1975; Sauchin y Trench, 1978; Stephens, 1988; Huang y Chen, 1991; Vargas, 1992; Leroi et al., 1992; Scanvic y Girault, 1989; Scanvic et al., 1990), aunque en todos estos casos los deslizamientos no son reconocidos individualmente a partir de las imágenes, si no que son detectados a partir de las condiciones del terreno asociadas con ellos, como litología y diferencias en la vegetación y la humedad del suelo (Mantovani et al., 1982).

Parámetros como la vegetación o la cercanía a principales discontinuidades se han derivado de imágenes satélite para utilizar como factores relacionados con la estabilidad en el análisis de susceptibilidad (Gökceoglu y Aksoy, 1996). Scanvic et al. (1992) demostró que el análisis estereoscópico de imágenes SPOT mejoraban la detección de deslizamientos. Con las nuevas capacidades de los SIG se ha podido integrar datos de sensores remotos en los SIG para evaluar la susceptibilidad y la peligrosidad a roturas (Rengers et al., 1992; Soeters et al., 1991; Carrara et al., 1991; etc).

Diversos intentos se han llevado a cabo para detectar y cartografiar deslizamientos utilizando datos de alta resolución como SAR ERS-1 (12.5 m) y JERS-1 (18m) con resultados poco satisfactorios (Vargas Cuervo y Chorowicz, 1994 a y b; Chorowicz et al., 1995; Rouzeau et al., 1995). Chorowicz et al (1998) cartografiaron deslizamientos a partir de imágenes SAR ERS-1 (12.5 m) y JERS-1 (18 m) utilizando simulación estereoscópica, comparando los resultados con cartografía previa de campo complementada con sensores remotos ópticos. Los autores concluyen que aun cuando las características de los deslizamientos fueran apenas perceptibles en imágenes SAR simples, podrían observarse en imágenes SAR estereo simuladas. Nagarajan et al. (1998) utilizaron datos de sensores remotos multitemporales (antes y después del fenómeno) para evaluar la peligrosidad a deslizamientos. La detección de áreas deslizadas se realizó a partir de las características espectrales de la vegetación y la humedad de los materiales.

Freitag y Noverraz (2000) describen un primer intento de detectar grandes deslizamientos de forma automática a partir de un MDE generado de un mapa topográfico detallado. El procedimiento se basa en detectar características geomorfológicas típicas de deslizamientos mediante perfiles de ladera delineados sobre el DEM (al que los autores llaman modelo numérico del terreno) siguiendo la línea de máxima pendiente y también la dirección del valle (figura 1.4). Los perfiles se realizan a distintas orientaciones y con un espaciado uniforme entre ellos. Con el método se intenta detectar anomalías de la ladera que son establecidas cuantitativamente mediante valores límite críticos utilizados para dividir el perfil en vectores perteneciente a distintas anomalías o partes de un deslizamiento.

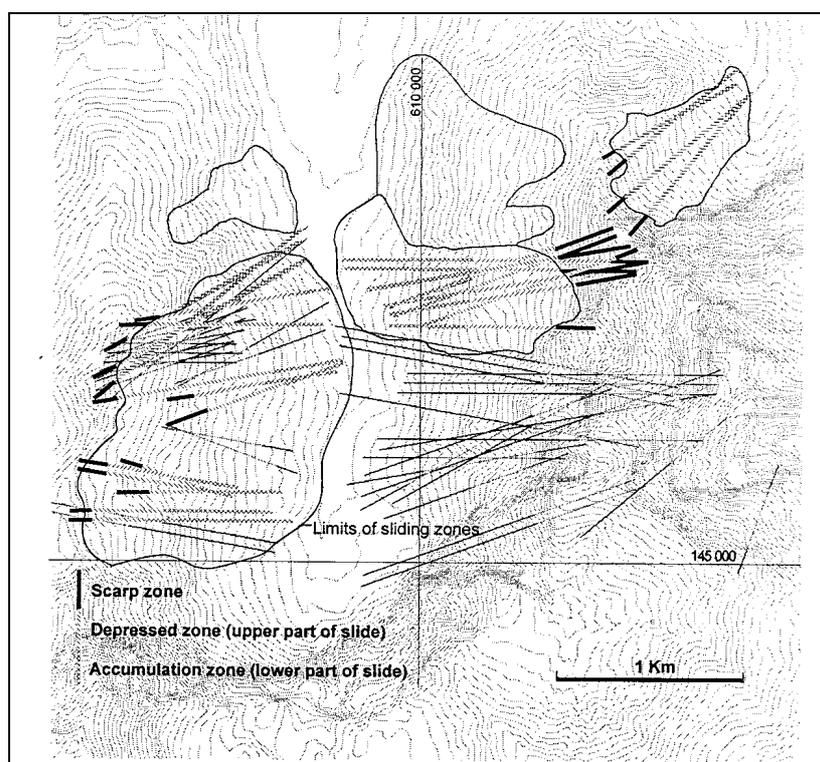


Figura 1.4: Análisis automático de deslizamientos de una región cerca de Adelboden (canton de Bern) considerando unos valores límites concretos para la zona de escarpe, la zona deprimida y la de acumulación (Freitag y Noverraz, 2000).

Para Mason et al. (2000) los deslizamientos actuales y futuros se pueden predecir e identificar con imágenes de sensores remotos a partir de modificaciones directas de la superficie del terreno como evidencias directas, o a partir de evidencias indirectas del suelo y la vegetación (figura 1.5). Los autores estudian corrientes de derrubios y deslizamientos traslacionales en un zona de Piemonte (Italia) con imágenes Landsat TM de distintas bandas. Los deslizamientos traslacionales son difíciles de detectar pero se pueden relacionar con las características espectrales del óxido de hierro en el suelo que, a su vez, pueden evidenciar la influencia de la fracturación y el flujo de agua en la iniciación de este tipo de deslizamientos. Las corrientes de derrubios son espectralmente muy diferentes a los deslizamientos traslacionales. Los autores añaden que las reducidas dimensiones de algunos movimientos hacen que los actuales sensores remotos no puedan proveer de información detallada sobre el deslizamiento.

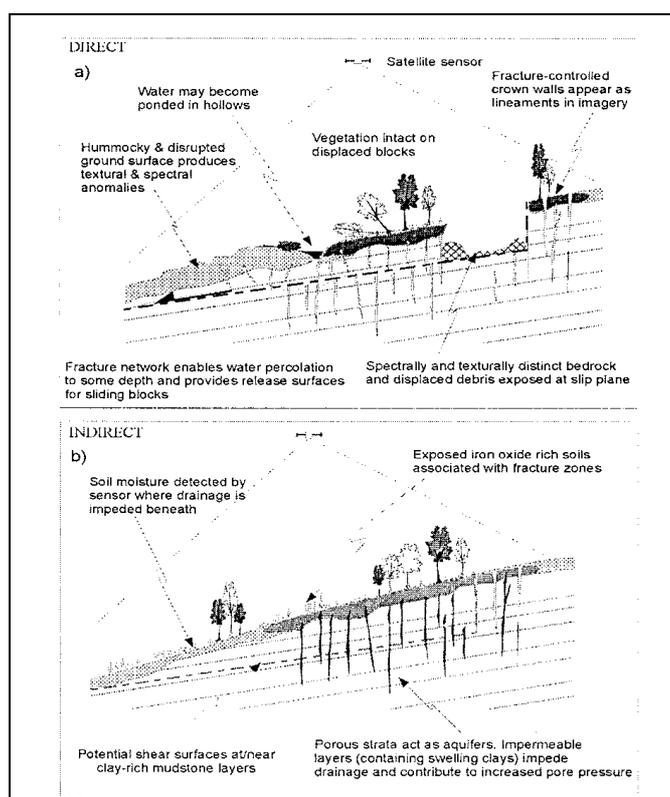


Figura 1.5: Vista esquemática de satélite de objetivos de deslizamientos: a) evidencia directa: ha ocurrido un deslizamiento y se ha modificado la superficie topográfica; b) evidencia indirecta: la topografía no está modificada, los contenidos de óxido de hierro, minerales arcillosos y humedad en el suelo dan una indicación de las condiciones que conllevan inestabilidad de ladera por debajo de ellas (Mason et al, 2000).

Ramli et al. (2000) han utilizado datos de imágenes ATM (Airbone Thematic Mapper Imagery) con resolución 1m combinados con un MDE (obtenido a partir de fotos aéreas escala 1:5.000 –fotogrametría analítica- e interpolado con krigging a 5m) que pueden permitir una rápida y precisa cartografía de deslizamientos relictos. Combinando algunas bandas de ATM encima del MDE se puede identificar morfologías asociadas a deslizamientos como bloques inclinados, lóbulos y cursos de agua. La desventaja son las sombras que pueden degradar seriamente la calidad de la imagen. La manipulación de la imagen se realizó con ERMAPPER.

Estudios con sensores remotos aéreos de deslizamientos han reconocido la importancia de las bandas infrarojas en la cartografía de características de deslizamientos (Eyers et al., 1995; Mason et al., 1995; Hervás y Rosin, 1996; Murphy y Inkpen, 1996; Whitworth et al., 2000). Características espectrales similares se han encontrado entre deslizamientos activos y latentes en una zona de Broadway (UK), diferenciándose de deslizamientos relictos a partir de imágenes ATM (*Airbone Thematic Mapper*) según Whitworth et al. (2000). Garland (2000) ha utilizado la aplicación de Fotografías Aéreas Estereo Oblicuas, tomadas desde un helicóptero, como método rápido para valorar el riesgo asociado a terraplenes y taludes de vías férreas. Si las fotos se pueden tomar digitalmente ello se puede introducir en un SIG para valorar y gestionar la base de datos de cara al mantenimiento de las vías férreas. Con el análisis estereográfico se estima en primer lugar la susceptibilidad a roturas de los taludes y terraplenes en una etapa previa a la valoración del riesgo.

Las propiedades de los materiales actuales de un deslizamiento se pueden utilizar para calibrar datos de sensores remotos archivados según Gibson et al. (2000). El proceso podría permitir la medida de estas propiedades en el pasado y a partir de aquí ayudar en la auscultación del deslizamiento durante el periodo de tiempo cubierto por el archivo. Los autores utilizan imágenes ATM (*Airbone Thematic Mapper*) de 1995 con una resolución de 1m de pixel, en un área de Gran Bretaña con deslizamientos recientes y relictos. En 1999 se recogieron muestras en el campo para ensayos de laboratorio, que junto con la observación de campo, permitieron establecer el contenido en humedad del suelo, el tipo de suelo y la capacidad portante. Posteriormente compararon estos resultados digitalizados con las imágenes.

Para Davis et al (2000) la visualización 3-D de ortofotos utilizando MDE permite mejorar la interpretación de deslizamientos y muestra relaciones entre las características del terreno (tipo de roca, suelo y vegetación) y el relieve. La cartografía virtual de deslizamientos se puede utilizar para identificar localidades específicas para medidas de campo detalladas. La vista 3-D de imágenes de sensores remotos sobre MDE permiten el movimiento sobre las imágenes capacitando al investigador para identificar riesgos geológicos, así como parámetros geomorfológicos relacionados con los deslizamientos.

Reconstrucción de la topografía previa al deslizamiento

Thurston y Degg (2000) han reconstruido la topografía previa a unos deslizamientos mediante el uso de un área de influencia (*buffer*) alrededor de un deslizamiento, utilizando la elevación de algunos puntos de este para interpolar, con una Red de Triángulos Irregulares (*TIN*), la superficie del terreno previa del área del deslizamiento (figura 1.6). Según los autores esto es posible en el caso de disponer de un buen MDE con una resolución adecuada al tamaño de los deslizamientos.

1.8.2. Aplicación de Redes Neuronales Artificiales (ANN)

Los procesos geológicos (como un deslizamiento) dependen de una gran variedad de parámetros que a menudo son conocidos de forma incompleta o totalmente desconocidos. Normalmente la relación entre los factores que controlan el proceso y la observación de éste es una relación no lineal. Las técnicas estadísticas normalmente utilizadas para analizar los deslizamientos (regresión múltiple, análisis discriminante y factorial, predicción lineal, etc) requieren una relación lineal entre los parámetros del modelo y las observaciones. Una

alternativa a los métodos basados en estadística lineal son las técnicas desarrolladas en el contexto de la Inteligencia Artificial sobretodo las Redes Neuronales Artificiales (ANN *Artificial Neural Networks*) del tipo de perceptrones multicapa (MLP *multilayer perceptrons*). Las Redes Neuronales intentan emular el reconocimiento humano y están basadas en un modelo del cerebro humano utilizando ciertos conceptos de su estructura básica. Los perceptrones multicapa pueden ser usados para crear una función de cartografía que relaciona un vector X de factores al vector de posible fenómeno de deslizamiento (Y). En términos de clasificación el perceptron relaciona los factores a cierto fenómeno característico (Alenia, 1999).

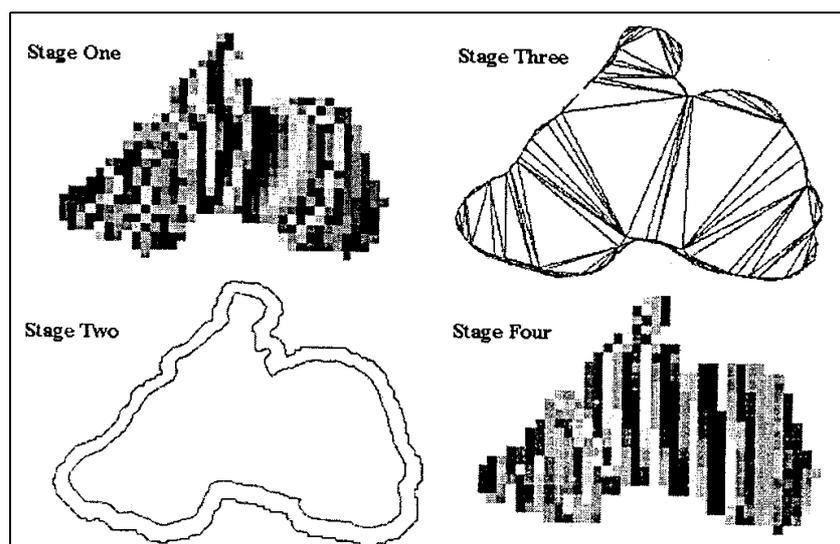


Figura 1.6: Procedimiento del modelo de reconstrucción de deslizamientos. Etapa1: MED del deslizamiento; etapa2: selección de valores de elevación alrededor del deslizamiento; etapa3: creación y reconstrucción del terreno utilizando un TIN (red de triángulos irregulares); etapa 4: MDE reconstruido del deslizamiento (Thurston y Degg, 2000).

Las Redes Neuronales Artificiales han sido aplicadas con éxito en el reconocimiento de objetos militares, procesamiento de imágenes, control de robots y en ingeniería civil (Pande y Petruszczak, 1995; Siriwardane i Zaman, 1994). También se han aplicado en problemas de inversión y clasificación en geofísica (Langer et al., 1996). La utilización de redes neuronales para predecir desplazamientos y velocidades de movimientos de ladera ha sido utilizada por Mayoraz et al. (1996) en dos deslizamientos de Suiza y Francia. Vulliet y Mayoraz (2000) han utilizado Redes Neuronales y un modelo mecánico (talud infinito) para predecir el Factor de Seguridad, velocidad de desplazamiento y presiones de poros en un deslizamiento instrumentado en Francia.

Al-Tuhami (2000) aplica un modelo de red neuronal *back-propagation* para calcular valores del factor de seguridad. El autor aplica un modelo de elementos finitos no lineal (modelo de suelo de Mohr-Coulomb visco-plástico) para la fase de aprendizaje. Posteriormente se comparan los resultados con modelos tradicionales y con modelos de elementos finitos, concluyendo que es un modelo adecuado para el cálculo del factor de seguridad y que el método tiene buena capacidad de aprendizaje de asociaciones complejas entre modelos de entrada y salida. Según el autor la mejor ejecución de la red neuronal depende mucho de la configuración y los ejemplos de aprendizaje. La técnica de la red neuronal es un camino directo para calcular los factores de seguridad y no depende de la forma de la superficie de rotura.

1.9. Planteamiento del problema

La inversión en tiempo y dinero en la captura de datos para realizar un análisis de susceptibilidad a la rotura de laderas, es el primer obstáculo que se puede encontrar en un proyecto de evaluación de riesgo. Asimismo, la capacidad actual de los SIG y su disponibilidad en muchos organismos y empresas, ha incrementado su uso en muchas aplicaciones, siendo el campo del estudio de riesgos una de ellas. Con el avance en el desarrollo de algoritmos, actualmente se pueden derivar modelos del terreno de modelos digitales de elevaciones, permitiendo obtener de forma rápida datos digitales, en valores numéricos, sobre parámetros geométricos de una ladera, parámetros de visibilidad y características de la red de drenaje, entre otros. Ello puede simplificar enormemente la etapa de obtención de datos en un proyecto de análisis de susceptibilidad. También el avance en el tratamiento de imágenes de sensores remotos y su integración en un SIG permite reducir el coste de tiempo en la obtención de datos. Todos estos avances facilitan el estudio de grandes áreas, la regionalización del análisis de susceptibilidad, que de otro modo sería impensable de llevar a cabo.

La experiencia adquirida en estudios previos sobre los factores relacionados con la inestabilidad de ladera, debida a deslizamientos superficiales en zonas del Pirineo y pre-Pirineo catalán y andorrano (Corominas et al., 1988, 1991; Baeza, 1994), permite seleccionar factores de influencia conocida sobre la estabilidad de estas áreas. La mayor parte de estos factores pueden ser derivados de un MDE de forma rápida y sin coste de tiempo alguno. Esto implica una gran ventaja: la posibilidad de obtener datos de áreas extensas permitiendo la regionalización del análisis. El análisis estadístico multivariante de tipo discriminante ha demostrado ser una técnica útil en la estimación de la susceptibilidad a la rotura de una ladera (Carrara, 1983; Carrara et al., 1991; Baeza, 1994; Carrara et al., 1995; Dhakal et al., 2000; etc.). Asimismo, esta técnica se ha aplicado con éxito para deslizamientos superficiales del Pirineo utilizando datos recogidos en el campo (Baeza, 1994). La aplicación de la técnica discriminante, para el análisis de la susceptibilidad a roturas por deslizamientos superficiales utilizando SIG, debe permitir optimizar un análisis de este tipo, a la vez que facilita la regionalización del mismo.

Por otro lado, el uso de técnicas determinísticas para evaluar el factor de seguridad mediante SIG ha sido aplicado en distintos estudios (Van Westen, 1993; Luzi, 1995; Luzi y Pergalani, 1996; Leroi, 1996; Salkellariou y Ferentinou, 2001). En estos estudios se regionaliza el análisis, utilizando parámetros no siempre obtenidos del terreno que en algunos casos son estimados y extrapolados a buena parte del área de estudio. La imposibilidad de obtener algunos parámetros conlleva la aplicación del análisis determinístico (normalmente el método del talud infinito) utilizando distintos escenarios (condiciones geotécnicas del material y características de la zona saturada). La propia regionalización del análisis junto con la ausencia de datos precisos obtenidos de instrumentación de laderas, conduce a la imposibilidad de validar los resultados. La predicción de cualquier tipo de análisis (susceptibilidad, peligrosidad o riesgo) y sus resultados (en forma cartográfica o no) ha de basarse en una validación del procedimiento empleado y resultados obtenidos. Sin la validación, se desconoce el acierto de la predicción de cualquier análisis de susceptibilidad y, por tanto, su utilidad. Cabe recordar que un SIG permite el manejo de datos georeferenciados y facilita enormemente la producción de mapas. Los criterios y técnicas utilizados para realizar los mapas de susceptibilidad deben conocerse para valorar la fiabilidad del mismo.