



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS DE CAMINS, CANALS I PORTS.
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA DEL TERRENY I CARTOGRÀFICA.

***EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ROTURA Y LA MOVILIDAD
DE LOS DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES MEDIANTE EL USO
DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS MULTIVARIANTE***

TESIS DOCTORAL

Cristina BAEZA ADELL

Director: Jordi COROMINAS I DULCET

Barcelona, Septiembre 1994

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al personal del laboratorio de geotecnia del Departamento de Ingeniería del Terreno y en particular a José Álvarez y Tomás Pérez por la ayuda prestada.

A Ramón Peñaranda por iniciar la andadura en esta línea de trabajo y a Jordi Esgleas por hacerme más fácil el trabajo de campo.

A Josep M. Salvany al permitirme eludir otras obligaciones para realizar este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento a José Moya por su constante ánimo, pero esencialmente por su lucidez y dedicación en todo momento.

A Jordi Corominas, director de este trabajo, por sus interesantes aportaciones y sin el cual no hubiera sido posible su realización.

A Ignacio, por su paciencia y apoyo.

RESUMEN

El propósito del estudio que aquí se presenta se ha centrado en la evaluación del control que un grupo de factores geológico-geomorfológicos ejercen sobre las condiciones de rotura y sobre la movilidad de los deslizamientos superficiales. Con este fin se ha desarrollado una metodología que permite identificar zonas de laderas naturales que pueden ser afectadas por fenómenos de inestabilidad, inducidos por intensas precipitaciones. Concretamente los movimientos analizados corresponden a los producidos durante las lluvias de Noviembre de 1982 en el Pirineo Oriental.

Cada uno de los capítulos en los que se ha estructurado el estudio profundiza en alguno de los aspectos de la rotura y movilidad, que ayudan a la mejor caracterización de las condiciones de estabilidad de las laderas y, de este modo, en la determinación de la peligrosidad de deslizamiento.

El estudio incluye un inventario sistemático de las condiciones geológicas, morfológicas, de vegetación, etc. de la ladera, así como las características geométricas y morfológicas de los movimientos de masa de una amplia zona del Pirineo Oriental. Estos datos constituyen la base utilizada tanto en el análisis estadístico de los factores relativos a la estabilidad y evolución de laderas, como en la preparación posterior de mapas de susceptibilidad. Se han utilizado las técnicas multivariantes más apropiadas a las características de cada uno de los análisis llevados a cabo en el estudio. Por un lado, el análisis discriminante ha permitido obtener agrupaciones del comportamiento característico para cada tipología de movimiento a partir, fundamentalmente, de la morfometría del mismo. Este análisis permite además definir unas funciones de predicción de las condiciones de estabilidad de la ladera mediante el tratamiento contrastado de muestras que caracterizan una población estable y una inestable. Por otro lado, el análisis de regresión múltiple ha sido aplicado al estudio de la movilidad y en la estimación del alcance de deslizamientos superficiales de pequeño volumen.

El análisis morfométrico de los movimientos ha evidenciado la correspondencia entre los tipos morfológicos establecidos en campo y los mecanismos de rotura (desprendimientos,

deslizamientos rotacionales y planares) y de progresión (caída de bloques, flujos -coladas y corrientes de derrubios- y deslizamientos traslacionales) de los movimientos. La clasificación automática utilizando índices morfométricos ha permitido la agrupación de movimientos con características semejantes y comprobar la existencia de una distinta movilidad según el mecanismo de progresión. La constatación de una distinta movilidad ha motivado que en el análisis del alcance se hayan considerado las diversas tipologías por separado.

El análisis de la estabilidad y la estimación de la susceptibilidad a escala regional es conceptual y metodológicamente diferente a la de un estudio a escala local, donde suelen utilizarse los métodos de análisis de equilibrio límite. A escala regional la distribución espacial de los deslizamientos resulta del efecto combinado de diferentes factores tales como la pendiente natural, la cuenca vertiente, la densidad de vegetación, la morfología de la ladera, etc., según indica el análisis estadístico discriminante, el cual proporciona una cuantificación relativa de su contribución de acuerdo con su significación estadística.

Este análisis ha destacado que la pendiente natural en zona de rotura, la cuenca vertiente y la densidad de vegetación son factores principales en la localización de deslizamientos muestreados, mostrando una influencia menor pero estadísticamente significativa, el grosor de la formación superficial, el perfil transversal de la ladera y la pendiente hacia la cresta. Según lo anterior las zonas con mayor potencialidad al deslizamiento son aquellas que presentan elevadas pendientes, grandes superficies de cuenca e importantes acumulaciones de depósitos coluviales, actuando de manera contrapuesta respecto a la inestabilidad la presencia de vegetación, la morfología convexa de la ladera y la pendiente elevada hacia la cresta.

La altitud ha mostrado una cierta relevancia en el análisis de estabilidad, condicionando aparentemente la localización de deslizamientos. Se ha encontrado una relación entre la precipitación del 7-8 de Noviembre de 1982 y la altura topográfica de la zona de estudio que podría explicar la importancia y control que inesperadamente refleja el análisis sobre este último factor y la inestabilidad.

El factor litológico no se ha evidenciado como una variable con poder discriminante previsiblemente, debido a la similitud de los materiales, fundamentalmente limo-arcillosos de los niveles lutíticos y su contenido en la matriz de las formaciones superficiales, que constituyen la zona de estudio.

De los resultados del análisis se concluye la dificultad de establecer un conjunto de valores umbral de las variables, que determine las condiciones límite de la estabilidad. Esto es debido a que estas condiciones límite están controladas conjuntamente por todas las variables. Es decir, el comportamiento de una ladera y su grado de susceptibilidad depende

no sólo de una variable, ni se puede caracterizar ni predecir considerando cada una de ellas por separado.

La aplicación de la técnica discriminante ha permitido a su vez, diseñar varias funciones que son combinaciones lineales de los factores de mayor contribución y cuyo objeto es poder estimar la actual/potencial peligrosidad de deslizamiento de una zona. Su utilidad como herramienta de predicción ha sido verificada en una zona piloto mediante la comparación entre los resultados previstos (en términos de susceptibilidad a la inestabilización) y la realidad observada (existencia o no de deslizamientos). El proceso de verificación ha permitido extraer una serie de conclusiones sobre la validez de las funciones en sí mismas y de la metodología desarrollada para tal efecto.

Uno de los aspectos más complejos relativos al comportamiento y evolución de la ladera con el que se ha de enfrentar cualquier cartografía de riesgo de deslizamiento es el de la movilidad y alcance de la masa inestabilizada. Este estudio aporta mayor información sobre la influencia que muestran algunos factores propios del movimiento (mecanismo de progresión y volumen) y relativos a las condiciones del terreno (morfología, vegetación, etc..) sobre la movilidad de pequeños deslizamientos, contribuyendo a la mejora del conocimiento que actualmente se tiene sobre este tema. El análisis gráfico de los factores considerados, ha destacado el control que sobre la movilidad de los deslizamientos superficiales, ejercen los obstáculos locales del recorrido, debidos a la presencia de vegetación, siendo la propagación del movimiento mayor en zonas de praderas y matorral que en zonas boscosas muy pobladas, para un mismo volumen movilizado. Dicho análisis gráfico ha corroborado por otra parte los resultados obtenidos en el análisis de clasificación morfométrica (Capítulo 5) en el que se pone de manifiesto un comportamiento móvil diferenciado para cada tipología morfológica según el mecanismo de progresión del movimiento. Se ha observado que los movimientos de pequeño volumen ($<10^6\text{m}^3$) muestran una movilidad relativa expresada en términos del ángulo α (desnivel/distancia horizontal recorrida por el movimiento) principalmente controlada por el mecanismo de progresión, como consecuencia de la deformación y rozamiento que existe dentro de la masa y entre la masa y el terreno durante el desplazamiento. Así, los deslizamientos traslacionales (sólo disipan energía por rozamiento en la superficie de deslizamiento) han mostrado mayor movilidad que las corrientes de derrubios (en las que existe además rozamiento interno y deformación de la masa en avance) y éstas a su vez mayor que los desprendimientos (disipan gran energía al chocar con el sustrato y por fragmentación de los bloques).

A diferencia de los resultados obtenidos por otros autores (*Sheidegger, 1973; Hsü, 1975; David, 1982, etc..*) en este estudio no se establece una dependencia clara entre el volumen y el ángulo α del recorrido, lo que en este caso puede atribuirse a las pequeñas dimensiones de los movimientos considerados.

El análisis de regresión múltiple se ha utilizado, posteriormente, en el tratamiento conjunto de los diversos factores condicionantes de la movilidad, sobre una muestra depurada de la población. Eliminando el efecto de retención del material provocado por la presencia de vegetación y realizando un análisis separado de los movimientos según el mecanismo de progresión, se han obtenido unas funciones de estimación del alcance, expresado en términos de la distancia horizontal del recorrido. Los resultados obtenidos de la regresión señalan que los movimientos experimentan un mayor alcance con el incremento del volumen y la deformación de la masa durante el desplazamiento.

La influencia preponderante del volumen puede explicarse como derivada de los efectos producidos por el cambio de masa durante el recorrido y la consecuente transferencia de cantidad de movimiento a la parte de la masa todavía movilizada, como exponen *Van Gassen & Cruden (1989)*.

La dependencia que la distancia horizontal recorrida muestra respecto a la altura de caída se ajusta a lo argumentado por *Heim (1932)* cuando apuntó la influencia de esta última junto con la irregularidad del recorrido y el volumen de la masa movilizada, en la distancia recorrida por el movimiento.

Finalmente los resultados del presente estudio contribuyen a mejorar la metodología de evaluación de la potencialidad de rotura y alcance de los movimientos, con el propósito de hacer más objetiva, basada en datos cuantitativos y representatividad estadística, la definición de la peligrosidad frente a movimientos de ladera en la cartografía de riesgos naturales, permitiendo así una mayor y más clara aplicabilidad.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.

RESUMEN.

ÍNDICE.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

- 1.1. Planteamiento del problema.
- 1.2. Objetivos del trabajo.
- 1.3. Estructura de la presente memoria.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

- 2.1. Etapas de la metodología.
 - 2.1.1. Localización de las áreas problemáticas mediante fotografía aérea.
 - 2.1.2. Adquisición de datos de campo.
 - 2.1.3. Caracterización geotécnica de los materiales.
 - 2.1.4. Análisis de los datos.
 - 2.1.5. Aplicación de los resultados al estudio y evaluación de la susceptibilidad de deslizamiento.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

- 3.1. Descripción general del área.
 - 3.1.1. Características geológicas.
 - 3.1.1.1. Características geológicas de Andorra.

- 3.1.1.2. Características geológicas de l'Alt Berguedà y Solsonès.
- 3.1.2. Climatología y vegetación.
- 3.1.3. Precipitaciones torrenciales del Noviembre de 1982.
 - 3.1.3.1. Pluviometría e inestabilidad de laderas.
- 3.1.4. Litologías susceptibles y movimientos asociados.

- 3.2. Determinación de parámetros de campo.
 - 3.2.1. Parámetros del inventario.

- 3.3. Propiedades geotécnicas del inventario.
 - 3.3.1. Keuper.
 - 3.3.2. Facies Garumniense.
 - 3.3.3. Ilerdiense.
 - 3.3.4. Eoceno inferior.
 - 3.3.5. Depósitos cuaternarios.
 - 3.3.6. Características generales.
 - 3.3.6.1. Granulometrías y permeabilidad.
 - 3.3.6.2. Plasticidad y resistencia.

CAPÍTULO 4. TRATAMIENTO DE DATOS CON TÉCNICAS ESTADÍSTICAS. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS MULTIVARIANTE.

- 4.1. Selección de las técnicas multivariantes.

- 4.2. Principios de los métodos multivariantes aplicados.
 - 4.2.1. Análisis discriminante.
 - 4.2.2. Análisis de regresión múltiple.

- 4.3. Metodología de análisis.

- 4.4. Análisis de las variables originales.
 - 4.4.1. Variables cuantitativas.
 - 4.4.2. Variables cualitativas.

- 4.5. Interpretación de las variables.
 - 4.5.1. Variables cuantitativas.
 - 4.5.2. Variables cualitativas.
 - 4.5.3. Transformación cuantitativa de las variables nominales.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN MORFOMÉTRICA DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA.

- 5.1. Análisis de las variables explicativas.
 - 5.1.1. Selección de las variables para el análisis discriminante.
 - 5.1.1.1. Relación entre las variables. Análisis factorial.

- 5.1.1.1. Descripción e interpretación del análisis factorial.
- 5.1.1.2. Relación entre las variables y el tipo de movimiento.
- 5.2. Definición de la función discriminante.
 - 5.2.1. Aplicación del análisis discriminante a la morfometría de la zona de rotura.
 - 5.2.2. Aplicación del análisis discriminante a la morfometría de la zona de progresión.
 - 5.2.2.1. Análisis discriminante aplicado a flujos.
- 5.3. Síntesis y conclusiones.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO SOBRE LA ESTABILIDAD DE LADERAS NATURALES.

- 6.1. Análisis de las variables.
 - 6.1.1. Selección de las variables para el análisis discriminante.
 - 6.1.1.1. Relación entre las variables. Análisis factorial.
 - 6.1.2. Influencia de la litología sobre el conjunto de variables que caracterizan la ladera.
 - 6.1.3. Relación entre las variables y la estabilidad.
- 6.2. Definición de la función discriminante.
 - 6.2.1. Función discriminante de las variables que caracterizan la ladera. Contribución de la cobertera vegetal según Lnsoq.
 - 6.2.2. Función discriminante de las variables que caracterizan la ladera. Contribución de la cobertera vegetal según Tusr.
 - 6.2.3. Contribución de la altitud y de la orientación en la estabilidad de la ladera.
 - 6.2.3.1. Análisis descriptivo de la orientación y altitud.
 - 6.2.3.2. Relación entre las variables y la estabilidad.
 - 6.2.3.3. Definición de la función discriminante.
- 6.3. Síntesis y conclusiones.

CAPÍTULO 7. MOVILIDAD Y DISTANCIA RECORRIDA POR EL DESLIZAMIENTO.

- 7.1. Tipos de movimientos considerados.
- 7.2. Análisis de la movilidad.
 - 7.2.1. Descripción de las variables que definen los factores de control de la movilidad utilizados en el análisis.
 - 7.2.2. Análisis de los datos.
 - 7.2.2.1. Relación entre las variables. Representaciones bivariantes.
 - 7.2.2.2. Análisis de regresión múltiple.
 - 7.2.2.3. El volumen y las fuerzas de rozamiento como factores de control del alcance.
 - 7.2.2.4. Limitaciones de las funciones de regresión obtenidas para la estimación del alcance.

7.3. Síntesis y conclusiones.

CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD FRENTE DESLIZAMIENTO. APLICACIÓN DEL MÉTODO A UN ÁREA PILOTO.

8.1. Características del área piloto.

8.1.1. Situación geográfica.

8.1.2. Situación geológico-geomorfológica.

8.2. Evaluación de la susceptibilidad.

8.2.1. Bases del método predictivo.

8.2.2. Aplicación del método de predicción.

8.2.2.1. Adquisición de datos.

8.2.2.2. Proceso de datos.

8.2.2.3. Análisis de los datos.

8.3. Síntesis y conclusiones.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES GENERALES.

9.1. Conclusiones.

REFERENCIAS.

LISTA DE FIGURAS .

LISTA DE TABLAS.

**ANEJO I. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS DEL
INVENTARIO.**

ANEJO II. ENSAYOS DE LABORATORIO.

ANEJO III. MAPAS TEMÁTICOS.

ANEJO IV. LISTADO GENERAL DE VARIABLES.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos, como muchos otros procesos naturales, sólo llegan a ser considerados un riesgo cuando existe una amenaza sobre vidas humanas y propiedades. Si hasta ahora, la percepción de su peligrosidad entre la sociedad ha sido baja, es debido a que se trata de procesos aislados en el espacio que frecuentemente tienen lugar en zonas con baja densidad de población causando impactos que, con notables excepciones, son de pequeña escala y escaso dramatismo. Sin embargo, el problema ha surgido debido a que en las últimas décadas ha habido un notable incremento del número de personas y bienes que se encuentran bajo este tipo de riesgo como consecuencia de la creciente expansión urbanística hacia las áreas de montaña donde principalmente los movimientos de ladera tienen lugar con relativa frecuencia. El rápido aumento, en los últimos años, de la ocupación turística y actividades de ocio de alta montaña, ha contribuido a la creación de nuevas zonas residenciales, vías de comunicación y otras infraestructuras que, provocando cambios en las condiciones naturales del terreno, pueden llegar a tener efectos inestabilizadores, haciendo de este modo cada vez más elevado el riesgo en estas áreas.

Aunque algunas de las pérdidas derivadas de los deslizamientos son relacionadas directamente con la actividad de este tipo de fenómenos, mayoritariamente los episodios de movimientos de ladera están asociados a otro tipo de riesgos que ocurren simultáneamente, como por ejemplo con períodos de lluvias intensas, lo cual provoca que sea difícil especificar aquellos daños ocasionados exclusivamente por los deslizamientos, siendo amenudo atribuidos a las inundaciones.

Esto provoca que sea extremadamente difícil la obtención de datos con suficiente precisión y representatividad que puedan reflejar los daños y pérdidas ocasionadas por deslizamiento, así como la peligrosidad que suponen.

Los deslizamientos tienen importantes efectos sobre la economía local de las regiones. En

las zonas de alta montaña, la red de carreteras y vías férreas son imprescindibles para la comunicación de pueblos vecinos. Cuando éstos se interrumpen por deslizamientos o cualquier otro riesgo natural, pueden llegar a producir cuantiosas pérdidas directas o indirectas que provocan un fuerte impacto económico sobre la comunidad afectada. Sin embargo, este tipo de fenómenos naturales no sólo provocan pérdidas económicas, sino de forma trágica llegan a ocasionar la muerte (tabla 1.1).

Localidad	Fecha	Daños ocasionados
Capdella	Noviembre 1982	Viviendas arrasadas (3 muertos).
Caregué	Noviembre 1982	destrucción de la carretera y puente.
La Guingueta	Noviembre 1982	incomunicación del pueblo.
Pont de Bar	Noviembre 1982	destrucción del pueblo y carretera.
La Coma	Noviembre 1982	
Gòsol	Noviembre 1982	
Guixera	Octubre 1987	vehículos alcanzados (2 muertos).
La Massana. Andorra	Octubre 1987	vehículos alcanzados (2 muertos).
Camprodón	Mayo 1992	motocicleta (2 muertos).

Tabla 1.1. Movimientos de ladera en el Pirineo Catalán en los últimos 10 años (Corominas, 1993).

El impacto medioambiental es por lo general bajo, a menos que el fenómeno tenga gran extensión y se produzca sobre áreas altamente inestables. Sin embargo, la frecuencia en algunas áreas de movimientos de ladera, aún de pequeñas dimensiones puede tener graves consecuencias, ocasionando la pérdida de suelo, cambios en el sistema de drenaje y modificación del hábitat de la zona, induciendo en algunos casos a la desertización progresiva de la misma.

Con el objetivo de evaluar el impacto económico y social de los riesgos geológicos en España, *Ayala et al. (1987)* pusieron en marcha un proyecto siguiendo la metodología basada en el *Master Plan for California (Alfors et al., 1973)* modificando los criterios necesarios para su adaptación a la casuística española. El estudio indica que los deslizamientos son tras las inundaciones y la erosión, el riesgo geológico más serio en España, causando pérdidas que ascienden a casi 220 millones al año, lo que supone un 15.4% del total esperado por todos los riesgos naturales. La previsión de pérdidas debidas a movimientos de ladera en España,

según el estudio realizado para el período de 1986-2016, ha sido estimada en más de 765 mil millones de pesetas, según una hipótesis de riesgo medio, estando el 4.75% de la población expuesta a un elevado riesgo por este tipo de fenómenos. Según *Brabb & Harrod (1989)* en España han muerto al menos, 117 personas por deslizamiento.

Para mitigar el impacto provocado por este tipo de riesgo, algunos países como Francia, Canada y Suecia, entre otros, han desarrollado programas que comprenden desde la investigación de los procesos del deslizamiento, el desarrollo de métodos para delimitar las áreas potenciales hasta la selección y uso de técnicas para reducir la peligrosidad (*Brabb, 1991*).

La percepción y el conocimiento previo del peligro potencial permite la adopción de medidas con las que reducir los efectos de este tipo de riesgo. Sin embargo, aunque haya el convencimiento de la existencia de la peligrosidad, la evaluación del nivel de ésta no es una tarea sencilla debido a la misma complejidad del fenómeno, del cual todavía no se conoce en profundidad los mecanismos, así como los factores que condicionan la rotura y movilidad del deslizamiento.

Los métodos utilizados para el conocimiento de la peligrosidad de deslizamiento de laderas naturales y su evaluación son extremadamente diferentes a los de análisis de taludes. Aunque el cálculo de estabilidad de taludes ha evolucionado notablemente pudiendo determinar con gran fiabilidad la estabilidad del mismo, su aplicación sobre grandes extensiones de terreno para conocer la potencialidad de deslizamiento es totalmente prohibitivo en coste y tiempo, dada la intensidad y detalle que requiere este tipo de análisis.

El desarrollo de técnicas de evaluación de la peligrosidad a gran escala, ha estado dificultado por la complejidad y diversidad del fenómeno de inestabilidad de laderas. Los avances que puedan realizarse en este campo están así supeditados a los progresos que se realicen a su vez sobre la naturaleza del fenómeno y de este modo sobre las condiciones principales que contribuyen a su causa. Estas observaciones, reflejan que para proceder a la identificación de zonas potencialmente inestables y definir grados de peligrosidad y riesgo, es necesario basarse en una buena identificación de la naturaleza de los factores externos e internos desestabilizadores, su influencia y contribución.

Aún las dificultades que impone la diversidad de causas y tipos de fenómenos de inestabilidad, caracterizados por un gran espectro de tamaños que pueden evolucionar a diferentes velocidades y según diferentes mecanismos, se considera que los deslizamientos son uno de los riesgos geológicos que pueden ser más fácilmente predecibles a pequeña y mediana escala (*Leighton, 1976*). La predicción de deslizamientos se basa, según *Varnes (1984)* en:

- El principio del uniformismo, aplicado a la evaluación de la peligrosidad de deslizamientos, dice que las condiciones que indujeron en el pasado e inducen en el presente a la inestabilidad de las laderas, seguirán actuando de la misma forma en el futuro. De esta forma la estimación de futuras inestabilidades puede basarse en la evaluación de las condiciones que dieron lugar a roturas en el pasado.

Esta hipótesis de la que parten prácticamente todos los métodos de evaluación de la peligrosidad debe aplicarse con un carácter general, pues algunos factores como los cambios climáticos o la intervención humana pueden variar en el tiempo, modificando las condiciones de estabilidad de la ladera.

La evaluación de la peligrosidad, necesaria para poder establecer la probabilidad de rotura de la ladera (predicción de deslizamiento), ha sido el objeto de numerosos estudios, los cuales desarrollan diferentes métodos de trabajo para su estimación. Según *Hartlen & Viberg (1988)*, una buena estimación de la peligrosidad frente deslizamiento debe dar respuesta a las siguientes cuestiones básicas: tipo de movimiento, localización, volumen movilizado, alcance de la masa deslizada, momento en el que se producirá la rotura y velocidad a la que se desplazará. De todas estas cuestiones a continuación se procede a revisar aquellas que hacen referencia a la localización de áreas potencialmente inestables y alcance de la masa movilizada.

La localización de áreas potencialmente inestables es el primer paso en la predicción de deslizamientos. Los métodos comunmente utilizados varían desde análisis geomorfológicos a técnicas de tratamiento de datos.

Algunos de los estudios realizados, evidencian la potencialidad de las áreas con antiguos movimientos que no adquieren, contrariamente a lo que podría esperarse, unas condiciones de estabilidad, reactivándose en muchas ocasiones. *Kojan et al. (1972)* obtuvieron, a partir del estudio de corrientes de derrubios ocasionados por unas lluvias intensas en 1969 en el Sur de California, que el 81% de los deslizamientos se localizaban en antiguas roturas. Analizando las zonas afectadas por las lluvias de Noviembre de 1982 en el Pirineo Catalan, se pudo determinar que algunos de los grandes movimientos ocurridos eran reactivaciones de antiguos movimientos (*Corominas, 1986*). Esto confirma la importancia que tiene, para la evaluación de la peligrosidad, el estudio e identificación de áreas con antiguos deslizamientos, las cuales pueden ser según el principio del uniformismo, mencionado anteriormente, zonas potenciales de deslizamientos en el futuro.

El análisis para la identificación de áreas deslizadas se efectúa mediante: el estudio de las formas de relieve (aparición de grietas en depósitos y sustrato, cambios de tonalidad, modificación de la red de drenaje,...), estudio de las formas y estructura del depósito (formas abombadas o lobuladas en movimientos de tipo flujo, organización caótica y poca

clasificación del material en algunos tipos de movimientos,...) o mediante la observación de la vegetación como indicador de actividad (anomalías en el crecimiento, flora característica de ambientes hidromorfos que se instala en depresiones del terreno provocados por movimientos rotacionales,...)(Corominas, 1986).

La evaluación de la inestabilidad potencial de una ladera puede ser analizada mediante el contraste con laderas que presenten las mismas características litológicas, estructurales, etc... Las características morfológicas de la ladera han sido utilizadas en muchos estudios como indicadores de la inestabilidad. *Reneau et al. (1990)* mediante el estudio detallado de algunos depósitos coluviales del Norte de San Francisco en California, mostraron que la topografía cóncava favorecía la acumulación de este tipo de depósitos, jugando un importante papel en la concentración de las aguas superficiales, facilitando la generación de corrientes de derrubios. Otros autores han realizado estudios comparativos de laderas de igual litología y región geográfica para establecer umbrales de pendiente para la estabilidad (*Skempton, 1952; Brand & Hudson, 1982; Crozier, 1984; Sidle et al., 1985*). Los efectos erosivos que provoca la continua deforestación de algunas áreas es otra de las causas que puede inducir a la inestabilidad de las laderas (*Rice & Lewis, 1991*). La superficie de la cuenca vertiente, se ha considerado como uno de los factores más importantes relacionados con la formación de deslizamientos superficiales. *Hatano y Okimura (en Oyagi, 1984)* reflejaron la influencia del ángulo de la pendiente de la ladera (θ) y el área de la cuenca (a, A) mediante unos índices críticos (F) con los que evaluar la susceptibilidad de la ladera. Las funciones definidas eran las siguientes:

$$\text{índice de Hatano } F = a^{0.33} \cdot \tan \theta$$

$$\text{índice de Okimura } F = A^{0.22} \cdot \tan \theta$$

siendo a el área cuenca de un punto determinado de la ladera y A la longitud media del área cuenca (obtenida a partir de la relación entre el área y ancho de la parte baja de la cabecera de la zona de rotura). Los valores críticos del índice de Hatano obtenidos para las zonas deslizadas de Takedeira en la región de Mizunami, excedían a 3.4, siendo el valor del índice de Okimura en el Monte Rokko en Tennudeni de 2.96.

La influencia de la escorrentía superficial fué evaluada por *Ogawa & Kawamura (1989)* mediante un índice topográfico que utilizaban en un método de predicción de deslizamientos.

Debido a que son numerosos los factores que combinados favorablemente contribuyen a inestabilizar las laderas y provocar consecuentemente la formación de deslizamientos, muchos autores han utilizado técnicas de tratamiento de datos para la evaluación de la peligrosidad. Estas técnicas tratan de incorporar una mayor y más completa información, debido a su posible aplicación sobre el estudio conjunto de los factores, permitiendo a su vez, un tratamiento automatizado que facilita posteriormente su utilización para la confección de

mapas de peligrosidad.

Basándose en la medición de parámetros de fácil y rápida obtención que representen a los diversos factores que condicionan la rotura, algunos autores establecen relaciones que combinan dichos factores para evaluar la susceptibilidad relativa de deslizamiento. *Stevenson (1977)* mediante la utilización de factores tales como la plasticidad del material (P), posición del nivel freático respecto al plano de rotura (W), ángulo del talud (S), complejidad del talud (C) y uso del terreno (U), definió la peligrosidad (R) como:

$$R = (P+2W)(S+2C)U$$

indicando que valores de R superiores a 60 eran propios de roturas y los situados entre los 50 y 60 tenían una inestabilidad potencial.

Uno de los últimos trabajos realizados mediante la utilización conjunta de factores es el de *Anbalagan (1992)* aplicado a la zona de Kathgadam-Nainital en la India. En este trabajo se desarrolla una metodología para la estimación cuantitativa de la peligrosidad, mediante la utilización de factores causales relativos a la morfología de la ladera, uso del suelo, cobertera vegetal, condiciones del agua subterránea, etc... A cada factor le asigna un valor según su contribución a la inestabilidad de la ladera. El resultado de la suma de los valores de los seis factores analizados es el denominado TEHD, estimación global de la peligrosidad, en base al cual se definen cinco categorías, desde la de muy baja (VLH) hasta la de muy alta peligrosidad (VHH).

Metodologías semejantes han sido desarrolladas por otros autores como *Sinclair (1991)* o *Mora et al. (1994)*.

La automatización de la información en bancos de datos ha permitido la aplicación de técnicas estadísticas de tipo multivariante en el análisis de la peligrosidad. Uno de los trabajos clásicos en la aplicación de estas técnicas es el que *Jones et al. (1961)* realizaron a partir de los movimientos ocurridos en los depósitos de las terrazas que bordean el lago Franklin, Columbia. Analizaron más de 300 movimientos tratados independientemente según el tipo de deslizamiento y de los cuales se tomaron parámetros cuantitativos y cualitativos referentes a la litología, condiciones hidrológicas, pendiente, porcentaje de área del talud sumergida, altura talud, afecciones antrópicas, etc. Posteriormente a la recogida muestral se utilizaron técnicas de análisis discriminante para determinar qué zonas de las que bordeaban el lago tenían mayor probabilidad de deslizarse.

De los parámetros analizados de las 160 áreas deslizadas frente a 160 áreas estables, se definió una función discriminante que identificaba las áreas potencialmente inestables. La función discriminante resultante, tras la transformación de alguna de las variables fué:

$$y = 0,00216 \cdot \log x_1 + 0,00335 \cdot \log x_2 + 0,00944 \cdot \log x_3 + 0,00673 \cdot \log x_4$$

siendo y = función discriminante.
 x_1 = pendiente.
 x_2 = % área sumergida.
 x_3 = altura del talud.
 x_4 = presencia/ausencia agua subterránea.

El rango de valores de la función oscila entre -0,0019 y +0,0404, representando los valores de y bajos a taludes estables y los elevados a deslizamientos. El valor discriminante mínimo, calculado con una P de 0,01 que definía estabilidad era $y < 0,0106$; posteriormente se definieron unos rangos de la función que representaban la susceptibilidad relativa al deslizamiento : $0,0106 < y < 0,0142$ relativamente estable y $y > 0,0142$ probabilidad alta de ser afectado por deslizamiento.

Una metodología similar de estimación cuantitativa de la susceptibilidad fué la utilizada por *Neuland (1976)*. Para seleccionar las variables más significativas del conjunto de 31 parámetros iniciales, utilizó la técnica estadística de análisis factorial por componentes principales y posteriormente determinó aquellas que podían ser las variables de predicción. La función discriminante fué:

$$y = 0,1140 \cdot 10^{-4} \text{HN}^2 - 0,2048 \cdot 10^{-2} \text{WT}^{2/3} + 0,8119 \cdot \log(\text{FL}+10) - 0,5838 \cdot \log(\text{EIND}+10)$$

siendo y = función discriminante.
 HN = pendiente (°).
 WT = profundidad de las raíces.
 FL = área cuenca (km^2).
 EIND = densidad del suelo.

La proximidad a los valores de los centroides del conjunto de muestras estables (0,1781) e inestables (0,19349) obtenidos de la función, determinan el grupo al que pertenece la muestra. El modelo definido mediante la combinación de parámetros de la función, tuvo una predicción del 87% con los datos originales. Posteriormente la aplicación de la función a otras 100 muestras reafirmó la fiabilidad del modelo prediciendo un 95% del grupo de inestables y un 73% de estables.

A diferencia de los estudios realizados por Jones, los modelos discriminantes determinados por Neuland no tenían en cuenta el tipo de deslizamiento, analizándolos conjuntamente.

Carrara (1983a,b) desarrolló modelos multivariantes de tipo discriminatorio para evaluar la peligrosidad de deslizamientos en Calabria, Italia. Utilizando un conjunto de variables

geológicas y geomorfológicas que definían las pequeñas parcelas en las que estaba dividida la zona de estudio, se obtuvieron diversos modelos, la predicción de los cuales iba de un 73% a un 83%.

La aplicación de estas técnicas multivariantes fueron utilizadas por *Haigh et al. (1988)* a partir de movimientos ocurridos a lo largo de las carreteras recientes en el Himalaya. Determinó qué parámetros (pendiente, altura y ángulo del talud, cobertera vegetal, resistencia del material, etc) estaban relacionados con el desarrollo de los movimientos de ladera. Los análisis se realizaron diferenciando los deslizamientos de los desprendimientos, con una predicción del 92% y 80% respectivamente, siendo las variables más significativas la continuidad de la junta (en desprendimientos) y cobertera arbórea (%), el espesor de la formación superficial así como las variables referidas a la pendiente (en deslizamientos).

Uno de los trabajos más recientes realizados con técnicas de análisis discriminante es el de *Mulder (1991)*. Con el objetivo de determinar áreas potencialmente inestables, realizó un estudio en Barcelonnette, sur de los Alpes franceses. Mediante la parcelación del terreno (500x500m) y la obtención de parámetros que cubrían aspectos tanto geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, vegetación y morfometría del movimiento de masa de cada unidad, aplicó técnicas estadísticas obteniendo un modelo discriminante con una predicción del 87% que se definió por los parámetros siguientes:

$$y = 0,57A + 0,21B - 0,29C - 0,45D + 0,28E + 0,15F + 0,13G$$

- siendo
- A: terracitas (steps /terraces).
 - B: profundidad máxima de las raíces.
 - C: área del meso relieve.
 - D: tipo de material.
 - E: pendiente máxima.
 - F: grosor de la zona de rotura.
 - G: área forestal.

Las técnicas de regresión múltiple también han sido frecuentemente utilizadas para determinar la contribución de los parámetros que discriminan entre áreas estables o inestables. De entre los autores que han desarrollado modelos de regresión, se encuentran *Carrara (1983a,b)* y *Kinlong & Tongzhen (1988)*. Estos últimos evalúan la susceptibilidad relativa a partir de 21 variables extraídas de 9 factores (altitud, orientación, pendiente, litología, buzamiento estratificación o esquistosidad, tipo de falas, ángulo entre la dirección de esquistosidad o estratificación y la superficie de la ladera, desnivel de la ladera y tipo de formación rocosa en el pie de la ladera) que obtienen de cada una de las celdas del sistema de malla regular de la zona de estudio en China.

El Pirineo Oriental, como una de las zonas más afectadas en España por fenómenos de inestabilidad de laderas, está siendo el área de aplicación de los estudios que *Corominas et al.* (1988, 1992) están llevando a cabo. Las técnicas de análisis multivariante de tipo factorial han sido aplicadas, con buenos resultados, para determinar la influencia que algunos de los parámetros relativos a la geometría de la ladera así como el uso del suelo, tienen en el desarrollo de deslizamientos superficiales, el conocimiento de los cuales es de gran importancia en la evaluación de la peligrosidad.

Como se desprende de lo expuesto anteriormente, los métodos de evaluación de la peligrosidad llegan a ser más complejos y a su vez más precisos, cuanto mayor es el número de factores considerados para el análisis.

Toda la información obtenida tras la aplicación de estas técnicas y métodos desarrollados suele presentarse mediante la confección de mapas de peligrosidad, los cuales reflejan la susceptibilidad o potencialidad de deslizamiento de la zona. Los procedimientos seguidos para la confección de estos mapas difieren según la metodología empleada en la determinación de la peligrosidad.

Los mapas de inventario de deslizamientos son los documentos más sencillos y suelen obtenerse mediante fotointerpretación y reconocimiento de campo. Constituyen la base de un estudio más detallado o la base de datos a partir de la cual extrapolar los valores estimados de la estabilidad de laderas, proporcionando un índice de susceptibilidad relativa del terreno. Algunos de estos mapas además de localizar la inestabilidad, informan sobre la tipología del movimiento, como los realizados por *Campbell (1980)* en la zona de Point Dum Quadrangle (California) al identificar la inestabilidad según la clasificación de campo de *Varnes (1958)*.

En España fué *Macau (1963)* quien realizó un mapa de estas características en la provincia de Granada. Más recientemente, y como consecuencia de las lluvias acaecidas en Noviembre de 1982, *Clotet & Gallart (1984)* realizaron, para el Servicio Geológico de la Generalitat de Catalunya, un mapa de localización e identificación de los deslizamientos producidos en la zona del Solsonès y Alt Berguedà.

A partir de los mapas de inventariado, pueden derivarse otros tipos de documentos como son los de densidad de movimientos, los cuales pueden ayudar a definir (según la escala) diferentes categorías de susceptibilidad de deslizamiento, como hicieron *Radbruch-Hall et al. (1976)* en Estados Unidos.

El mapa de inventariado requiere, indispensablemente, la localización de todos los deslizamientos de la zona para la estimación fiable de la peligrosidad, lo cual restringe su

área de aplicación, haciéndose prácticamente inviable para el reconocimiento de grandes extensiones de terreno.

Los mapas geomorfológicos presentan mayor información que los anteriores, pues incluyen además de la localización e identificación del deslizamiento, una descripción e identificación de las formas del relieve con la interpretación de los procesos con los que está relacionado. Por esto, la creación de mapas geomorfológicos exige un conocimiento profundo de la morfología del paisaje así como una correcta labor de interpretación. Estos sirven de base para la confección de mapas de susceptibilidad y riesgo.

El análisis geomorfológico ha servido de base para la confección del mapa de riesgos a escala 1:50.000 del Pirineo Catalán (*Corominas, 1986*), así como los realizados en Andorra, concretamente en los Valles del Valira d'Orient y Grant Valira (*Corominas, 1989*) o los de la Cuenca del Valira del Nord (*Corominas, 1991*). En todos ellos, los criterios utilizados para definir el riesgo han considerado factores tales como el tipo de movimiento, sus dimensiones, grado de actividad, características morfológicas circundantes, litología y disposición estructural.

Los criterios utilizados para la confección de los mapas de riesgo son diferentes según los autores, los cuales introducen un grado de subjetividad que limitan en la práctica, la posibilidad de comparar documentos que no hayan sido producidos por la misma persona.

Un tercer tipo de mapas son los basados en la combinación de diversos factores. Estos tratan de incorporar una mayor información que permita efectuar una estimación del grado de peligrosidad mediante criterios objetivos. La mayoría emplean para sus confección el concepto de superposición o integración espacial de información discreta o de mapas que representen cada uno de los factores que contribuyen en la evaluación de la estabilidad de laderas. Comunmente en los mapas se representan rangos de pendientes, características geomorfológicas del deslizamiento, litología, estructura, condiciones hidrológicas, etc... Para el análisis conjunto de los factores, algunos autores utilizan métodos basados en la parcelación de la zona de estudio, definiendo sistemas de mallas regulares que dividen el paisaje en áreas de dimensiones conocidas. Cada parcela integra un conjunto de características topográficas, geomorfológicas, de vegetación, etc... que reflejan unas condiciones de estabilidad específica y diferenciable de la adyacente.

Entre los autores que han aplicado este tipo de técnicas se encuentra *Brabb et al. (1972)*, quienes realizaron un mapa de susceptibilidad frente a deslizamientos en San Mateo, California. Para la consecución del mapa, definieron en cada parcela tres parámetros: distribución de deslizamientos, la pendiente y la litología. De la superposición de los tres mapas temáticos definió la susceptibilidad relativa mediante seis clases, de la clase I que representaba entre un 0%-1% del área cubierta por depósitos deslizados a la clase VI con

54%-70%.

Nilsen et al. (1979) confeccionaron un mapa de susceptibilidad de deslizamientos a escala 1:125.000 en la región de la Bahía de San Francisco, utilizando las mismas técnicas de superposición de información mediante la creación de mapas temáticos. Nilsen introdujo pequeñas modificaciones en la metodología utilizada al superponer el mapa de pendientes con el de depósitos deslizados con el fin de crear un mapa de estabilidad relativa de pendientes. Este último se combinó con el de litologías, determinándose el grado de estabilidad en función de la pendiente.

Cuando se dispone de un número suficiente de datos, ya sean de tipo cualitativo o cuantitativo, pueden aplicarse con buenos resultados los métodos estadísticos para la estimación de la peligrosidad. La confección de los mapas basados en el tratamiento de datos ha sido extendida en las últimas décadas por su utilidad en la aplicación de grandes extensiones de terreno.

La posibilidad de digitalizar los valores de muchos de estos parámetros que pueden presentar gran variabilidad espacial, facilita la confección de estos mapas además de darles un significado más válido, puesto que se puede obtener la contribución relativa de ciertos parámetros que hasta entonces no se tenían en cuenta en la determinación de las áreas potencialmente inestables.

Uno de los pioneros en la producción automatizada de mapas de peligrosidad fué *Carrara et al. (1978)* aplicados en la zona de Ferro, Calabria. La información obtenida del inventario de movimientos, trabajo de campo e interpretación fotoaérea además de la información relativa a la geología, geomorfología e hidrología de la zona de estudio, fué recogida en una base de datos. La digitalización por la técnica de parcelación (200x200m) permitió analizar estadísticamente los atributos introducidos y su contribución para la determinación de áreas inestables.

En España, la aplicación de nuevas metodologías mediante SIG (Sistemas de información geográficos) como las empleadas por *Chacón et al. (1992)* han permitido un avance importante en la creación de cartografías regionales de movimientos de laderas. Los SIG permiten además de poder trabajar con una base de datos activa, realizar la parte de análisis y modelización al mismo tiempo. La obtención de informes cruzados entre los diferentes mapas temáticos que permite la utilización del SIG hace posible para cada litología, calcular los incrementos en porcentaje de la superficie de rotura (δR) y la total (δT) en cada pendiente, obteniéndose así la relación $\delta R/\delta T$ que permitirá para cada litología y pendiente determinar el grado de susceptibilidad. Según los valores resultantes de esa relación, los autores definen cuatro niveles de susceptibilidad desde baja ($\delta R/\delta T < 1$) a muy alta ($\delta R/\delta T > 2$). (Fig. 1.1a,b,c).

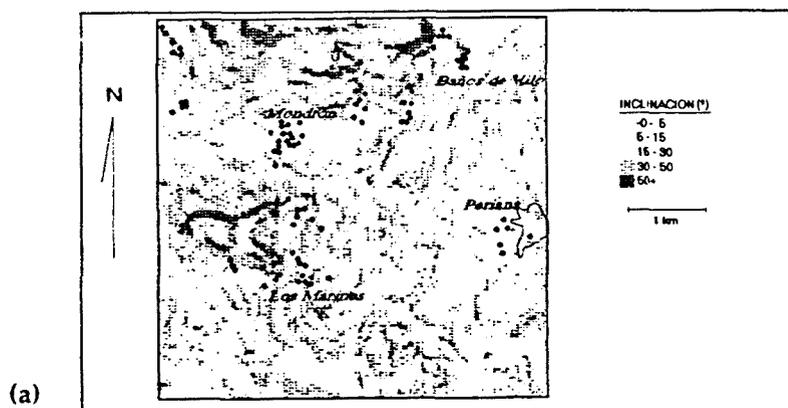


Figura 2. Mapa de pendientes.

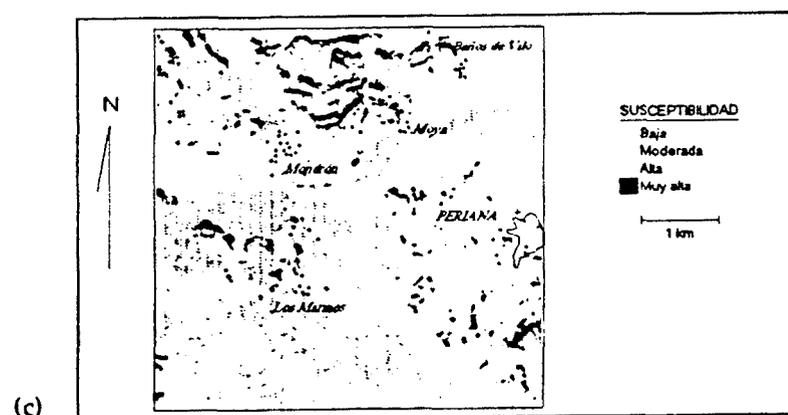
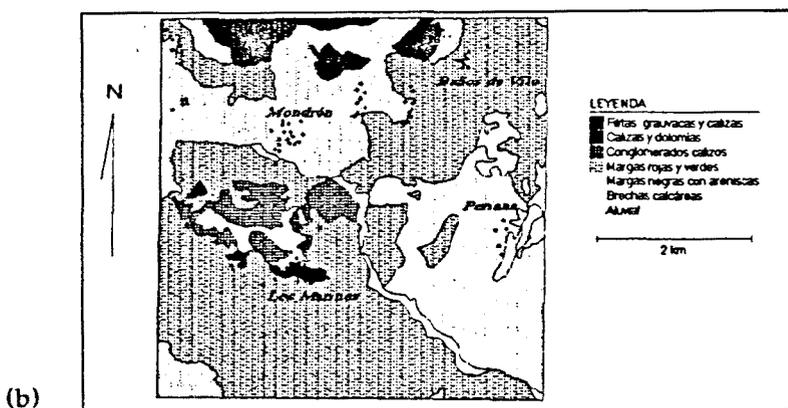


Figura. 1.1. (a) Mapa de pendientes, (b) mapa litológico y (c) mapa de susceptibilidad del sector de Periana, Malaga (Chacon et al., 1992).

La aplicación de técnicas estadísticas complejas, de tipo multivariante, han sido aplicadas con éxito para la confección de mapas de peligrosidad. Uno de los trabajos clásicos de aplicación de técnicas discriminantes es el de Carrara (1983a), la metodología del cual ya ha sido comentada anteriormente (Fig. 1.2).

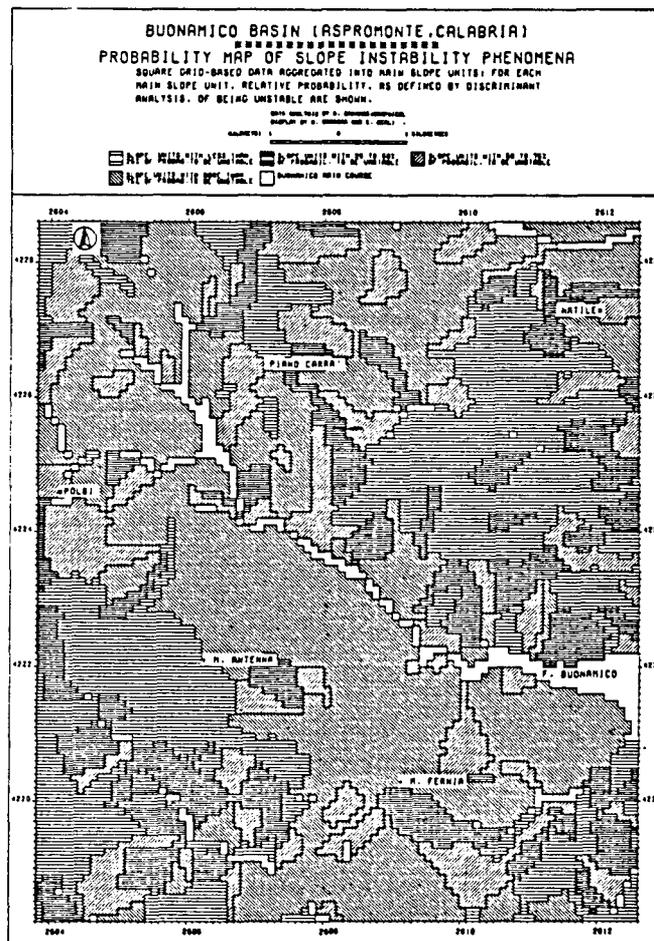


Figura 1.2. Mapa de inestabilidad de laderas de Buonamico basin, Calabria, mediante análisis discriminante (Carrara, 1983a).

Trabajos más recientes son los de *Yin & Yan (1988)* en la provincia de Shaanxi en China, quienes aplican técnicas de regresión múltiple para la confección del mapa. Tras definir una función de regresión compuesta por 21 variables que representan diferentes categorías de los 9 factores analizados, los cuales hacen referencia a las características topográficas, litológicas y estructurales, aplican la ecuación sobre cada uno de los polígonos de la malla en la que se ha dividido el mapa, obteniendo un valor de regresión R_i :

$$R_i = a_1x_1 + a_2x_2 \dots a_jx_j$$

siendo $x_1 \dots x_j$ las variables representadas y $a_1 \dots a_j$ los coeficientes de correlación de cada una de las variables. Cuanto mayor es R , mayor es la inestabilidad de la celda de la malla. La subdivisión de los valores de R en cuatro intervalos, definen los cuatro grados de estabilidad de la ladera. La precisión obtenida tras el análisis de predicción fué del 71%.

Otro trabajo realizado en esta misma línea fué el de *Kawakami & Saito (1984)* en Nagano, Japón. Mediante el análisis de 5 factores categorizados en 30 variables, relativos a la altitud, pendiente de la ladera, formación geológica, estructura y densidad de valles que convergen en la celda de la malla, se estableció una función de regresión en la que se refleja la contribución de cada variable mediante el coeficiente de correlación. La aplicación de la función de regresión sobre el área de estudio tuvo una precisión del 84%.

Aunque la estimación de la peligrosidad regional mediante técnicas estadísticas ha resultado de gran utilidad, su aplicabilidad está restringida a la zona de estudio donde se hayan desarrollado las funciones que determinan la contribución de cada factor en la estabilidad. No es por tanto, generalizable a cualquier zona, siendo necesario establecer nuevas funciones para regiones geológicas diferentes. Dichas técnicas no deben ser utilizadas para determinar la estabilidad de una zona muy específica, puesto que pequeñas variaciones locales pueden tener influencia notoria en la estabilidad. Con ello se quiere resaltar sobre el valor relativo y no absoluto de la peligrosidad estimada mediante estas técnicas.

Tras la exposición de las diversas técnicas empleadas, se evidencia que la precisión y fiabilidad de los documentos obtenidos dependerán de los medios que se disponga así como el tiempo de realización con el que se cuente. En cualquier caso los mapas de peligrosidad, independientemente de la técnica utilizada para su confección, sirven de base para la estimación relativa del riesgo que permite establecer los criterios necesarios para la planificación territorial con la consiguiente prevención de daños materiales y humanos.

Cuando se determinan las zonas de riesgo, es fundamental no sólo tener en cuenta la localización de áreas potencialmente inestables, sino el área que puede ser afectada por la progresión de la masa una vez movilizada. Por lo tanto uno de los retos con los que se

enfrentan actualmente las cartografías de riesgos, es la **determinación del alcance** de los diferentes tipos de movimientos.

Se han desarrollado principalmente dos metodologías diferenciadas para la estimación del alcance, una basada en la simulación de trayectorias por ordenador y otra basada en relaciones empíricas.

Los modelos numéricos desarrollados por ordenador para simular el movimiento de los desprendimientos por la ladera, han sido propuestos por numerosos autores. *Gili & Gutierrez (1992)* han desarrollado modelos bidimensionales para el cálculo de trayectorias de bloques, suponiendo geometrías determinadas con diferentes modos de desplazamiento (caída libre rebote, rodadura) así como la velocidad que pueden adquirir durante el recorrido. Los parámetros del modelo son calibrados mediante datos de campo con trayectorias reales observadas. Una vez conocida la precisión del modelo, éste puede ser utilizado para el diseño de medidas correctoras (Fig. 1.3). Este trabajo ha seguido la línea de otras investigaciones llevadas a cabo por *López (1982)*, *Falcetta (1985)*, *Rochet (1987)*, *Spang (1988)* y otros.

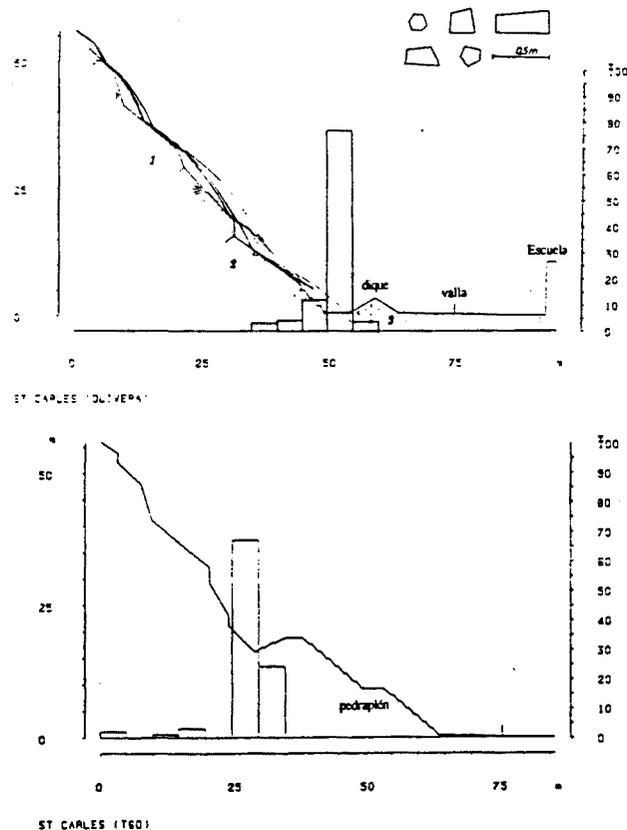


Figura 1.3. San Carlos de la Rápita, Tarragona. (1.roca; 2.hierba;3.depósitos de canchal).Superior: resultados ajustados a la situación original; Inferior: Predicción de propagación de bloques sobre la solución propuesta (pedraplén) (Gili et al., 1993).

Las expresiones empíricas propuestas hasta el momento para la predicción de la distancia recorrida por la masa movilizada, se basan en la relación entre el volumen de la masa desplazada y el alcance. Hsü (1975) observó una disminución del denominado coeficiente de fricción equivalente (Shreve, 1968), expresado por el cociente entre el desnivel (H) y la distancia horizontal recorrida (L), con el volumen de grandes deslizamientos (Fig. 1.4a). Hsü (1975) y Scheidegger (1973) indicaban la validez de esta relación sólo para volúmenes superiores a $5 \cdot 10^6$ y 10^5m^3 respectivamente. Para volúmenes inferiores, la relación H/L era prácticamente constante e igual a la tangente de 32° (Hsü, 1975). Nicoletti (1989, 1991) revisa además de las relaciones propuestas por Hsü (1975) y Scheidegger (1973), las formuladas por Li Tianchi (1983) y Davies (1982), quienes al igual que sus predecesores, obtuvieron relaciones semejantes entre el volumen y el ángulo del recorrido.

Hutchinson (1988) observó, mediante el diagrama de Hsü, que el alcance era diferente para los desprendimientos y flujos de creta analizados en las costas británicas. Encontró una nueva envolvente para las roturas ocurridas en los acantilados de creta y para los deslizamientos de flujo en las escombreras de minas de carbón (Fig. 1.4b). Cuando los volúmenes involucrados son pequeños, la litología y el tipo de mecanismo del movimiento se muestran muy influyentes en la movilidad y consecuentemente en el alcance de la masa, que es explicado por la cantidad de energía disipada según el mecanismo de progresión del deslizamiento (Corominas et al., 1988). Los autores aplicaron el análisis gráfico de Hsü a pequeños movimientos inventariados en el Pirineo Oriental, pudiendo observar que se producía una disminución del ángulo del recorrido con el volumen, alcanzando valores muy por debajo de los previstos de 0.6 por Hsü (1975) (Fig. 1.45c). Para desprendimientos de pequeños volúmenes Corominas et al. (1990), determinaron que el tipo de uso del suelo por el cual discurrían los bloques desprendidos influía en la distancia alcanzada por los mismos. Los resultados se basaron en el inventario de desprendimientos realizado en el Pirineo Oriental, donde la presencia de roca desnuda y prado, canchales y bosque denso condicionaba la mayor o menor progresión de la masa movilizada.

Algunos autores han aplicado métodos estadísticos en la evaluación de la movilidad de bloques. Berchten et al. (1988) realizaron mapas de peligrosidad según la movilidad de los bloques desprendidos a partir de la cartografía del tamaño y frecuencia de éstos, teniendo en cuenta la geología y topografía de las zonas de rotura y acumulación del depósito, aplicado a la zona de Veyteaux, Suiza.

Como se puede deducir de lo anteriormente expuesto, el volumen es uno de los factores principales que condicionan la movilidad del deslizamiento. Pero aún sabiendo su importancia, la predicción del volumen, desconociendo la morfología y dimensiones de la rotura es casi imposible. Algunos autores como Zhong et al. (1985) han establecido relaciones entre la intensidad de la lluvia y el volumen movilizado de flujos de derrubios en la provincia de Yuannan, China. Se ha podido observar que el umbral mínimo a partir del cual

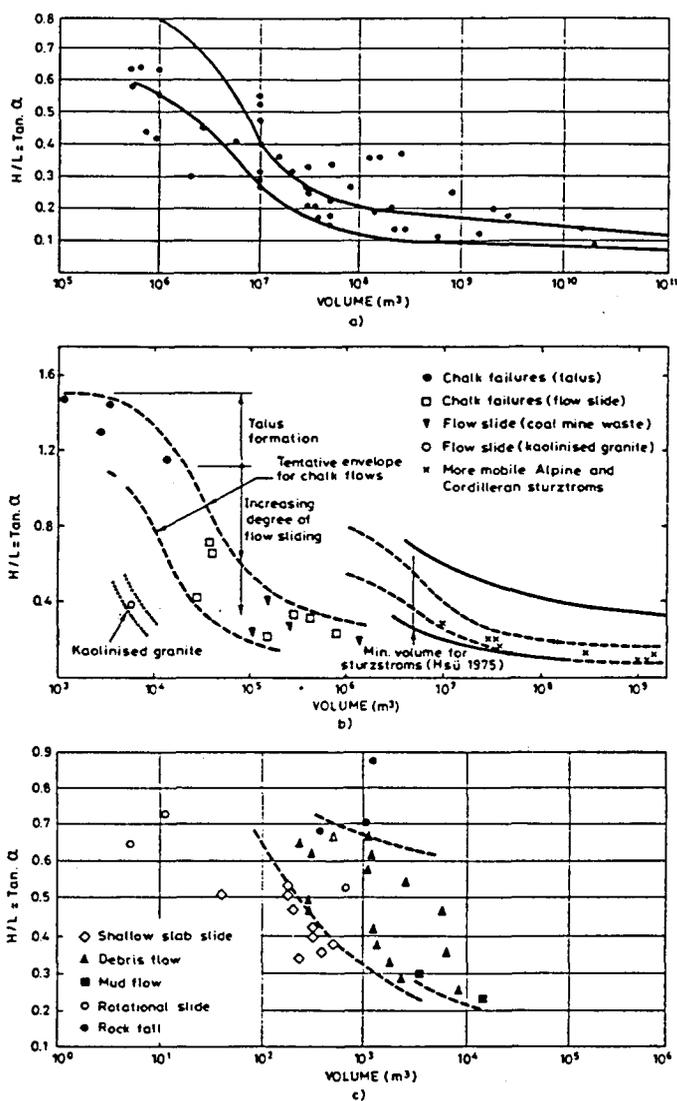


Figura 1.4. Movilidad de deslizamientos. Representación del volumen de la masa movilizada respecto a la relación entre el desnivel y la distancia horizontal del recorrido (H/L). (a) Datos correspondientes a grandes avalanchas de roca (Hsü, 1975); (b) datos aportados por Hutchinson, 1988; (c) datos correspondientes a movimientos de pequeño volumen (Corominas et al., 1988).

se producen corrientes de derrubios es de 1,8 mm. en 10 m., siendo superior a los 5 mm. en 10 m. las corrientes con volumen superior a los 100m³/s.

Corominas et al. (1988) encontraron que el volumen de la masa inestabilizada aumentaba con la superficie de la cuenca vertiente, situada por encima de la zona de rotura. Posteriormente, *Corominas et al. (1990)* prepararon relaciones similares para los diferentes tipos de movimientos.

De estas relaciones se deriva que cuanto mayor sea la cuenca, dependiendo a su vez de la precipitación de la zona y capacidad de infiltración de agua en el terreno, mayor será el posible volumen movilizado, que considerando la relación volumen/distancia recorrida, mayor será pues el alcance de éste.

Dada la importancia que tienen las cartografías de riesgo de deslizamientos en las proximidades a presas, debido a las pérdidas que grandes volúmenes de material deslizado provoca, como consecuencia de la reducción en la capacidad de almacenamiento de agua, algunos autores como *Riemer et al. (1988)* definen niveles de peligrosidad a partir de la estimación del volumen de masa que invadiría la presa en caso de deslizamiento. Para la estimación de los volúmenes, elaboraron un inventario integrado por diversos factores: morfología de la ladera, condiciones hidrológicas, aspectos geotécnicos, estructura y calidad de la masa rocosa. A partir del análisis cartográfico de los distintos factores, así como de la localización e identificación del tipo y profundidad de antiguos y activos movimientos, se estimaron las áreas potencialmente inestables. Mediante la planimetría de las áreas potencialmente inestables y la estimación de la profundidad, conocida a partir de antiguos movimientos, se llegó a evaluar el posible volumen movilizado.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Son numerosos los métodos que han sido desarrollados con el propósito de evaluar la peligrosidad de deslizamiento a escala regional (*Jones et al., 1961; Kojan et al., 1972; Brand & Hudson, 1982; Carrara 1883a; Sinclair, 1991; Anbalagan, 1992, etc*). En todos ellos se reconoce la importancia de algunos factores tales como la pendiente natural o la litología como causales de la inestabilidad, resultando del análisis individualizado o conjunto según las técnicas, unas aproximaciones más o menos realistas del comportamiento de la ladera.

La evaluación de las condiciones de estabilidad actual y potencial de la ladera precisa de una correcta y completa caracterización de ésta, a través de la identificación de todos los posibles factores causales de deslizamiento y su contribución relativa. Por este motivo es necesario seguir investigando sobre posibles factores del terreno (condiciones locales de la

geometría y composición de la ladera) cuya influencia todavía no es bien conocida y que controlan en parte la distribución espacial de los deslizamientos. Son muchos los trabajos en los que se ha estudiado los efectos de la vegetación en la estabilidad del talud y laderas naturales (*Greenway, 1987; Gray et al., 1992*, entre otros) y de los cuales se extrae, entre otras conclusiones, su influencia sobre la infiltración del agua y variaciones en las tensiones efectivas en el plano potencial de rotura. Sin embargo, y debido a la dificultad de evaluar la respuesta de este factor frente a otros factores geológicos y geomorfológicos de la ladera, son pocos los estudios de susceptibilidad de deslizamientos (*Anbalagan, 1992; Auer et al., 1993*), que incorporan dicho factor como una variable más a analizar.

Existen otros muchos interrogantes entre los cuales se podría señalar, el papel de los mecanismos de progresión del movimiento en la movilidad de los mismos y los factores que hacen que éste tenga mayor o menor alcance. Es conveniente analizar dichos interrogantes, dada la importancia que su respuesta tiene sobre la definición del riesgo al que pueden estar sometidas ciertas zonas.

El grado de imprecisión de las técnicas comúnmente empleadas en el estudio a escala regional, no estriba únicamente en la dificultad de reconocer e identificar los principales factores inductores de deslizamiento, sino en su tratamiento y análisis. Evaluar la influencia de parámetros cualitativos como la vegetación, morfología de la ladera, litología, etc... y su contribución relativa a la inestabilidad respecto a otros de tipo cuantitativo (pendientes, orientación, cuenca vertiente, etc...), mediante un análisis conjunto (*Carrara, 1983a,b; Mulder, 1991*), es complejo y requiere la aplicación de técnicas específicas. Sin embargo, la selección de una u otra técnica, se verá controlada la mayoría de veces por condicionantes tales como la extensión del área de investigación, el tiempo disponible, el tipo de información que requiera y su acceso, y por supuesto los medios y financiación de que se disponga, determinando de este modo la precisión y fiabilidad de los resultados que de ellos se obtenga. De este modo la identificación de las zonas susceptibles de deslizamiento y el alcance esperado por éstos, se puede realizar mediante aproximaciones simples basadas en el análisis geomorfológico (*Corominas, 1989, 1991*), u otras más complejas (*Neuland, 1976; Kinlong & Tongzhen, 1988; Mulder, 1991, etc*), pero más precisas como son las técnicas basadas en el tratamiento de datos. Estas técnicas evalúan la peligrosidad utilizando diferentes criterios que sin ser arbitrarios y fundamentados en unos principios científicos aceptados, no todas garantizan una absoluta objetividad de los resultados. Las técnicas basadas en el análisis geomorfológico, siempre fundamentadas en el principio del actualismo, introducen un grado de subjetividad que la limita en la práctica, mientras que las basadas en el tratamiento de datos es sin duda hasta el momento, las que permiten establecer un diagnóstico de la estabilidad más veraz, representando mejor las condiciones de estabilidad de la ladera, por su objetividad en el tratamiento de la información, así como por la cantidad y calidad de la misma. La técnica de análisis multivariante muestra, de entre las técnicas de tratamiento de datos, una gran ventaja frente a las técnicas más clásicas y es la de analizar

a un mismo tiempo la influencia de un conjunto de factores y determinar la interacción entre ellos. El análisis permite identificar los factores con mayor significación en la estabilidad y obtener unos criterios más objetivos a partir de la ponderación de los factores seleccionados con los que poder predecir el estado actual y potencial de inestabilidad de la ladera. Estos criterios utilizados posteriormente para la confección de mapas de susceptibilidad permiten una mayor precisión en la definición del riesgo al que están asociados.

Las técnicas de tratamiento de datos, sin embargo, no están ausentes de limitaciones, que deben ser solventadas si se quiere aportar un elevado grado de precisión a la hora de establecer las previsiones sobre el comportamiento de la ladera. Las limitaciones que incurren en la pérdida de precisión, derivan de la selección de los factores para describir las condiciones de estabilidad de la ladera, así como la calidad de datos que los representan. Para un mayor ajuste a la problemática real que plantea este tipo de fenómenos es necesario profundizar más sobre los factores que mejor explican dichas condiciones, haciendo posible, de este modo, la aplicación generalizada de estas técnicas al análisis de estabilidad regional.

El trabajo que aquí se presenta, se enmarca pues, dentro del conjunto de investigaciones que se realizan sobre la evaluación de la estabilidad a escala regional y que están dirigidas a mejorar los conocimientos que actualmente existen sobre la naturaleza y las causas que provocan los deslizamientos, con el fin de desarrollar métodos de previsión más fiables que proporcionen criterios objetivos que faciliten la elaboración de cartografías de riesgos, con las que poder llevar a cabo una buena planificación territorial, control de desarrollo urbanístico, y en general hacer mas extensa su utilidad sobre cualquier toma de decisiones relativas al terreno.

1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.

La técnica de evaluación de la potencialidad de rotura en laderas basada en el análisis geomorfológico, aunque es una herramienta muy útil y rápida en la identificación de áreas problemáticas, presenta, como se ha destacado anteriormente, dos aspectos relevantes que limitan la aplicabilidad de los mapas de peligrosidad y riesgo confeccionados. Estos aspectos son por un lado la incertidumbre a la hora de considerar la representatividad de los factores que definen la estabilidad y por otro la no posibilidad de cuantificar la influencia de éstos.

Se destacan las limitaciones impuestas por esta técnica, puesto que ha sido la única aplicada en las cartografías de riesgo de laderas naturales realizados en el Pirineo Oriental, donde se enmarcan las investigaciones llevadas a cabo en la presente Tesis. Las pocas cartografías de riesgos elaboradas de esta región geográfica, entre las cuales se encuentra las realizadas por *Corominas (1985-1986)* en las comarcas de montaña del Pirineo Catalán, la de

los Valles del Gran Valira y Valira d'Orient en el Principado de Andorra (*Corominas, 1989*) y la del Valle del Valira del Nord en Andorra (*Corominas, 1991*), se basan todas ellas en el estudio de los efectos inducidos por algunos procesos geomorfológicos, concretamente a través de la identificación de formas erosivas y los depósitos que éstos generan. Estos documentos, se realizan con objetivos definidos (conocer las áreas problemáticas, identificar el tipo de riesgo y grado relativo de peligrosidad, proporcionar criterios generales para plantear la zonificación urbanística, planes de protección civil, etc..) pero constituyen sólo una primera evaluación, sin profundizar detalladamente en las causas que controlan este tipo de fenómenos. Por este motivo es necesario para un diagnóstico más veraz, la utilización adicional de técnicas más precisas que permitan definir más objetivamente y con mayor grado de cuantificación la peligrosidad.

La dificultad de utilizar cualquier técnicas de evaluación de la peligrosidad, con la que poder establecer posteriormente el riesgo, estriba en conocer los factores causales de la inestabilidad, su influencia y contribución relativa. Un posterior tratamiento riguroso y objetivo de la información permitirá entonces cuantificar la potencialidad de rotura.

El principal objetivo que se plantea en este estudio es, por tanto, el análisis estadístico en profundidad y a escala regional los posibles factores que controlan la estabilidad de las laderas naturales, con el fin de determinar que zonas son más susceptibles y bajo que condiciones puede producirse la rotura, así como estimar el posible alcance de la masa inestable.

El estudio se ha dirigido hacia el análisis de aspectos concretos, necesarios para cubrir los objetivos marcados:

- Comprensión de los procesos que envuelven la formación y evolución de los movimientos de masa a partir del análisis de las características morfológicas de los mismos, que ayuden a determinar la influencia del tipo de movimiento en las condiciones de rotura y propagación del mismo.
- Identificación de los parámetros morfométricos que mejor definen los mecanismos de rotura y mecanismos de progresión del movimiento.
- Clasificación automática de los movimientos, diferenciados según los mecanismos de rotura y progresión.
- Determinación de la correspondencia entre las agrupaciones obtenidas de la clasificación automática de los movimientos, realizada a partir de la identificación de los parámetros morfométricos, y la clasificación realizada

sobre el terreno.

- Análisis de la influencia y contribución de los diferentes factores geológico-geomorfológicos (pendiente natural en zona de rotura, pendiente hacia la cresta, distancia a la cresta, cuenca vertiente, grosor de la formación superficial, cobertura vegetal, litología, etc..) que condicionan la estabilidad de laderas naturales, con el objeto de evaluar la susceptibilidad de deslizamiento superficial a escala regional.

- Identificación de los principales parámetros del terreno que controlan la rotura.

- Definición de una función de previsión espacial de zonas inestables, a partir de los parámetros del terreno más significativos en el comportamiento inestable de la ladera.

- Determinación de los niveles de susceptibilidad de deslizamiento y confección del mapa de susceptibilidad de una zona piloto.

- Análisis del control que ejercen los factores externos (como la topografía y vegetación de la ladera) e internos propios del movimiento, (como la morfología, morfometría o el volumen) en la movilidad de la masa inestabilizada.

- Definición de una función de estimación del alcance del movimiento a partir de los factores que ejercen mayor influencia en la movilidad.

Se ha analizado el comportamiento de laderas a partir de un importante volumen de información, formada por una serie de factores cuya propiedad es su significación en la descripción de las condiciones de estabilidad, valorándose su asequible obtención.

Aunque la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes no son ninguna innovación en el campo del análisis de la estabilidad regional, sí se emplea por vez primera en el área de estudio considerada, pudiendo paliar algunas de las limitaciones que soportan las metodologías basadas en criterios geomorfológicos, empleadas en la zona.

El análisis simultáneo del conjunto de factores tales como la pendiente, vegetación, morfología, cuenca, litología, etc, permite conocer como actúan e influyen en la estabilidad de la ladera, así como en la movilidad y alcance del deslizamiento, estableciendo su importancia relativa de forma cuantificada.

Se ha tratado de desarrollar una metodología de análisis de datos que permita extraer el máximo rendimiento a la técnica multivariante aplicada, que se traduzca en una mejora tanto en la estimación de la susceptibilidad como del alcance.

Como resultado de todo el estudio se quiere llegar a establecer una serie de criterios que contribuyan a mejorar la metodología de evaluación de la potencialidad de rotura y alcance de los movimientos, con el propósito de hacer más objetiva la definición y determinación del grado de peligrosidad frente movimientos de ladera en la cartografía de riesgos naturales, permitiendo una mayor y más clara aplicabilidad.

1.3. ESTRUCTURA DE LA PRESENTE MEMORIA.

Para el desarrollo y exposición del trabajo realizado se han estructurado ocho Capítulos, que hacen referencia a cada una de las etapas del estudio.

El *Capítulo 1*, corresponde a una introducción general del trabajo, donde además de hacer una revisión de los estudios nacionales e internacionales que han tratado el tema que aquí se ha planteado, se define la problemática y se establecen los objetivos.

En el *Capítulo 2*, se expone la metodología desarrollada para la consecución de los objetivos planteados.

En el *Capítulo 3*, se hace referencia en un primer apartado a las características geológicas, climatología y de vegetación del área de estudio; en un segundo apartado se describen los parámetros de campo seleccionados para el análisis y por último se hace una breve introducción de las propiedades geotécnicas de las litologías susceptibles de deslizamiento en el área de estudio considerada.

En el *Capítulo 4*, se hace una introducción a las técnicas de análisis multivariante seleccionadas para el tratamiento de la información. La última parte del capítulo corresponde a la descripción de las variables con las que se ha trabajado en los diferentes análisis.

En el *Capítulo 5*, se analizan diversos parámetros morfométricos del movimiento, identificando aquellos que mejor diferencian entre los distintos mecanismos de rotura y entre los mecanismos de progresión de la masa. En primer lugar, se analiza la relación entre las diferentes variables que caracterizan la morfometría, así como su relación con los diferentes tipos de movimientos según el mecanismo de rotura y progresión. En segundo lugar, se realiza una primera clasificación automática de las morfologías de rotura y una segunda clasificación de las morfologías de progresión de la masa. La clasificación mediante técnicas

discriminantes, permite identificar el conjunto de variables que mejor contribuyen a la separación de las tipologías morfológicas, reflejando el diferente comportamiento mecánico que muestran las agrupaciones y permitiendo a su vez, conocer el nivel de correlación entre las observadas en campo y las obtenidas mediante proceso discriminante.

El *Capítulo 6*, corresponde al análisis de las variables que califican la estabilidad de las laderas naturales. Se realiza un análisis de la influencia y contribución de cada una a la hora de definir el comportamiento con tendencia estable o inestable de la ladera. Finalmente y como resultado del análisis, se definen unas funciones de predicción (discriminantes) que permiten valorar la peligrosidad frente deslizamiento en función de las características geológico-geomorfológicas de la ladera.

En el *Capítulo 7*, se realiza un análisis de la movilidad y alcance de la masa inestable. Se analiza la influencia de los distintos factores (topográficos, de vegetación, volumen movilizado, etc...) que pueden condicionar la movilidad y en consecuencia la distancia recorrida por pequeños deslizamientos. Tras un análisis gráfico de la relación entre los factores, se define una función de regresión que estima el alcance del movimiento, a partir de aquellos que más influyen en la movilidad del mismo.

En el *Capítulo 8*, se presenta la aplicación del tratamiento propuesto para el análisis de estabilidad de laderas naturales a en una zona piloto, utilizando como base la evaluación de peligrosidad o potencialidad de deslizamiento a partir del valor obtenido de las funciones discriminantes (*Capítulo 6*).

Finalmente en el *Capítulo 9*, se exponen las conclusiones obtenidas del estudio y se presentan sugerencias de líneas de investigación futuras.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para alcanzar los objetivos planteados al inicio del estudio, se ha desarrollado una metodología de trabajo que es común a las propuestas en cualquier tipo de investigación y que consta, en líneas generales de una primera etapa de adquisición de datos, una segunda de análisis de los datos y una tercera de verificación y aplicación de los resultados obtenidos.

Previamente a la aplicación de la metodología de trabajo propuesto, es obvio destacar la importancia que tiene la zona sobre la que se va a desarrollar la investigación, pues las características de ésta van a condicionar los resultados que de ella se obtenga.

Con el principal propósito de profundizar en el conocimiento del comportamiento de las laderas naturales con el fin de definir las condiciones que inducen a la rotura y formación de deslizamientos, el estudio requiere de un inventario de áreas que sean estables y áreas inestables donde se hayan producido movimientos de masa. La complejidad que envuelve a los fenómenos de inestabilidad de laderas es tan grande que ha sido necesario, para poder llevar a cabo la investigación, imponer unas condiciones de contorno mínimas tales como la restricción de las tipologías de movimientos a analizar, así como las dimensiones y profundidad de éstos. Es hasta el momento difícil de llevar a cabo un análisis conjunto de todos los mecanismos del movimiento puesto que al ser diferente la dinámica del sistema que rige cada uno de ellos es probable que tanto los factores como las condiciones límite que desencadenan la rotura sean diferentes. De esta forma y con el objeto de minimizar todos los aspectos relativos a la rotura y progresión de la masa, se han estudiado únicamente los movimientos simples, desestimando aquellos que estuvieran coronados por varias cicatrices, y los movimientos superficiales de pequeñas dimensiones (aproximadamente inferiores a 10^6m^3). Estos y otros aspectos son comentados con detalle en el apartado 3.2.

La fuente de información que debía constituir la base de la investigación, tenía que caracterizar una zona que hubiera sido afectada recientemente por numerosos movimientos

de masa, de forma que éstos preservaran la morfología intacta o con la menor modificación posible. Cuanto mayor es el tiempo transcurrido, los efectos producidos por el crecimiento de la vegetación y la erosión, entre otros factores, en la zona de rotura y depósito de los deslizamientos afectan no sólo la localización de éstos sino el reconocimiento de las características generales de la ladera y por supuesto de la geometría del propio movimiento, pudiendo condicionar los resultados del análisis al incorporar en la base de datos mediciones erróneas de los parámetros. Las áreas del Berguedà-Solsonés y Andorra fueron así, las que con motivo de los intensos aguaceros de Noviembre de 1982 presentaban todas las características necesarias para su selección. Estas zonas presentan diversas litologías susceptibles que dan lugar a diferentes tipologías de movimientos, los cuales hasta el momento han mostrado un buen grado de conservación. Aunque diversos son los aspectos que evidencian la necesidad de un análisis de riesgo, esta zona ha sido poco estudiada desde este punto de vista, haciéndose por ello más interesante el desarrollo aquí de la investigación mediante la aplicación de técnicas de cuantificación de la peligrosidad, puesto que éste es uno de los retos con los que se afronta cualquier cartografía de riesgos.

2.1. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA.

El trabajo de investigación se ha desarrollado con el propósito de conseguir una buena caracterización de las condiciones naturales del terreno que inducen a la rotura y controlar la movilidad y consecuente alcance del deslizamiento; y evaluar la peligrosidad de una zona, mediante la identificación de los factores causantes de la inestabilidad.

La premisa básica de la que parte el estudio es la de utilizar procedimientos que permitan el reconocimiento y la evaluación de la peligrosidad de grandes extensiones de terreno.

Para alcanzar los objetivos planteados, basándose en la premisa mencionada, el trabajo se ha estructurado en la siguientes etapas:

- Una primera etapa de identificación y localización mediante fotografía aérea de las áreas problemáticas.
- Una segunda etapa de trabajo de campo, fundamentada en la adquisición de información relativa a la caracterización de la ladera y el deslizamiento.
- Una tercera etapa de trabajo que comprende la determinación de las propiedades geotécnicas de los materiales que han sido afectados por deslizamientos en el área de estudio.

- Una cuarta etapa de análisis de la información recogida en las etapas anteriores.
- Una quinta etapa de aplicación de los resultados del análisis.

2.1.1. Localización de las áreas problemáticas mediante fotografía aérea.

Antes de iniciar los trabajos de campo es, como en cualquier otro estudio de carácter geológico, imprescindible un previo análisis del área a partir de las fotografías aéreas existentes. Comparando los fotogramas de la zona de estudio correspondientes a los vuelos realizados antes (Octubre de 1980 a 1:15.000) y después (Junio de 1983 a 1:22.000 y Agosto de 1984 a 1:70.000) de las lluvias extraordinarias de Noviembre de 1982, se ha realizado una identificación de las áreas más afectadas por movimientos de masa.

El análisis de los fotogramas ha sido necesaria para la selección de las áreas problemáticas sobre las que se va a centrar la recogida de información. La selección, tanto de las áreas inestables donde se habían identificado uno o más movimientos, como de las áreas estables, ha estado condicionada por el acceso a estas zonas y por conseguir una gama representativa de las tipologías de los movimientos ocurridos, así como un amplio dominio de los parámetros que caracterizarían el análisis (vegetación, litologías, características topográficas, etc...).

2.1.2. Adquisición de datos de campo.

La fase de recogida de datos sobre el terreno constituye una de las etapas de trabajo que reviste especial importancia si se considera que va a ser la base de todos los análisis posteriores, condicionando de esta forma, los resultados que de ellos se obtenga. Todas las deficiencias que se registren durante esta etapa, marcarán en parte la bondad de estos resultados.

Por este motivo y ateniendo a una regla fundamental como es la de obtener un máximo volumen de información significativa haciéndola rentable en el tiempo, se han establecido unos requisitos que definirán la correcta ejecución de esta fase.

El principal requisito es establecer una recogida de datos objetiva, por lo que el inventario debe basarse en el uso de una ficha de campo que como otros autores (*Carrara & Merenda, 1976*) se ha creado con el objetivo de tener una herramienta particularmente útil para la normalización de criterios de trabajo. La utilización de esta ficha permite la recogida sistemática y homogénea de toda la información cuantitativa y cualitativa de cada una de las laderas inventariadas. De este modo la colección normalizada de todos los datos de los

diferentes puntos inventariados constituye una base extremadamente útil para llevar a cabo, con mayor facilidad, los ulteriores análisis estadísticos.

Una de las condiciones, que más difícilmente se ha podido seguir, es la eliminación del sesgo ocasionado por la selección no sistemática de la localización del punto a inventariar. Aunque se ha intentado que el sesgo derivado de la preselección de los puntos fuera mínimo, ya se ha constatado en el apartado anterior que éste estaba a su vez condicionado por diversos factores y por tanto se debe tener en cuenta su posible influencia a la hora de interpretar los resultados de los análisis.

Todos estos requisitos no tienen ningún valor si no se intenta minimizar el posible error derivado de las mediciones que se realizan en los aproximadamente 30 parámetros que caracterizan cada uno de los puntos del inventario. Los errores cometidos en esta etapa se acumularán en las variables definidas a partir de estos parámetros básicos y que serán utilizadas en los análisis posteriores.

En cualquier caso, no se puede pretender conseguir que las mediciones tengan una precisión micrométrica, puesto que además de depender de la instrumentación utilizada, estarán condicionadas tanto por el propio volumen de datos que es necesario para una buena representación, como por el tiempo que lleva obtenerlo.

Por este motivo se considera necesario remarcar el que la etapa de recogida de datos se fundamenta básicamente, en la obtención de máxima información reducida a lo esencial, minimizando coste de tiempo y esfuerzo, evitando la obtención de complejos datos de campo.

La etapa de campo, referida a la adquisición de datos, la constituye una primera fase de análisis y caracterización de las laderas inestables, una segunda fase de caracterización de las laderas estables y una tercera de recogida de muestras de suelo sobre las que se han realizado ensayos de laboratorio.

La caracterización de las laderas inestables se ha realizado desde dos aspectos diferenciados: análisis morfométrico del movimiento y análisis de los atributos propios de la ladera donde se ha producido la inestabilidad. La diferenciación de estos aspectos de la ladera tiene por objeto en primer lugar, la identificación de parámetros morfométricos que permitan, a través de una clasificación automática, diferenciar los mecanismos de comportamiento de cada tipología de movimiento, y en segundo lugar determinar las condiciones naturales del terreno bajo las cuales se ha producido la rotura y progresión de la masa.

El análisis morfométrico del movimiento se basa en la descripción precisa de la geometría y morfología de éste (ver apartado 3.2.c). La toma de datos que caracterizaba el

movimiento en sí, era llevada a cabo por un mínimo de dos personas equipadas con la instrumentación necesaria. Este hecho sumado a la cuantiosa información que debía recogerse, provocó que esta etapa de trabajo se realizara con lentitud y tuviera una duración mayor a la esperada, condicionando de este modo el número final de muestras inventariadas.

La identificación de los atributos de la ladera son comunes a la hora de caracterizar tanto las áreas estables como inestables. Estos hacen referencia a un conjunto de factores geológico-geomorfológicos, tales como la litología, estructura geológica, morfología y aspectos geométricos del perfil topográfico, pendientes naturales, tipo de vegetación, uso del suelo, orientación y altitud entre otros (ver apartado 3.2.b). El conjunto de factores debían ser lo suficientemente significativos para poder resolver el problema planteado sobre la inestabilidad regional y evaluación de la peligrosidad, dando preferencia a parámetros del terreno que no fueran de difícil medición y adquisición.

La medición y toma de datos "in situ", es decir, sobre el terreno donde debe evaluarse la potencialidad de deslizamiento, hace que la información que se obtiene para el análisis, sea mucho más precisa y representativa que la obtenida mediante métodos de parcelación cartográfica del terreno utilizada por muchos autores (*Carrara, 1983a,b; Kawakami & Saito, 1984; Yin & Yan, 1988; Mulder, 1991; Mora & Vahrson, 1994,...*). Este método de adquisición cartográfica de información tan extendido cuando se analiza la peligrosidad mediante técnicas estadísticas, aporta mayoritariamente una cuantificación discreta de los datos que sumado a la escala de trabajo del mapa, de donde se extraen, no llega a caracterizar correctamente y con suficiente precisión la zona de estudio.

Para caracterizar bien la zona es, de este modo, necesario un análisis previo de las condiciones del terreno, invirtiendo en la campaña de campo, como se ha hecho en este estudio, una parte importante de la investigación.

En el apartado 3.2 se describen con mayor profundidad los parámetros seleccionados para caracterizar las condiciones de las laderas estables e inestables y la geometría- morfoogía de los movimientos inventariados.

2.1.3. Caracterización geotécnica de los materiales.

Es evidente que las condiciones de estabilidad de las laderas varían significativamente con el tipo de material involucrado, siendo sus propiedades resistentes el factor que determina fundamentalmente con la estructura la tolerancia del terreno a su desestabilización. Cuanto mayor es la resistencia del material, mayor es la dificultad que se impone sobre los factores desestabilizadores para producir la rotura. Por ello es conveniente clasificar los materiales de forma que se reflejen sus propiedades resistentes.

Con el objeto, pués de conocer las propiedades resistentes de los materiales que caracterizan las diferentes litologías susceptibles frente deslizamiento en la zona de estudio, e incorporar dichos parámetros al análisis de evaluación de la peligrosidad como un factor más a la hora de determinar la potencialidad de rotura y la movilidad del deslizamiento, se han sometido a diversos ensayos de laboratorio agunas muestras de suelo de las zonas inestables. Los ensayos realizados han permitido clasificar (granulometrías), determinar el estado de consistencia (límites de Atterberg) y conocer los valores de resistencia al esfuerzo cortante (corte directo y anular) de los materiales analizados.

La metodología específica seguida para la realización de los distintos ensayos de laboratorio se explica con más detalle en el Anejo II.

Desafortunadamente la determinación convencional de la resistencia al esfuerzo cortante de una muestra inalterada, no siempre es representativa ni refleja las verdaderas propiedades resistentes del material global de la ladera que se estudia. Este es uno de los problemas con los que el estudio se ha encontrado a la hora de analizar los parámetros obtenidos de los ensayos para la evaluación de la peligrosidad regional.

2.1.4. Análisis de los datos.

Una vez se han identificado todos los factores geológico-geomorfológicos que caracterizan las condiciones de estabilidad actuales de las laderas de la zona de estudio, las propiedades resistentes de sus materiales y determinada la geometría y morfología de los movimientos de masa que han tenido lugar en éstas, se ha llevado a cabo una nueva etapa de trabajo que consiste en el análisis de toda la información que constituyen los datos obtenidos de las anteriores etapas.

La aplicación de los distintos métodos de análisis de la estabilidad y evaluación de la peligrosidad depende, como ya ha sido comentado, de los objetivos marcados, del carácter de la investigación, del tamaño del área de investigación, así como de los recursos disponibles. Puesto que el propósito principal es el de dar un carácter objetivo y cuantificable a la peligrosidad cuando se trabaja sobre grandes áreas de terreno, siendo el tiempo un importante condicionante, parece ser que los métodos de tratamiento estadístico de datos con los que construir los modelos multivariantes son los más adecuados.

Basándose en la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes, el estudio queda diferenciado en tres estadios, conexionados todos ellos por el objetivo principal de conocer mejor las condiciones de rotura y movilidad de deslizamiento.

Cada uno de los estudios que componen la etapa de análisis intenta resolver algún punto

de la problemática de la estabilidad de laderas. Para ello el primer estadio, analiza la morfometría de los movimientos de lader inventariados. La clasificación de cualquier fenómeno que sea estudiado es considerada una de las primeras etapas de trabajo en la mayoría de investigaciones científicas (Crozier, 1986). La clasificación es un proceso útil para descubrir algún grado de orden dentro de un conjunto complejo de individuos y conveniente para poder , de este modo, conocer más sobre las características del fenómeno considerado. Las agrupaciones que determinan el orden, se basan en el reconocimiento de unos atributos comunes de los individuos que las integran. La idea de casificación aplicada a este estudio permite conocer el conjunto de características que identifican a una serie de movimientos de ladera y los diferencia de otros, pudiendo ayudar a comprender el funcionamiento y mecanismos que rigen la formación de uno u otro tipo.

Los criterios específicos utilizados para la clasificación de los movimientos depende esencialmente de los objetivos propuestos en el estudio y la naturaleza de la investigación, pues pueden establecerse diferentes categorizaciones del mismo fenómeno. En este estudio, la clasificación se ha realizado con el objetivo de poder hallar una correspondencia entre las agrupaciones establecidas de forma automática y las agrupaciones morfológicas establecidas en el campo. Seleccionando factores morfométricos para discriminar entre uno y otro tipo de movimiento, se puede establecer una clasificación general de éstos. La técnica estadística utilizada para este fin permite, con buenos resultados, identificar los factores que mejor caracterizan cada agrupación y de este modo profundizar algo más en los macanismos de comportamiento de cada grupo.

Tras lo que se podría denominar el primer subanálisis, el estudio se centra en desarrollar una metodología para la evaluación de la peligrosidad relativa a escala regional. El principal objetivo es el de identificar los factores condicionantes de la rotura y para ello es fundamental un primer análisis de las variables que se han definido a partir de los parámetros originales del terreno, que determine la interacción entre ellas y su relación con la estabilidad. Seguidamente, la confrontación de las variables que caracterizan las laderas estables y las inestables, mediante la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes de tipo discriminante, permite obtener una expresión que, definida a partir de una combinación de variables estadísticamente significativas, determina el grado de inestabilidad potencial de la ladera.

La metodología de análisis seguida para el estudio muestra algunos aspectos que la hacen más interesante que las convencionales utilizadas comunmente. Un primer aspecto es el que a partir del análisis conjunto de las variables permite detectar las interacciones existentes enter ellas que no son fáciles de visualizar mediante un análisis individualizado, así como conocer el comportamiento y cuantificar la importancia que cada una de ellas tiene sobre la estabilidad. Un segundo aspecto es el referido a su aplicación como herramienta predictiva, capaz de distinguir el comportamiento de una ladera a partir de unas

características dadas del terreno, proporcionando unos valores que definen el grado relativo de potencialidad de deslizamiento en ésta.

El último aspecto que se analiza en este estudio y que corresponde al tercer estadio de esta etapa de trabajo es la movilidad de los deslizamientos. Este es uno de los aspectos que suscita gran interés por la importancia que adquiere en la correcta evaluación del riesgo de un área determinada. La dificultad que existe en la determinación de la distancia recorrida por la masa inestable es sin duda debido al todavía escaso conocimiento de los mecanismos que rigen el movimiento y de los factores que influyen directa e indirectamente sobre su movilidad.

Sobre este aspecto no se han realizado grandes avances en el estudio que aquí se ha llevado a cabo, sin embargo se ha intentado reflexionar sobre algunos puntos concretos de la problemática que rodea la movilidad de pequeños deslizamientos, trabajando sobre los efectos que ejercen algunos de los factores relativos a la topografía, vegetación, etc..., contribuyendo a mejorar los conocimientos que actualmente se tienen sobre ella. El tratamiento conjunto de estos factores ha permitido esclarecer algunas interacciones existentes entre éstos y la distancia alcanzada por los deslizamientos, seleccionando aquellos factores que con mayor representatividad estadística pueden explicar con buenos resultados el alcance de la masa. Para ello se han utilizado técnicas de regresión múltiple, dado que la movilidad y consecuente distancia recorrida por el deslizamiento no podía ser explicada por un único factor, sino que sólo podía ser analizado como un sistema complejo donde convergen, con diferente contribución, un conjunto de factores a mismo tiempo.

2.1.5. Aplicación de los resultados al estudio y evaluación de la susceptibilidad de deslizamiento.

Finalmente, la última etapa de trabajo se centra en describir un ejemplo de aplicación de los resultados obtenidos en el análisis de las condiciones de estabilidad desarrollado en el Capítulo 6.

Las funciones discriminantes obtenidas de los análisis multivariantes, con el objeto de determinar la susceptibilidad frente deslizamiento, se han utilizado como herramienta predictiva de la potencialidad de rotura sobre una zona piloto localizada en el Berguedà. Tras la adquisición de los datos que caracterizan la zona, siguiendo un sistema de mallado, se ha aplicado una de las funciones, siendo el valor discriminante de ésta el que determina el grado de inestabilidad del terreno. El conjunto de valores discriminantes obtenidos de la aplicación de la función, han permitido confeccionar el mapa de susceptibilidad de la zona, el cual ha servido para validar la metodología desarrollada para la evaluación de grandes extensiones de terreno.

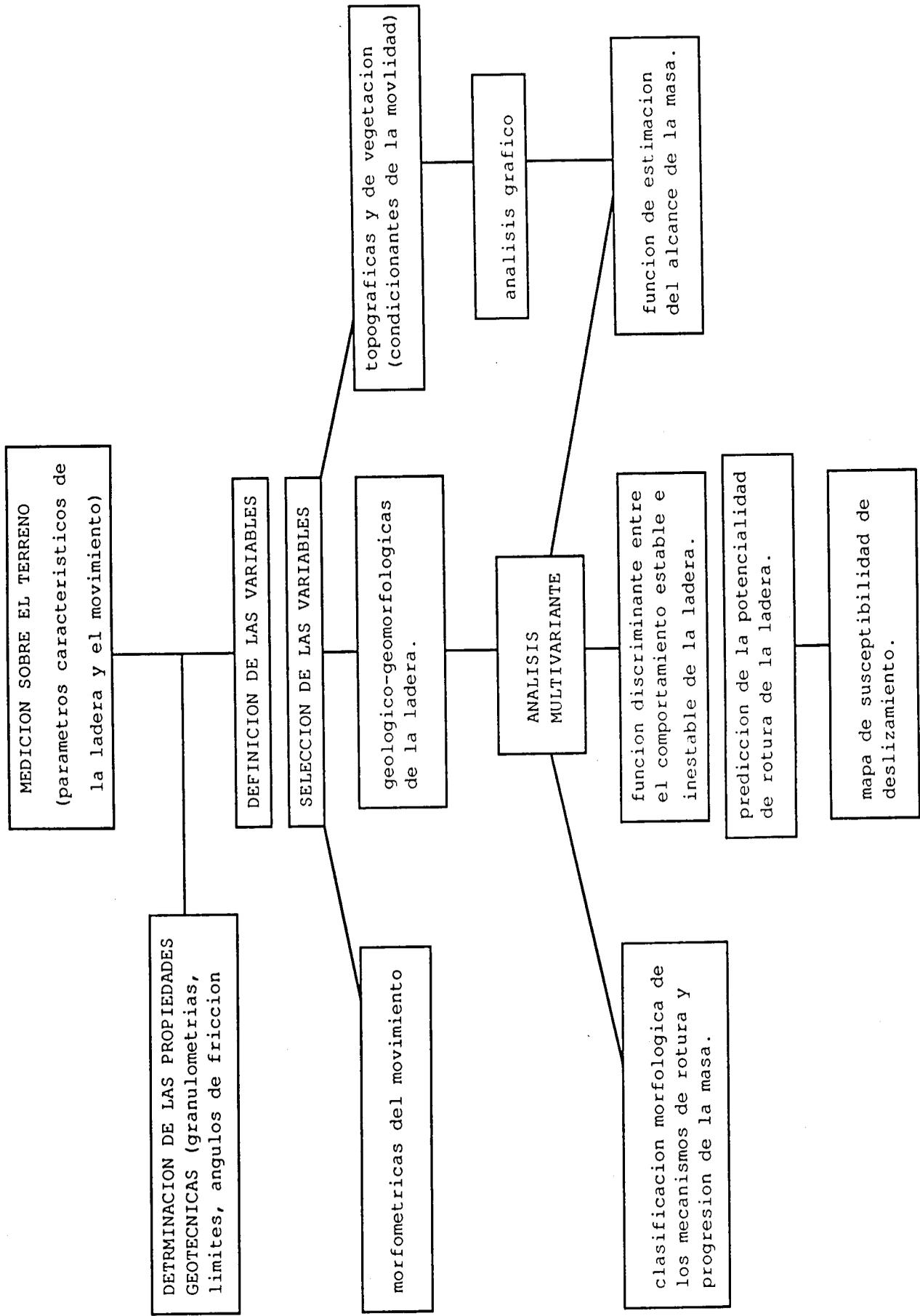


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio, planteado con el propósito de conseguir una mayor comprensión de la relación entre factores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, etc... y los fenómenos de inestabilidad de ladera, requería de unas áreas de montaña que hubieran sido recientemente afectadas por estos fenómenos, y en las cuales se pudieran obtener datos de los movimientos de masa.

Como consecuencia de las lluvias torrenciales de 1982 en el Pirineo Central y Oriental, ocurrieron grandes inundaciones y multitud de fenómenos de ladera. Para aplicar correctamente la metodología empleada para la evaluación de la potencialidad de rotura y estimación del alcance de la masa inestabilizada, ha sido preciso tomar un amplio dominio y variabilidad de los parámetros utilizados en los análisis. Por este motivo se seleccionaron dos zonas de estudio que contenían numerosos movimientos. Estas zonas fueron las de Andorra y l'Alt Berguedà-Solsonès (Fig. 3.1), ambas con una gran expansión de las actividades urbanísticas y de recreo.

El ámbito geográfico considerado en Andorra abarca toda la cuenca hidrográfica del Valira Nord, así como los valles del Valira d'Orient y Gran Valira, aunque el estudio se ha centrado específicamente entorno a los núcleos urbanos y ejes de comunicación.

La zona considerada en l'Alt Berguedà-Solsonès la conforman los valles altos de los ríos Llobregat y Cardener, encontrándose limitada por las poblaciones de Berga-La Pobla de Lillet-Gòsol-St. Llorenç de Morunys. La superficie total de 1250 Km² aproximadamente.

3.1. DESCRIPCION GENERAL DEL AREA.

3.1.1. Características geológicas.

Ambas zonas de estudio se enmarcan geográficamente en la Cordillera Pirenaica, situada en el istmo que une la Península Ibérica con el resto del continente europeo. Tanto litológica como estructuralmente en el Pirineo se reconocen dos unidades bien diferenciadas (Fig. 3.2) y en las cuales se enclava cada una de las zonas estudiadas (Mattauer & Seguret, 1971):

Zona axial del Pirineo: caracterizada por ser la zona más elevada topográficamente y compuesta por los materiales más antiguos aflorantes en la Cordillera. Estos materiales que constituyen el zócalo son rocas ígneas y metamórficas de edad paleozoica, pudiéndose encontrar hasta del Carbonífero superior.

Sierras marginales del Pirineo (Prepirineo): a ambos lados de la zona axial se disponen paralelamente y con una orientación E-W las denominadas sierras marginales. Debido al desplazamiento de los mantos de corrimiento hacia el N y S, a partir de la falla norpirenaica situada en el eje de la cordillera, las sierras presentan una clara disimetría espacial respecto de la zona central considerando la zona francesa o española. En el lado español se pueden distinguir diversos alineamientos de sierras, que corresponden a las denominadas sierras internas, situadas inmediatamente al sur de la zona axial, formadas básicamente por calizas y areniscas y las sierras externas situadas mucho más al sur y limitadas por la Cuenca del Ebro.

Los materiales que forman tanto las sierras internas como externas son de edad mesozoica y terciaria, han sido deformados por la orogenia alpina y se encuentran dispuestos discordantemente sobre los materiales paleozoicos del zócalo.

Sobre los materiales que forman el zócalo y la cobertera se disponen discordantemente los terrenos postorogénicos que comprenden materiales del Neógeno y Cuaternarios, que no han sido afectados por la orogenia alpina.

Las sierras paralelas a la zona axial presentan una estructura plegada, con pliegues recumbentes de vergencia hacia el N en la zona francesa y hacia el S en la española. La estructura de estilo alpino de los Pirineos, en la que los materiales secundarios bordean la zona central formada por materiales primarios se explica por una serie de pliegues y mantos de corrimiento que produjeron el desplazamiento hacia el sur de la cobertera sedimentaria, siendo las Sierras Externas el frente de este gran nivel de despegue desplazado.

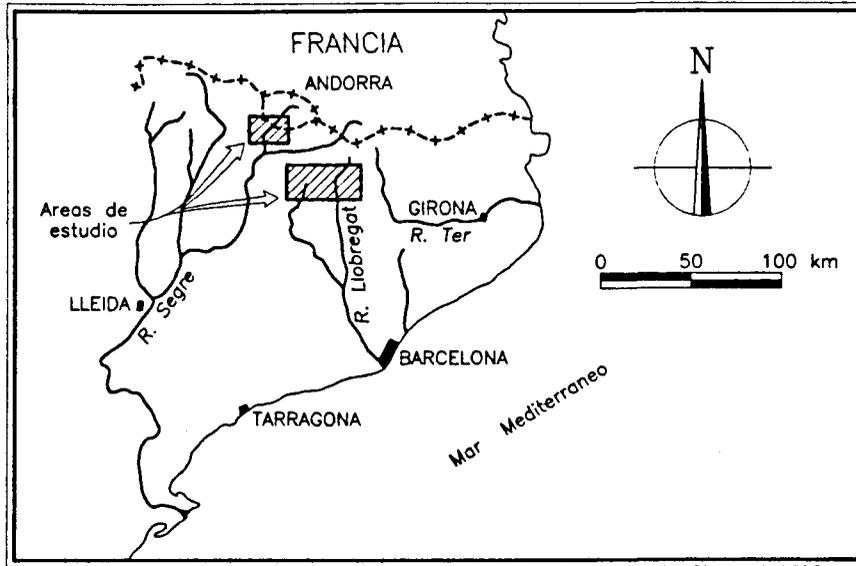


Figura 3.1. Localización de las áreas de estudio.

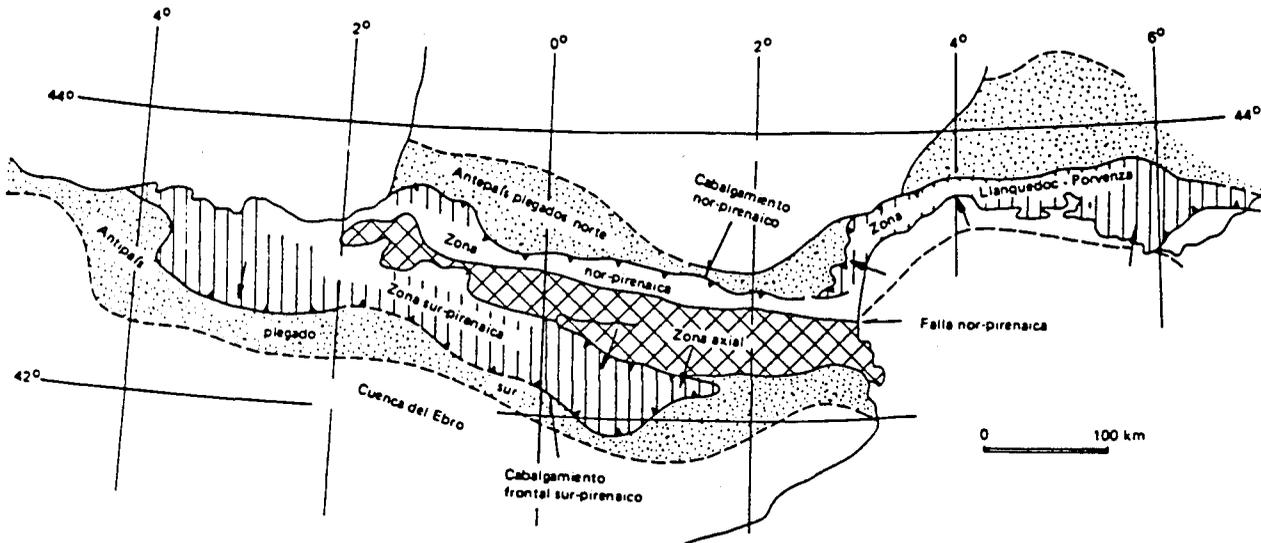


Figura 3.2. Geología y estructura general de los Pirineos según Mattauer & Seguret (1971).

A continuación se hace una breve descripción de las características litológicas y estructurales de las dos zonas de estudio.

3.1.1.1. Características geológicas de Andorra.

El principado de Andorra se sitúa geográficamente en el sector meridional del Pirineo Axial, formado geológicamente por materiales paleozoicos que abarcan desde el Cambro-Ordovícico hasta el Carbonífero, presentando un metamorfismo de muy bajo grado, facies esquistos verdes (Hartevelt, 1970).

Aunque la sucesión de materiales hercinianos han sido descritos por un gran número de autores, a continuación se hace una descripción breve de las litologías que componen las formaciones que afloran en el área de estudio, basándose en los trabajos de síntesis de Puigdefábregas et al., (1979) y Muñoz (1985).

Los materiales que afloran en este sector son, de base a techo (Fig. 3.3):

- **Cambro-Ordovícico inferior.** La serie básica está formada por una alternancia rítmica de pizarras, limolitas y algunos niveles arenosos que dan lugar a bancos de cuarcitas y alcanzan de 1 a 20 m. de espesor. El conjunto presenta un color gris y verdoso. Ocasionalmente estos materiales presentan un cierto contenido en carbonato hasta constituir, en algunas zonas, niveles de calizas. Estos materiales pertenecen a la denominada *Formación de la Massana*. Aunque la potencia de la formación es desconocida, Puigdefábregas et al., (1979) considera que puede alcanzar los 2000m.
- **Ordovícico superior.** Formado por un nivel conglomerático que Hartevelt (1970) interpreta como un depósito de "mudflow", y que se encuentra en contacto discordante con los materiales infrayacentes. Hacia el techo de la *Formación conglomerática de la Rabassa* hay una gradación decreciente hasta formar unos niveles de areniscas. El grosor estimado de esta formación es de unos 200m.
- **Silúrico.** Pizarras arcillo-carbonosas negras con abundantes fósiles, presentando algunas finas capas carbonatadas e intercaladas con algún nivel cuarcífero. Estos materiales que aparecen siempre muy deformados pertenecen a la *Formación de Candlic*.
- **Devónico.** Calizas de la *Formación Casamanya* que alternan, mayoritariamente, con esquistos negros, alcanzando un espesor que oscila entre 400 y 500m.
- **Carbonífero.** Esquistos negros laminados con alguna intercalación discontinua de niveles arenosos y calcáreos. Estos materiales pertenecen a la denominada *Formación de*

Bixessarri, datada como del Carbonífero prehercínico.

- **Intrusiones Hercinianas.** La serie Paleozoica preherciniana se ve interrumpida por diversas masas intrusivas granodioríticas de grandes dimensiones como las de Andorra-Mont-Louis, St. Coloma y Fontaneda, que darán lugar a un metamorfismo de contacto. Asociados a estas intrusiones aparecen diques de cuarzo y aplitas que se encajan a través de las principales fracturas NW-SE.

- **Depósitos cuaternarios.** Estos materiales de origen diverso reposan directamente sobre el sustrato. Los depósitos de origen glaciar son los más abundantes dentro de los depósitos cuaternarios. en su mayoría son sedimentos morrénicos formados por acumulación de material muy heterométrico y que corresponden a morrenas de fondo (*Serrat & Vilaplana, 1979*).

Los depósitos de origen fluvial corresponden a las terrazas fluviales. Estos aparecen, poco desarrollados, en las partes más bajas de los valles de Andorra y los materiales que los constituyen son bloques, gravas y arena con elevado índice de rodamiento.

Los materiales de origen coluvial lo forman arenas y gravas con cantos, mayoritariamente pizarrosos, que presentan una orientación preferente.

- **Tectónica.**

Las formaciones litológicas, antes descritas, han sufrido deformaciones ocasionadas por las fases tectónicas de la orogenia hercínica y alpina. Las deformaciones provocadas por la tectónica se traducen en foliaciones y esquistosidad como principales estructuras menores y grandes pliegues y fracturas como estructuras de gran escala.

Como consecuencia de las deformaciones hercínicas, los materiales aparecen formando estrechas bandas plegadas, de disposición E-W, donde los núcleos anticlinales están formados por los materiales cambro-ordovícicos de la Massana y Rabassa y los sinclinales por materiales Devónicos y Carboníferos. Mientras los pliegues tienen una vergencia marcada hacia el sur, la esquistosidad buza notablemente hacia el norte, disponiéndose localmente vertical.

En la zona axial pirenaica, las estructuras generales se manifiestan por pliegues concéntricos y cabalgamientos con fallas inversas asociadas, la orientación de todas estas estructuras es E-W con vergencia al sur de las estructuras menores de los cabalgamientos, así como sistemas de fracturación de desgarre conjugadas de dirección NE-SW y NW-SE.

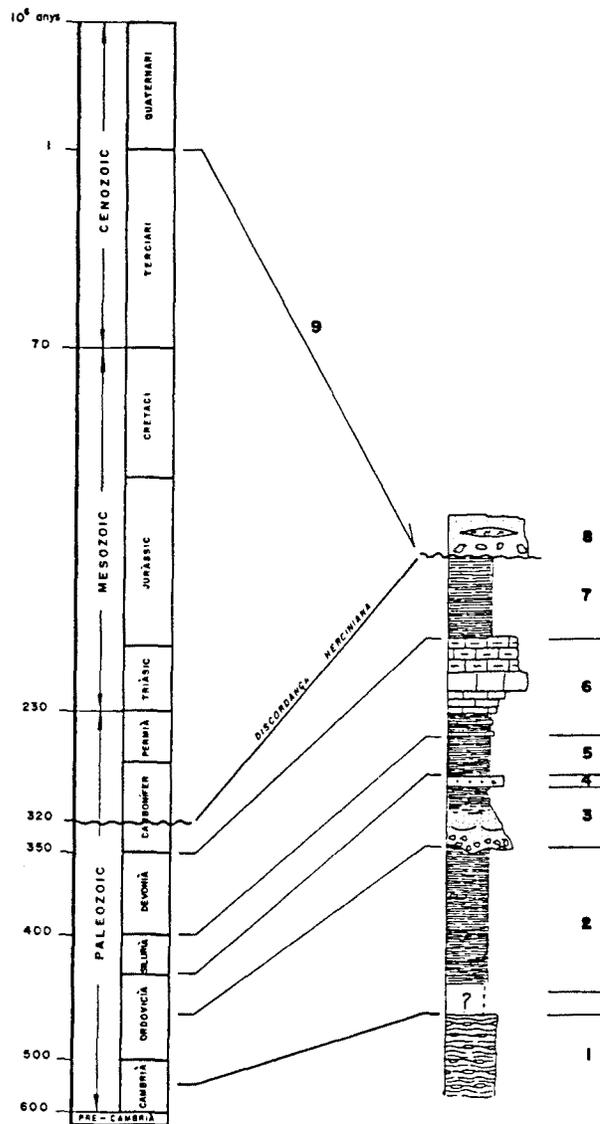


Figura 3.3. Columna estratigràfica de los materiales existentes en Andorra, comparada con la correspondiente de tiempos geológicos. En la columna de tiempos se presentan con trama los períodos representados en Andorra. (1) Gneis del valle de Incles, (2) Frm. de la Massana, (3) Frm. de la Rabassa, (4) Cuarçitas de Sant Julià, (5) Frm. Canòdic, (6) Frm. de Casamnya, (7) Frm. de Bixessarri, (8) Depòsitos torrencials y complejo vulcano-sedimentario, (9) Cuaternario (Puigdefàbregas et al., 1979).

3.1.1.2. Características geológicas de l'Alt Berguedà y Solsonès.

Las zonas del Berguedà y Solsonès se enclavan geográficamente en el sector meridional del Prepirineo Oriental que forman las Sierras Marginales y donde no hay diferencia entre las denominadas Interiores y Exteriores.

Para exponer las características litológicas y estructurales se ha hecho referencia a dos unidades estructurales que pueden diferenciarse en el sector estudiado. Las más importantes son: una unidad central que corresponde al "manto del Pedraforca" que limita al norte con la "unidad autóctona del Cadí". El límite sur del manto del Pedraforca lo constituye la unidad denominada por *Seguret (1972)* "antepaís plegado sur", pero al cual no se ha hecho referencia por no formar parte del área de estudio.

En conjunto y como expondremos a continuación, esta área del Prepirineo Oriental está dominada por materiales del Cretácico superior y del Eoceno, localmente cubierto por materiales detríticos del Eoceno-Oligoceno.

La descripción de la litología que aquí se hace está basada en los estudios realizados por *Solé Sugrañés (1970, 1973)*, *Busquets (1981)*, así como la síntesis recogida por *Clotet (1984)*.

- **Unidad del Cadí:**

La sucesión de materiales que forman esta unidad son, de base a techo, la siguiente:

Permotrias. Tramo continental constituido por lutitas rojas, areniscas y conglomerados, con potencia que varía entre 300m y 600m. Este nivel sólo aflora en el Cadí.

Triásico. Calizas del Muschelkalk y yesos y arcillitas del Keuper que han sido progresivamente erosionados en los sectores más orientales.

Cretácico superior - Paleoceno. Conjunto eminentemente detrítico formado por conglomerados, areniscas y calizas arenosas del Campaniense-Maestrichiense. Conjunto de materiales que presenta una gran variabilidad espacial, acuñándose hacia el E, desapareciendo a la altura de la Poble de Lillet.

La facies Garumniense está formada por más de 200m de arcillas, limos y areniscas rojas con intercalaciones calcáreo-dolomíticas en el extremo más oriental de la sierra del Cadí; en la parte central aparecen unas intercalaciones de calizas lacustres de poco espesor (*Solé Sugrañés, 1973*).

Paleoceno superior - Eoceno inferior. Conjunto formado en su mayor parte por calizas de alveolinas y niveles de arcillitas y arenicas verdesosas (Ilerdiense y Cuisiense), que en algunos puntos de la zona de estudio puede alcanzar un espesor de 1500m (Port del Compte).

• **Unidad Manto del Pedraforca:**

Esta es la unidad que ocupa una mayor extensión en el sector de estudio. Los materiales que forman dicha unidad son los siguientes:

Triásico superior - Jurásico medio. Las arcillas yesíferas del Keuper constituyen el nivel de despegue para los grandes corrimientos. Por encima se halla un nivel calcáreo de aproximadamente 100m de potencia atribuido al Retiense; un nivel de margas y calizas fosilíferas del Plensbachiense-Bajociense y finalmente este ciclo sedimentario lo constituyen unas dolomías de 100m de espesor que abarca hasta el Oxfordiense inf.

Jurásico superior - Cretácico inferior. Este segundo ciclo sedimentario lo constituye un nivel calizo perteneciente al Jurásico sup. y un nivel superior de calizas y margas del Cretácico inf. El espesor máximo de este ciclo se presenta en el Valle del Segre donde en conjunto puede alcanzar casi los 3000m.

Cretácico superior. El tercer ciclo sedimentario de esta unidad está representado en el sector occidental por un nivel basal de calizas con prealveolinas discordantes sobre los materiales que formaban el Cretácico inf. En el resto de la unidad del Pedraforca el Cretácico sup. está representado por Calcáreas con Lacazinas y Rudistas con un espesor de aproximadamente de 600m.

Por encima de estos niveles calizos, se desarrolla una secuencia rítmica por la alternancia de margas negrosas y calcáreas nodulares del Maestrichtiense, con una potencia de hasta 2000m.

Este ciclo sedimentario acaba con un episodio continental representado por margas, areniscas y calizas lacustres de la facies garumniense con un espesor de 1000m en algún punto del sector estudiado. Presencia de lignitos en esta formación (Saldes, Vallcebre).

Eoceno inferior. Formado por margas y calizas de alveolinas.

Eoceno superior - Oligoceno. Conglomerados que fosilizan en algunas zonas los materiales de la unidad del Pedraforca.

Depósitos cuaternarios. Los materiales cuaternarios que recubren parcialmente la zona de estudio, son los depositados por los cursos fluviales (fm. aluviales y torrenciales) y los ligados a procesos de ladera (fm. coluviales).

Las formaciones aluviales constituyen terrazas que se caracterizan por depósitos limpios, heterométricos formados por gravas y bloques de litologías muy variadas que pueden alcanzar más de un metro de diámetro.

Las formaciones torrenciales tienen una distribución más local y asociados a conos de deyección. Los depósitos heterométricos presentan abundantes gravas y bloques envueltos en matriz arcillosa. El grosor de estas formaciones puede superar los 3m.

Los materiales coluviales, de mayor extensión en la zona, se caracterizan por ser depósitos heterométricos de bloques y gravas con abundante matriz limo-arcillosa, las cuales, por lo general, no presentan una ordenación interna. El grosor de estas formaciones varía, mayoritariamente, entre 0.5 y 1m.

Existe un tipo de formaciones coluviales muy localizadas y ligadas a procesos de gelifración del sustrato rocoso como son los depósitos de canchal. Se caracterizan por ser depósitos con una ausencia total de matriz, siendo muy elevada su porosidad.

- **Tectónica.**

La historia tectónica del sector estudiado está estrechamente ligada a la del Pirineo.

El zócalo hercínico está afectado en mayor o menor grado por la tectónica alpina posterior. La Cuenca de la Baells fué afectada por una fase tectónica de fractura (Estefaniense-Pérmico), relacionada con el volcanismo postorogénico, que provocó la fragmentación en bloques del macizo hercínico.

La serie que forma la cobertera no empieza a diferenciarse del Pirineo hasta el Cretácico inf., en una fase de tectónica distensiva y caracterizada por movimientos verticales. La primera fase compresiva del Cretácico sup, que afecta a una franja al N de la zona axial pirenaica, no se hace sentir en la zona de estudio, donde se produce la regresión marina del Maestrichtiense, interrumpiéndose la sedimentación marina y dando paso a la sedimentación continental del Garumniense.

Durante la fase tectónica de mayor intensidad, que va desde el Paleoceno hasta el Eoceno, se produce una intensa sedimentación, al mismo tiempo que se produce un desplazamiento de la cobertera hacia el Sur (Manto del Pedraforca) que es consecuencia de

la fuerte etapa compresiva que afecta a la zona axial.

Durante el Eoceno sup. y como consecuencia de la elevación que se produce en la zona axial, se inicia en los márgenes de la cuenca unas condiciones de sedimentación continental que perdurará hasta el Eoceno y Oligoceno (*Clotet, 1984*).

Como consecuencia de la fase tectónica, la cobertera se verá afectada por unos pliegues orientados de E-W, con marcada vergencia al S y con desarrollo de esquistosidad de fractura en los niveles más margosos (margas eocenas y garumnienses). Muchos de estos pliegues se convierten en cabalgamientos volcados hacia el S con desplazamientos de 1 a 2 Km (*Solé Sugrañés, 1973*).

La sedimentación molásica se verá afectada por el desarrollo de estos pliegues y cabalgamientos de la fase alpina. (Fig. 3.4).

3.1.2. Climatología y vegetación.

El Pirineo Oriental, donde se enmarca geográficamente las zonas de estudio, se caracteriza por presentar dos regiones morfoclimáticas bien diferenciadas como son la alta montaña (clima alpino) y el litoral mediterráneo (clima mediterráneo). El primero, debido a la altitud se caracteriza por sus bajas temperaturas, mateniendo un ambiente periglacial. Mientras el clima de alta montaña presenta abundantes lluvias con máximos en verano, el clima mediterráneo se define por sus veranos calurosos y secos, con máximos pluviométricos en otoño y primavera.

La práctica totalidad del territorio andorrano que se situa por encima de los 1000m de altitud y el 75% sobrepasa los 1800m resultando una altura media de 1996m (*Adellach & Ganyet, 1977*), es característico de alta montaña.

Andorra presenta una fuerte oscilación térmica, tanto anual como diária. La fuerte insolación que provoca la formación de pequeñas masas de aire que ocasionan las tormentas de verano.

La pluviometría del territorio andorrano se caracteriza por ser variable según la zona. De forma general, las precipitaciones van disminuyendo al alejarse de las laderas de cabecera, siendo cada vez más escasas e irregulares al descender por el Valira, como se puede apreciar en los registros de pluviometría anual de algunas de las estaciones de medida de Andorra: 1200mm en Pas de la Casa, 1051mm en Ransòl, 911mm en Engolasters, 885mm Escaldes y menos de 800mm en St. Julià de Lòria (*Panareda, 1984*).

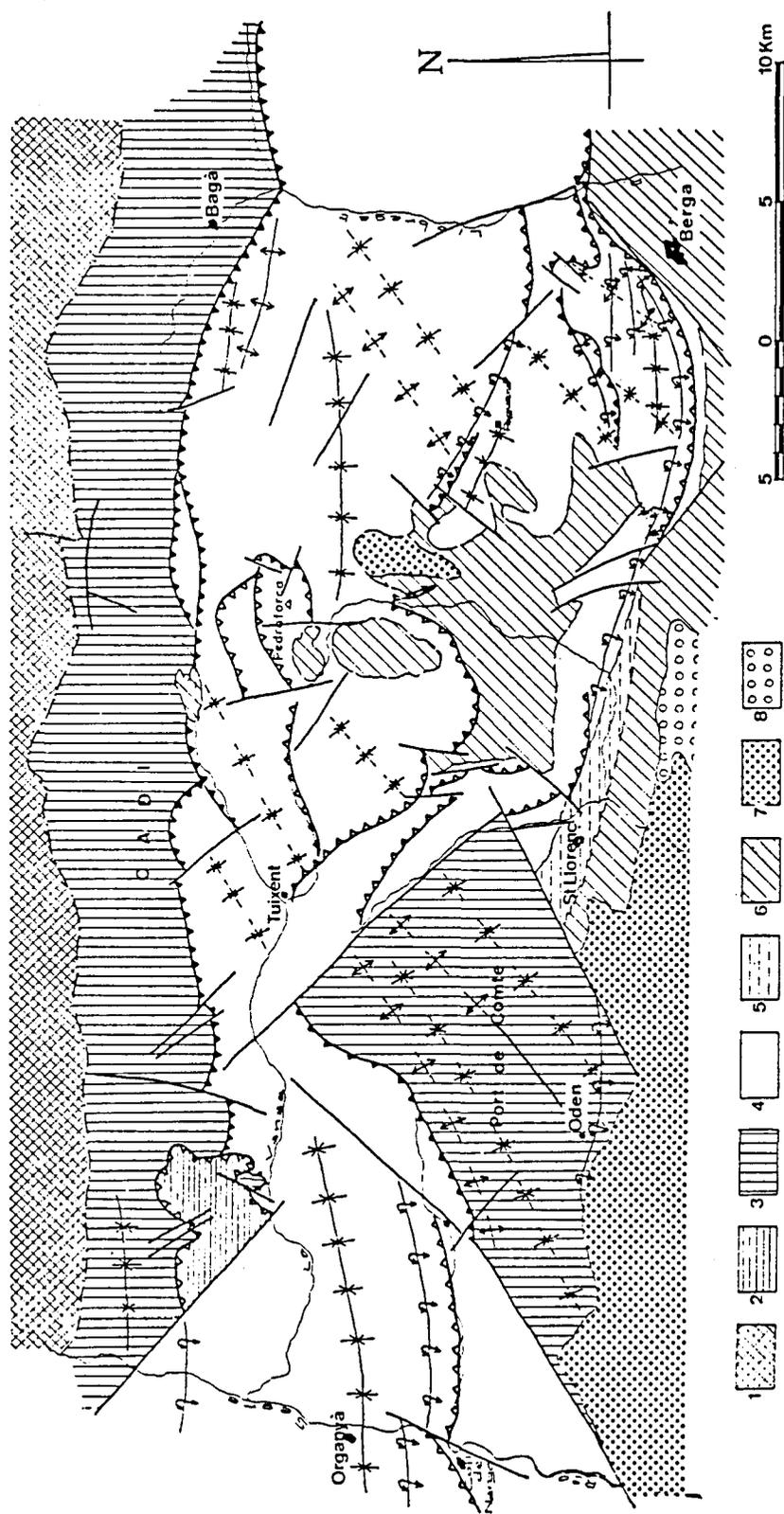


Figura 3.4. Esquema estructural del Prepirineo entre los ríos Segre y Llobregat. 1. Paleozoico de la zona axial; 2. Paleozoico del Montsec de Tost; 3. Autóctono del Cadí y Port del Comte; 4. Mesozoico corrido hacia el sur y superpuesto anormalmente al Eoceno del Cadí y Port del Comte; 5. Eoceno superior marino; 6. Conglomerados de Bastets; 7. Conglomerados de Lord; 8. Conglomerados de Busa. (Solé Sugrañés, 1973).

La pluviosidad anual de la zona de l'Alt Berguedà oscila entre 800mm y 1500mm, caracterizándose por una distribución bastante irregular. Presenta máximos principales de precipitación que corresponden uno a la primavera y otro a finales de otoño, que valorados conjuntamente superan el 50% del total anual, y un mínimo durante el invierno.

La temperatura media anual está próxima a los 10°C, con mínimos no inferiores a los -12°C, con inversiones térmicas frecuentes. El periodo frío corresponde a los meses de Noviembre a Abril, con frecuentes heladas que pueden superar los 100 días/año, con posibles nevadas durante este período.

El clima corresponde a un tipo subalpino con influencias atlántica locales, caracterizado por unas condiciones templadas y húmedas con ausencia del período estival seco de los ambientes mediterráneos, así como de los períodos helados propios de los ambientes de alta montaña.

La naturaleza del sustrato y las características climáticas son los factores que condicionan la flora de cualquier zona. Así, la naturaleza eminentemente carbonatada de los materiales en la zona de l'Alt Berguedà (*Masalles i Sebastià, 1985*) determina una vegetación típicamente basífilica y calcícola, mientras que la flora en Andorra es, como consecuencia del carácter predominantemente ácido del sustrato, acidófila (*Folch et al., 1979*).

En ambas zonas hay una buena representación de comunidades vegetales de carácter forestal, que agrupadas según unidades altitudinales definen los dominios de vegetación mediterráneo, montano y subalpino.

El dominio mediterráneo que se desarrolla hasta los 1200m de altitud aproximadamente, se caracteriza por una vegetación boscosa de encinas (*Quercion rotundifoliae*).

La vegetación dominante en la zona de montaña, que se extiende mayoritariamente desde los 800m a los 1600m, es el bosque de robles y pino rojo (*Pinus Sylvestris*), así como el boj. En las zonas más frescas del montano, los bosques son sustituidos en su mayoría por prados (*Mesobromion*).

El dominio subalpino está caracterizado por la pineda de pino negro (*Pinus Uncinatae*) que se desarrolla a altitudes de entre 1600m y 2400m, y un estrato herbáceo donde dominan las especies calcícolas. Estas comunidades forestales son poco densas, por lo que hay un desarrollo importante de bosque bajo. (*Folch et al, 1979*).

En zonas de alta montaña, por encima de los 2400m hasta los 3000m de altitud, la vegetación que corresponde al dominio alpino, se caracteriza por la desaparición de la cobertera forestal e instalación de extensos prados.

Si el hombre no actuase sobre el paisaje, se definirían, en las zonas de estudio, dos formaciones vegetales muy claras: las zonas más elevadas que constituyen prados y sustrato rocoso; y las laderas situadas por debajo de los 2300m donde domina el bosque y bosque bajo. Esta zonación es ahora hipotética debido a las comunes alteraciones que se producen sobre las comunidades forestales para extracción de madera, zonas de cultivo y por la explotación a cielo abierto de algún sector de la zona (Saldes, Figols en el Berguedá). Todo esto provoca una alteración en el ecosistema, afectando entre otros muchos aspectos y de forma importante la cobertera edáfica siendo un factor indiscutible en la degradación de las laderas.

3.1.3. Precipitaciones torrenciales del Noviembre de 1982.

La proximidad del Mar Mediterráneo a la Cordillera Pirenaica contribuye a la generación de lluvias torrenciales. La masa de aire caliente y húmedo procedente del Mediterráneo se interna a través de los cauces de los ríos hasta alcanzar las estribaciones pirenaicas, siendo forzado a un ascenso rápido, descendiendo su temperatura y pudiendo llegar a la saturación. Cuando existe una colisión entre la masa de aire caliente y un frente frío, se produce una rápida condensación y precipitación consiguiente. Las intensas precipitaciones que se generan en tales condiciones llegan a registrar valores superiores a los 200mm/día siendo los valores medios anuales en la región mediterránea de 500-600mm/año y de 1000-1400mm/año en el área pirenaica, pudiendo alcanzar los 700mm/día como se registró en el temporal de Octubre de 1940 en el Pirineo (Novoa, 1984).

Las intensas precipitaciones ocurridas durante el Noviembre de 1982 afectaron de forma generalizada el Pirineo Central y Oriental, siendo las responsables de inundaciones catastróficas en la zona mediterránea, así como la degradación de extensas áreas por la pérdida de gran cantidad de suelo y generación de innumerables fenómenos de inestabilidad de ladera.

Las precipitaciones, con un duración de tres días (6, 7 y 8 de Noviembre como días pluviométricos), tuvieron una magnitud excepcional pudiendo alcanzar máximos registrados de 555,8mm en 48h en la Molina o 300mm en La Pobla de Lillet y Capdella (Martín Vide, 1984) (Fig. 3.5). Las puntas de descarga de algunas de las estaciones de medida de los ríos pirenaicos durante los días 7 y 8 de Noviembre se muestran en la figura 6, algunos de los cuales llegaron a los 3000 m³/s como en el valle del Segre en Lérida.

Los registros históricos de inundaciones ocurridos durante los últimos cinco siglos en los ríos pirenaicos, muestran que las lluvias de estas características presentan una cierta periodicidad que va de 30 a 40 años (Corominas, 1993). Sin embargo dicha estimación debe tomarse con cierta precaución, por estar basada en referencias históricas de daños

ocasionados por las inundaciones.

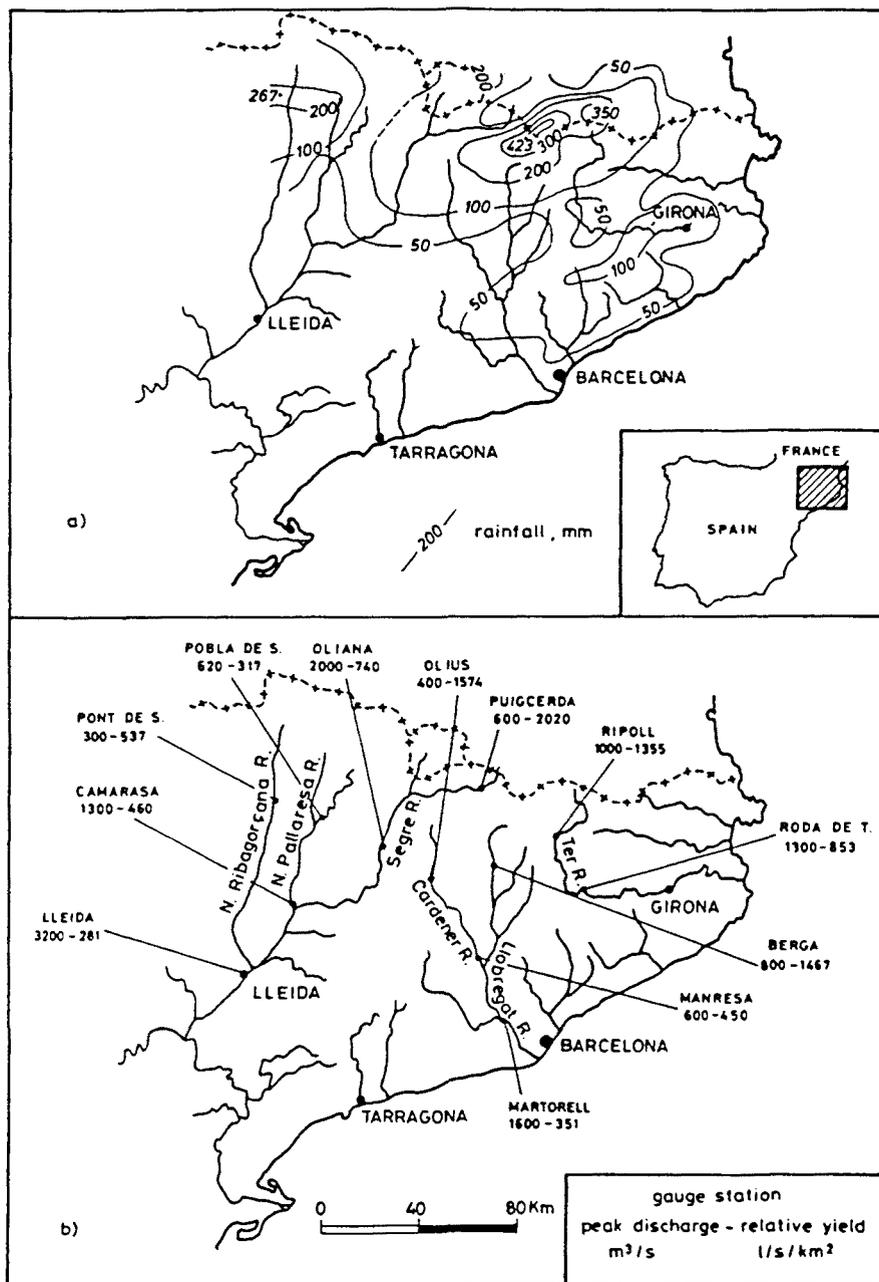


Figura 3.5. (a) Distribución de las lluvias del 7 de Noviembre de 1982. (b) Caudal máximo y caudal específico en algunas de las estaciones de los ríos Pirenaicos los días 7 y 8 de Noviembre de 1982 (Corominas & Alonso, 1990).

3.1.3.1. Pluviometría e inestabilidad de laderas.

En la inestabilidad de una ladera o talud intervienen simultáneamente diversos factores. El conjunto de parámetros que los caracterizan pueden permanecer constantes a lo largo del tiempo o cambiar a un ritmo muy lento. Algunos como la litología, disposición estructural, o las características geotécnicas del material pueden considerarse invariables.

Existen otros parámetros que no siempre actúan con la misma intensidad, pudiendo iniciar el mecanismo de rotura al modificar las condiciones de estabilidad de la ladera. De entre estos parámetros con influencia externa, es decir, no son propiedades intrínsecas del material, se destaca la pluviometría, y por consiguiente el papel que juega el agua en la estabilidad.

Remitiéndonos al área de estudio, el Pirineo Central y Oriental ha sido azotado a lo largo de la historia por temporales de lluvia que han provocado avenidas catastróficas periódicamente como los de Octubre de 1907, 1937, 1940 o Noviembre de 1982, dejando tras de sí un registro de multitud de deslizamientos (*Corominas, 1985*).

Los efectos que provocan las lluvias intensas sobre las laderas y su relación tan estrecha con la generación de movimientos de masa es bien conocida como exponen algunos autores (*Rapp, 1960; Onodera et al., 1974; Lumb, 1975; Brand, 1985; Naden et al., 1991; Corominas, 1993*) quienes ponen de manifiesto la correlación entre la intensa producción de deslizamientos y la lluvia. Sin embargo conocida dicha asociación se debe profundizar en las causas que inducen a los procesos de inestabilidad de las laderas.

Los efectos que la lluvia, como factor externo inductor de los procesos de inestabilidad, tiene en la formación de deslizamientos son causados normalmente, por el incremento de presión de agua intersticial. Este incremento reduce la tensión efectiva que actúa sobre una superficie de rotura potencial con resistencia o permeabilidad diferente, favoreciendo el proceso de rotura a través de dicho plano.

3.1.4. Litologías susceptibles y movimientos asociados.

En algunos casos son las condiciones morfológicas o hidrológicas las que adquieren mayor importancia, independizándose del mismo factor litológico, como ocurre en los relieves rocosos de las cadenas pirenaicas donde el ambiente periglacial, dadas las bajas temperaturas, provoca por procesos de gelifracción vuelcos, desprendimientos, etc.. de litologías que no hubieran sido afectadas en otros ambientes morfoclimáticos. A pesar de ello, se puede asegurar que de entre los parámetros que tienen mayor importancia en la estabilidad de laderas, es sin duda la litología uno de los más decisivos.

Las características propias del material (resistencia, estado de fracturación, permeabilidad, grado de meteorización, etc..) que condicionan, en gran medida la estabilidad, combinados en algunas ocasiones con otros factores como los anteriormente mencionados, hacen que hayan litologías que sean más o menos susceptibles a producir deslizamientos.

La distribución de los deslizamientos en el Pirineo Oriental está controlada por las formaciones litológicas más susceptibles (Fig. 3.6). A continuación se exponen algunas de las unidades litoestratigráficas que están presentes en el área de estudio, en las que aparecen con frecuencia fenómenos de inestabilidad (*Corominas & Alonso, 1984; Corominas, 1989; Corominas & Baeza, 1991*):

Silúrico. Los materiales del Silúrico por formar parte de los niveles de despegue de los mantos de corrimiento, se encuentran altamente fracturados y deformados, constituyendo una de las formaciones rocosas más inestables. Los terrenos silúricos formados por pizarras negras grafitosas, con abundantes sulfuros son causa de frecuentes deslizamientos en el área pirenaica. Los movimientos que afectan a estos terrenos suelen ser de grandes dimensiones como los ocurridos en Pont de Bar (Valle del Segre) en Noviembre de 1982 o El Forn de Canillo (Andorra), los cuales presentan morfologías rotacionales y de flujo (Fig. 3.7).

Keuper. Estos materiales formados por margas y arcillas versicolores con niveles yesíferos son frecuentemente afectados por movimientos rotacionales con flujo de pie formando coladas. Los niveles y masas yesíferas presentan una problemática añadida derivada de la propiedad que los caracteriza como es la disolución, siendo la causa de numerosos colapsos.

Cretácico superior. De edad *Campaniense-Maestrichtiense* son las formaciones de Flysh que afloran en el Prepirineo. Es en aquellos niveles donde se incrementa el nivel de carbonato, constituyendo niveles más o menos margosos, donde estos materiales son afectados por movimientos de tipo planar o rotacional, que evolucionan, mayoritariamente como flujos de tierra.

Cretácico superior - Paleoceno inferior. Las litologías de esta edad constituyen unas de las formaciones más inestables del Pirineo Oriental y que corresponden a los niveles de arcillas y areniscas rojas con alguna intercalación de lignitos y yesos de la *Facies Garumniense*. En esta formación que aflora en una gran extensión del área de estudio en l'Alt Berguedà, se pueden apreciar movimientos de grandes dimensiones como los de Gòsol o Maçaners del 1982. La mayoría de los movimientos son de tipo rotacional y traslacional o de flujo, tipo colada, e incluso se han detectado procesos de soliflucción (Fig. 3.8 y 3.9)

Los potentes bancos calizos, en la zona de Vallcebre en el Berguedà, así como los niveles de areniscas que se encuentran interestratificados con los paquetes arcillosos de esta formación, ocasionan desprendimientos puntuales de pequeñas dimensiones (Fig. 3.10).

Paleoceno superior. La formación marina de edad *Ilerdiense*, caracterizada fundamentalmente por margas verde-azuladas que alternan con algún nivel de areniscas bioclásticas y bancos calizos, provoca fenómenos de inestabilidad importantes, desarrollándose principalmente en forma de coladas y procesos de soliflucción (Fig. 3.11).

Eoceno inferior. Los niveles de mayor susceptibilidad son las margas y margocalizas de la formación de Bagá de edad *Cuisiense-Luteciense*. Son los niveles margosos los que presentando mayor potencia y caracterizándose por su esquistosidad, frecuentemente ocasionan fenómenos de inestabilidad. Esta inestabilidad está asociada a deslizamientos planos que se producen favorecidos por discontinuidades tales como la estratificación y diaclasación, aunque pueden producirse movimientos rotacionales que evolucionen como un flujo. Cuando afecta a los niveles superficiales altamente meteorizados de esta formación margosa, son las corrientes de derrubios los fenómenos de inestabilidad más comunes (Fig. 3.12).

Pleistoceno - Holoceno. Son las formaciones cuaternarias, básicamente de tipo coluvial, las que por una serie de condiciones topográficas y de poca cohesión de los depósitos hacen que sean materiales altamente inestables y frecuentemente movilizados.

Puesto que son formaciones superficiales que recubren de forma más o menos continua el sustrato, los volúmenes involucrados en los deslizamientos siempre están restringidos al grosor de la formación y por ello no superan en su mayoría, algunos centenares de metros cúbicos. Los deslizamientos que afectan a estos depósitos son generalmente corrientes de derrubios (Fig. 3.13).

Otros depósitos cuaternarios, como los tills morrénicos pueden llegar a provocar importantes daños, dada su disposición topográfica, como los aludes de derrubios ocurridos en algunos de los valles del Pirineo, concretamente en Capdella y La Guingueta en Noviembre del 82 (*Corominas, 1989*).

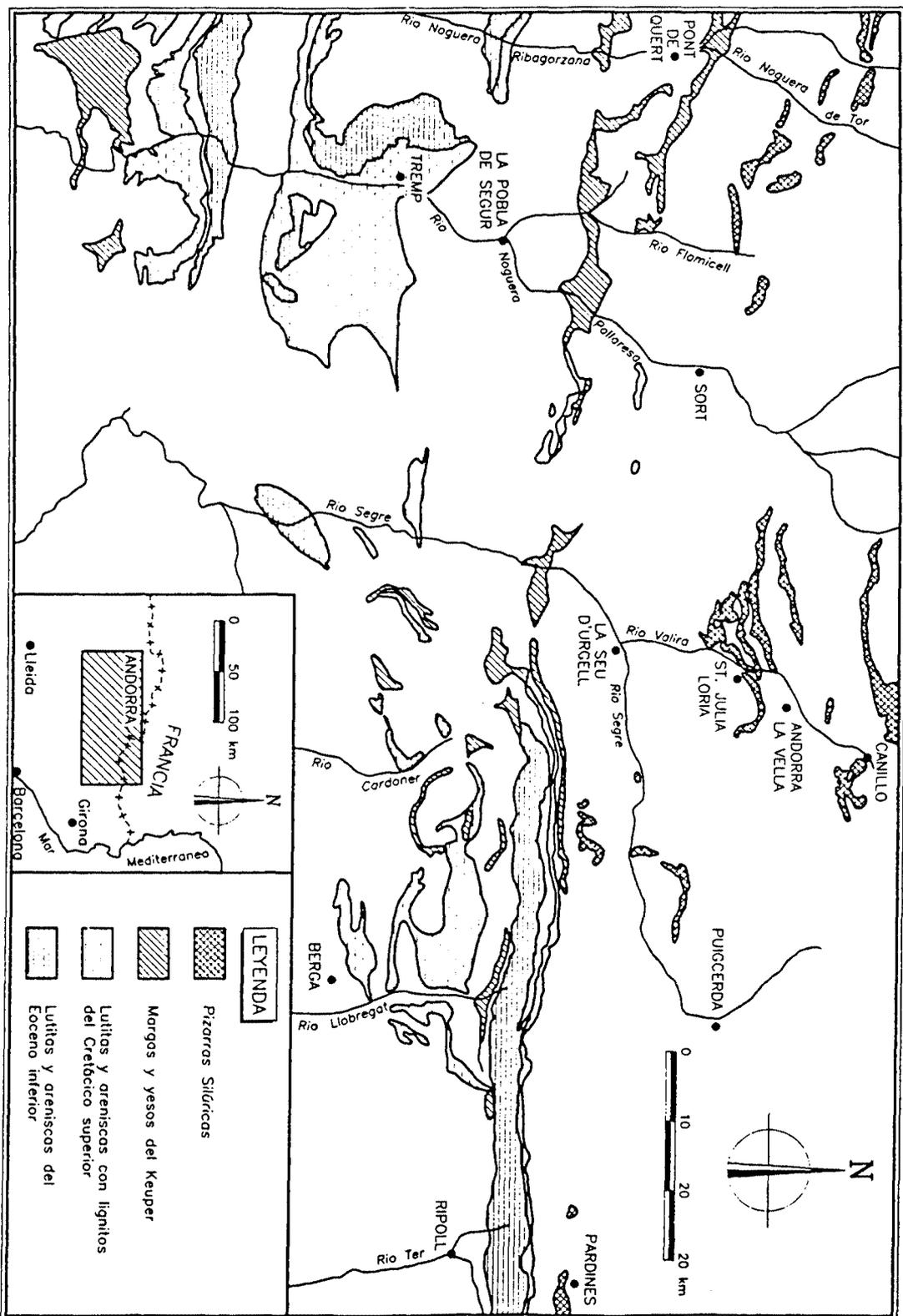


Figura 3.6. Principales unidades litoestratigráficas susceptibles de deslizamiento en el Pirineo Oriental (modificado de Corominas & Baeza, 1991).



Figura 3.7. Vista general del movimiento de rotación con flujo del Forn de Canillo, Andorra.

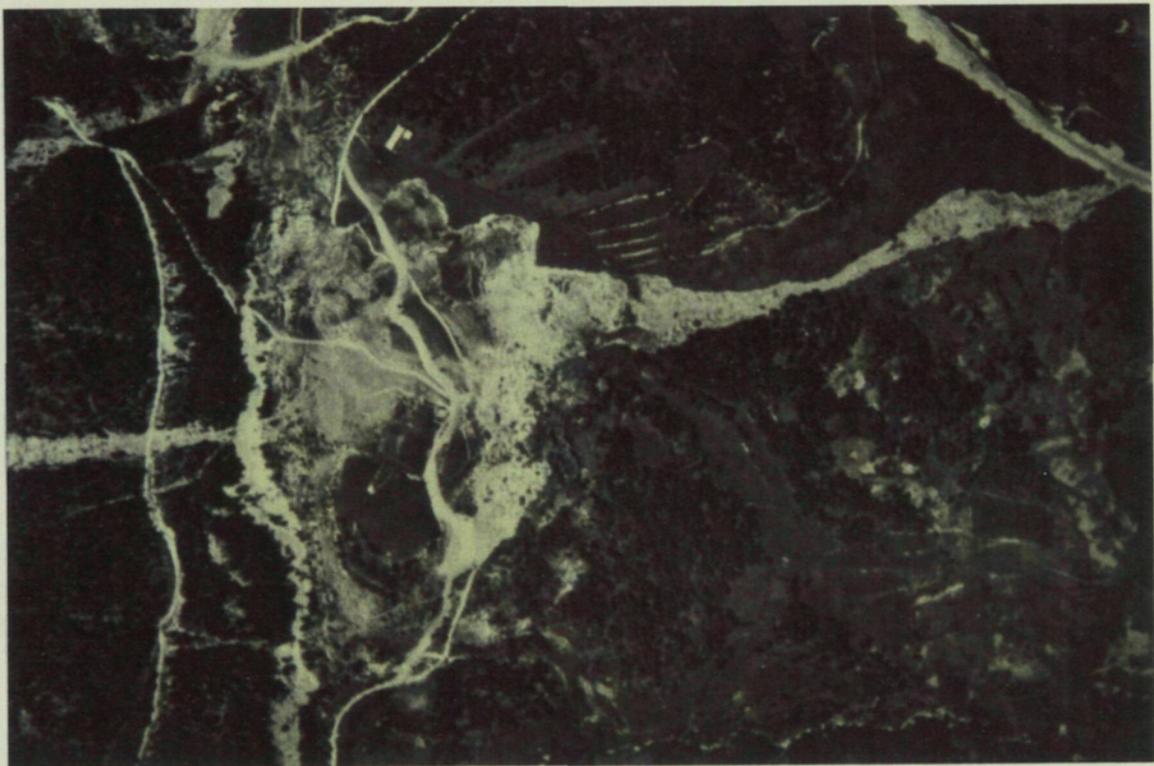


Figura 3.8. Fotografía aérea del movimiento de Torrent Senta en Gósol (Solsonés).

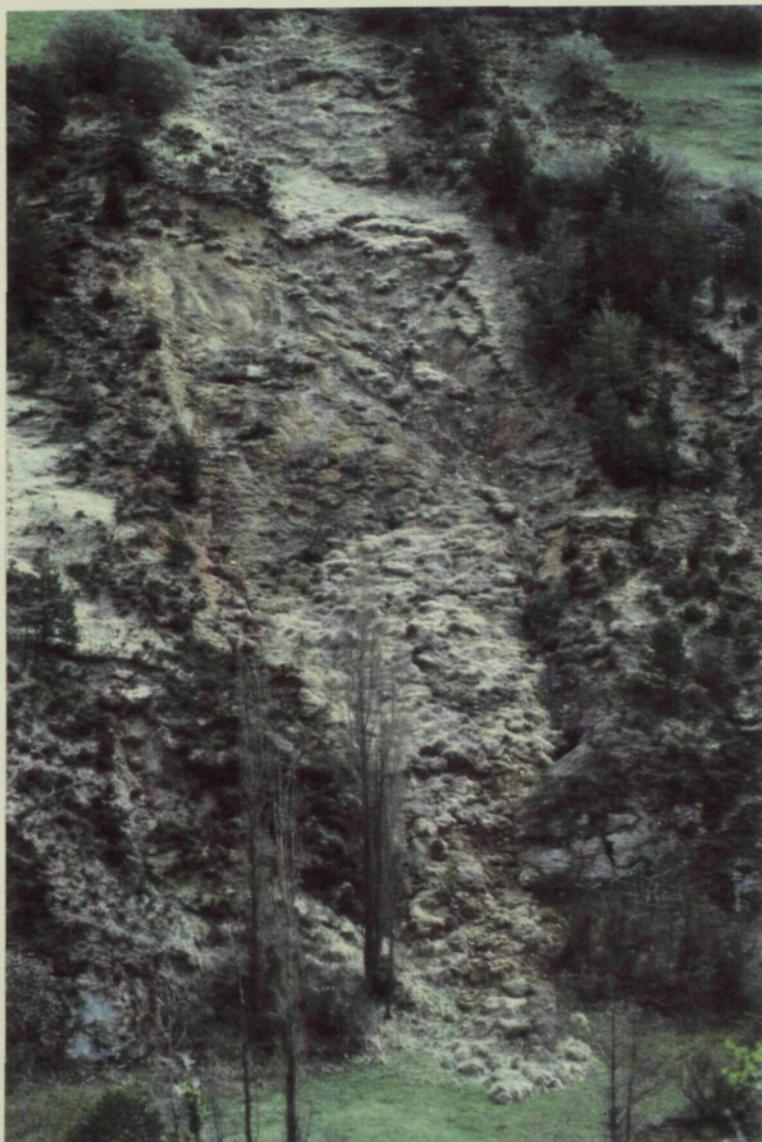


Figura 3.9. Movimiento de flujo
Próximo a Torrent de la
Masella en Gòsol (Solsonés).

Figura 3.10. Desprendimientos
en los bancos calizos
garumnienses de Vallcebre.





Figura 3.11. Vista general de la colada de La Coma (Solsonés), desarrollada sobre los materiales arcillosos del Paleoceno superior.



Figura 3.12. Deslizamiento traslacional y corrientes de derrubios desarrollados sobre los materiales margosos del Eoceno inferior, en la zona próxima a La Pobla de Lillet (Berguedà).

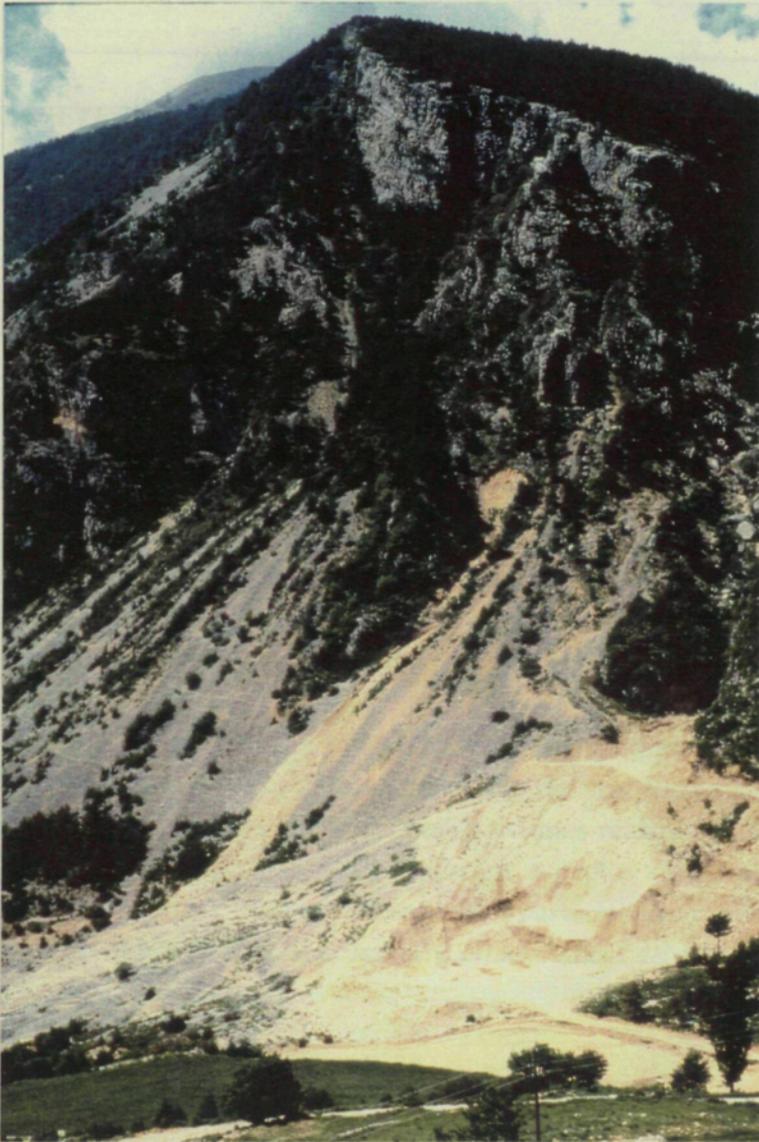


Figura 3.13. Corriente de derrubios en los depósitos de canchal en La Coma (Solsonés).

3.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO.

Considerando los objetivos que se han perseguido con el estudio, se ha efectuado una campaña de campo con el propósito de realizar un amplio inventario de laderas estables y laderas inestables en las que se habuira producido algún movimiento. La recogida de información cuantitativa y cualitativa de los parámetros del terreno referentes tanto a las características de la zona afectada como del propio fenómeno de inestabilidad, debía reflejar la mayor objetividad posible. Por este motivo y para evitar discrepancias en la interpretación de algunos de los parámetros morfológicos, se estandarizaron criterios mediante la elaboración de una ficha de campo.

La ficha de observaciones normalizadas en la que se sintetizaban las posibles respuestas, era complementada con comentarios, esquemas y fotografías, permitiendo que la pérdida de información debida a este tipo de sistematización fuera mínima.

Tras la identificación y posterior selección, mediante la observación de fotografía aérea, de las estaciones de medida se procedía, de una forma sistemática, al reconocimiento en campo de cada una de ellas. Las observaciones realizadas para cada estación se recogían en las fichas de campo, las cuales cubrían aspectos de geología, vegetación, uso de suelo, morfometría, etc..., que definían tres apartados que pueden resumirse en: *localización geográfica, características de la ladera y características del movimiento.*

3.2.1. PARÁMETROS DEL INVENTARIO.

A. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA: este apartado, donde se cubren aspectos de localización de la estación de medida, se constituye por un **Indicativo** que da nombre al punto inventariado, la denominación del cual está en forma de variable alfanumérica con una primera letra s (áreas estables) o l/c/b/p (movimientos de masa, según el tipo de morfología, como se indicará más adelante), seguido de tres números. Las **coordenadas UTM** permiten situar los puntos inventariados sobre los mapas militares 1:50.000 (ver anejo I).

B. CARACTERÍSTICAS DE LA LADERA: en este apartado se hace referencia a aspectos puntuales tales como la **orientación** de la ladera o la **altitud** (tomada con altímetro), y otros más generales referidos a la litología como el sustrato donde se hace una breve descripción de la naturaleza litológica del sustrato en la zona afectada por el movimiento de masa o propia del área estable inventariada, además de la asignación de la correspondiente formación o unidad litoestratigráfica. La presencia o ausencia de la formación superficial así como la potencia, han determinado de este modo, conjuntamente con el sustrato las características del punto inventariado.

La importancia decisiva que las **propiedades geotécnicas de los materiales** juegan en la estabilidad, ha hecho necesaria la estimación cuantitativa de estos parámetros, llevando a cabo una etapa de toma de muestras y ensayos sistemáticos de los materiales afectados por los deslizamientos, los resultados de los cuales se muestran en el apartado 3.3.

Con la **cobertera vegetal** se expresa, de forma sintética, las características descriptivas de la ocupación del suelo en el sector afectado por el fenómeno inestable (bosque, bosque bajo, prado, roca, etc...). En el caso de que la zona estudiada estuviera ocupada por bosque, se tomaba la distancia entre troncos de árboles, permitiendo cuantificar la densidad arbórea del bosque.

En el apartado de **geometría** se definen los parámetros cuantitativos que caracterizaran la ladera, sean ángulos de pendientes o distancias que permitan con posterioridad y mediante la combinación de éstos, definir unas variables numéricas con las que trabajar en los análisis, las cuales tengan un significado propio de tipo causal y que parámetros simples como algunas longitudes no tienen en sí mismos.

Se ha puesto especial atención en el estudio de la relación entre los ángulos de pendientes que definen la ladera y los deslizamientos, con el objeto de determinar valores críticos. Las mediciones realizadas sobre el terreno con un inclinómetro Enbeco, hacen referencia a la pendiente en la zona donde se ha producido la rotura, haciendo equivaler ésta a los ángulos tomados en las proximidades de la cicatriz del movimiento. Otro de los ángulos de pendiente tomado, es el que se encuentra justamente por encima de la zona inestabilizada. Se han realizado diversas mediciones, sobre tramos de pendiente uniforme, hasta alcanzar la considerada línea divisoria de aguas de la zona muestreada.

La definición precisa de la superficie de cuenca vertiente situada sobre la zona inestabilizada o posible zona inestable, ha consistido en la medición de la distancia que existe hasta la principal línea divisoria. Posteriormente ésta se confirmaría con los fotogramas aéreos de la zona. Las distancias se han tomado sobre el terreno con cinta métrica o distanciómetro Spectrum 500 (en las zonas de más difícil acceso) y definiendo tramos de pendiente uniforme.

La **morfología** de la ladera representada por parámetros cualitativos, intentaba definir la problemática derivada de las aguas superficiales y profundas, con el fin de determinar su influencia en la formación y desarrollo de los movimientos superficiales. Sabiendo la importancia que el agua tiene en la estabilidad de los taludes y laderas naturales, se vió la necesidad de desarrollar unos parámetros que definieran las condiciones hidrológicas del área afectada. Las características hidrológicas quedan sintetizadas mediante dos parámetros, los cuales hacen referencia a la distribución y concentración del agua en un punto según la morfología transversal de la ladera, pero nunca de forma cuantitativa, por lo que los procesos

hidrológicos determinados por la presión de agua ejercida sobre una superficie del terreno y su potencial de inestabilidad son desconocidos.

El papel que juega la estructura del macizo, que caracteriza la zona inmediatamente por encima de la zona de inestabilidad, en la formación de deslizamientos superficiales, ha sido especialmente estudiado a partir de los datos de observación que describen el tipo de cresta como principal línea divisoria (ver apartado 4.4). La estructura tiene especial importancia en la convergencia de las aguas superficiales y profundas.

En cada uno de los puntos inventariados se ha estimado de forma descriptiva el perfil vertical y horizontal que existe antea antes de producirse el deslizamiento. Aunque en general, se han podido obtener bastante fácilmente, se ha encontrado cierta dificultad o imposibilidad en aquellas laderas que han experimentado alguna modificación por procesos erosivos.

La importancia de la toma de estos datos que caracterizan el perfil topográfico y su influencia en las condiciones de estabilidad de la ladera, se explica con detalle en el apartado 4.5.

Los parámetros que hacen referencia a la localización geográfica y a las características de la ladera, se utilizan para caracterizar tanto las áreas afectadas por los movimientos, los cuales se identifican morfométricamente como comentaremos a continuación, como las áreas estables.

La determinación de ciertos parámetros en las áreas estables, tales como la litología del sustrato o el grosor de la formación superficial, ha presentado cierta dificultad dados los escasos afloramientos o perfiles verticales del terreno donde pudieran ser observados y cuantificados. Consecuentemente dichos parámetros se han estimados a partir de un número elevado de observaciones en áreas próximas al punto inventariado y en algún caso mediante la realización de pequeñas catas en el terreno.

C. CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO:

El presente estudio está dirigido, básicamente como ya se ha expuesto en los objetivos, a conocer uno de los aspectos de la problemática de los riesgos geológicos que se dan frecuentemente en las áreas de montaña del Pirineo Oriental.

En el trabajo se han considerado exclusivamente los problemas ligados a riesgos naturales provocados por los *movimientos de masa*, que no son respuesta a ningún tipo de afección antrópica, es decir, que no tengan relación directa con modificaciones provocadas por la actividad humana. Es necesario remarcar la importancia de esta consideración, puesto que

el *principio del actualismo* utilizado como base de nuestro estudio sólo tiene validez en condiciones naturales. Aquí solamente se han considerado ciertos fenómenos de inestabilidad en laderas naturales y en ningún caso se ha considerado la problemática derivada de la construcción de obras civiles que puedan modificar las condiciones originales del terreno, como por ejemplo los desmontes, donde las condiciones específicas de estabilidad dependerán en gran medida de la correcta ejecución y diseño del mismo.

Complejos mecanismos rigen el comportamiento y evolución de la ladera, siendo la contribución relativa de los parámetros del terreno diferente según el fenómeno inestable considerado. La gran diversidad de movimientos dificultaba un estudio global de la susceptibilidad, por lo que se determinó considerar únicamente movimientos puntuales, desestimando la problemática ligada a la inestabilidad generalizada de laderas como puede ser la reptación o solifluxión.

Por los motivos antes expuestos, los fenómenos inestables considerados finalmente se restringen a *movimientos puntuales de morfologías simples*, es decir, no forman parte del inventario aquellos movimientos que según *Varnes (1978)* clasificó como complejos y los cuales presentan tipologías que se definen como combinación de los tipos principales. Estas tipologías mixtas suelen darse en aquellos movimientos cuya magnitud de la masa desplazada es enorme, del orden del millón de metros cúbicos, pudiendo evolucionar durante el trayecto de uno a otro tipo, como ocurre en muchas coladas que iniciándose como un deslizamiento traslacional se transforman finalmente en flujo. Así, las dimensiones de los movimientos estudiados serán, por lo general, de pequeñas dimensiones lo que permitirá asimilarlos a tipologías básicas.

La morfología del movimiento incluye, como propusieran *Hatano & Oyagi (1977)*, la identificación del área fuente y lo que denominaron área de transporte-deposición.

Adaptando la propuesta de dichos autores, el movimiento se ha identificado siempre que estuviera constituido por sus dos partes principales, que se han definido como: *zona de rotura* y *zona de progresión de la masa*. En cada una de las zonas se ha realizado una descripción minuciosa de la geometría y morfología, identificando finalmente el tipo de rotura y el tipo de mecanismo de progresión de cada uno de los movimientos, es decir, se diferenciaba en términos descriptivos el principal mecanismo (rotacional, planar, etc..) en el estado inicial de formación del deslizamiento, así como en el proceso de evolución (corriente, colada, etc..).

C.1. Geometría del movimiento:

La *zona de rotura* o también llamada zona de cicatriz es la que corresponde al área donde

se ha producido un déficit de masa por desplazamiento del material, adoptando la parte superior del movimiento una forma cóncava limitada por un escarpe bajo el cual se encuentra la superficie original del deslizamiento.

La *zona de progresión* corresponde tanto al canal como al área de acumulación del material movilizado, ajustándose más correctamente al término de área de transporte-deposición utilizado por Hatano y Oyagi. El canal, en casos concretos, podía estar perfectamente definido, observándose una fuerte erosión y los característicos "natural levées" (Fig. 3.27) ó no diferenciarse de la zona de acumulación como ocurría en la mayoría de ellos. En este último caso, donde el canal no existía como parte individualizada del movimiento, se observaba desde el final de la zona de rotura, la presencia más o menos continua del material que constituía el depósito.

La zona de acumulación del depósito se ha contabilizado hasta aquel punto del terreno donde se evidenciaba que el material depositado procedía de la zona de rotura estudiada. En determinadas ocasiones el pie del depósito presentaba una morfología de lóbulo perfectamente visible y diferenciada, y en otros casos el depósito estaba constituido por derrubios aislados en el que el material fino había sido lavado por escorrentía; o pertenecer a material del sustrato rocoso que definía el alcance conseguido por el desprendimiento.

Los parámetros geométricos que definen la zona de rotura son: la longitud, el ángulo de la pendiente, la anchura, salto de cicatriz y profundidad máxima. La correcta determinación de la geometría de la zona de cicatriz permite, a su vez, derivar variables que serán utilizadas en los análisis como es el volumen u otras que se enumeran en el Capítulo 4 y que corresponden a la relación entre algunos de estos parámetros básicos.

La geometría de la zona de progresión o acumulación se define por los parámetros siguientes: longitud máxima del depósito, anchos, grosor del material acumulado y ángulo de la pendiente del depósito.

Algunos de estos parámetros, como longitud o pendiente se han determinado individualizando tramos de pendiente uniforme, la suma de los cuales ha estado en función de las dimensiones y forma del movimiento. La toma por tramos de estos parámetros, en vez de una sólo y continua medición, ha sido necesaria para definir correctamente y con mayor precisión la geometría del movimiento.

C.2. Tipología del movimiento:

La variedad de movimientos de ladera es tan grande que llevar a cabo una rigurosa clasificación es prácticamente imposible (*Hutchinson, 1968*). De este hecho se deriva el que

existan numerosas clasificaciones diferentes en la literatura que utilizan terminología con múltiples significados cada una, dando como resultado clasificaciones complejas y muy confusas.

Por este motivo y considerando las simplificaciones de los tipos de movimiento presentes en este trabajo, se ha realizado una clasificación, dadas unas características morfológicas observadas de campo, basada en la propuesta por *Varnes (1978)* e incorporando algunas observaciones hechas por *Hutchinson (1988)*, si bien en el estudio se ha empleado una terminología castellana propuesta para la investigación.

Los diferentes movimientos de masa que se han considerado podrían englobarse dentro de los siguientes tipos principales:

CAIDA DE BLOQUES: movimientos que comprenden la caída libre durante una gran parte del recorrido del material rocoso, formado por bloques aislados o niveles de despegue del macizo rocoso. El descenso rápido de la masa desprendida, finalmente se para tras sucesivos saltos, rebotes o rodadura, fragmentándose por sucesivos impactos y distribuyéndose al pie del talud. También se incluyen en este apartado aquellos bloques que por vuelco finalmente acaban en caída libre por la ladera.

DESLIZAMIENTOS: movimientos en los que el desplazamiento tiene lugar a lo largo de una o más superficies discretas que pueden o no ser visibles, siendo éstos relativamente rápidos. La masa movilizada lo hace rígidamente y aunque puede llegar a fragmentarse, se considera que se desplaza como si fuera un bloque unitario.

Las propiedades resistentes de los materiales, sean suelo o roca, incrementan con la profundidad en proporción a la presión por sobrecarga. Como resultado, se inhibe generalmente el desarrollo de roturas profundas, siendo la mayoría de deslizamientos que se dan en la naturaleza, relativamente superficiales y de tipo traslacional (*Hutchinson, 1988*).

FLUJOS: movimientos que pueden afectar a suelo o roca. En suelos el movimiento del material durante el desplazamiento se asemeja al de un fluido viscoso, donde el límite entre la masa movilizada y el terreno intacto puede tener lugar a través de una superficie bien definida e individualizada o una zona en la que haya una distribución completa de velocidades de desplazamiento. Cuando afecta a material rocoso la deformación se puede generar a través de las discontinuidades del propio macizo, o a través de una superficie de cizalla. En cualquier caso el resultado es una distribución de velocidades tal que parece un fluido viscoso con velocidades de desplazamiento que pueden ir de extremadamente elevadas a extremadamente bajas, según el material afectado y características propias de los diferentes tipos de movimientos que componen los flujos.

A continuación se describen los **tipos de rotura**, que identifican el tipo de mecanismo de desplazamiento en los primeros estadios de formación y los **tipos de progresión** del movimiento en los que evoluciona en las últimas etapas y que es la morfología que se puede apreciar una vez ocurrido el deslizamiento.

La definición de los tipos de rotura y tipos de desarrollo, como cualquier clasificación comporta una simplificación de los hechos y por tanto una pérdida de información que se debe asumir.

C.2.1. Tipos de rotura:

Planar. Movimiento de masa que tiene lugar a lo largo de una superficie más o menos plana. El movimiento, aunque frecuentemente es controlado por algunas discontinuidades estructurales del macizo, tales como la estratificación, fallas, diaclasas, etc..., también la variación de la resistencia al corte u otras propiedades geotécnicas entre diferentes formaciones litológicas del terreno, como los depósitos coluviales y el sustrato rocoso pueden favorecer el deslizamiento. (Fig. 3.14)

Rotacional. Deslizamiento que se produce a través de una superficie de rotura curva, provocando un giro de la masa en movimiento según un eje imaginario por encima de su centro de gravedad. Se caracterizan por ser movimientos relativamente rápidos que pueden afectar al sustrato alcanzando profundidades importantes, del orden de alguna decena de metros o afectar únicamente a la formación superficial. (Fig. 3.15)

Los tipos de rotura planar y rotacional se seleccionaron sólo cuando afectaban a materiales del sustrato predominantemente arcilloso o a depósitos cuaternarios. En ningún caso se inventarió alguna de estas roturas que pudieran afectar a material rocoso. Tampoco fueron seleccionadas las roturas sucesivas o múltiples definidas por *Hutchinson (1988)*, considerando únicamente las simples.

La masa de suelo, una vez desencadenado el movimiento a través de una rotura planar o rotacional, puede evolucionar y desarrollar diferentes morfologías de movimiento que pueden ser propias de un deslizamiento o de un flujo, y que estarán condicionadas por diversos factores tales como el tipo de material, contenido en agua, velocidad del movimiento inicial, topografía, etc...

Desprendimiento. Movimiento de caída libre extremadamente rápido, de suelo o roca. Las dimensiones de la masa desprendida son pequeñas (de centenares de metros cúbicos) cuando se trata de formaciones metamórficas (pizarras, esquistos.) puesto que la densidad de

fracturación es elevada. En formaciones conglomeráticas o carbonatadas donde la densidad de fracturación es menor, la generación de desprendimientos suelen llegar a tener dimensiones de algunos miles de metros cúbicos. No se han encontrado desprendimientos de más de tres o cuatro mil metros cúbicos, puesto que éstos se producen en las partes altas de la ladera por caída de algún nivel de las cornisas que la forman. En algunos de estos casos el material baja canalizado como si se tratara de una corriente de derrubios.

Las causas que originan estos desprendimientos suelen ser diversos, desde la gelifración a la tensión provocada por las raíces de los vegetales. En algunos casos simplemente la socavación de niveles inferiores más fácilmente erosionables puede provocar el desplome de las formaciones rocosas superiores.

De los dos tipos de desprendimientos propuestos por *Hutchinson (1988)*, consideramos únicamente el primero, el que hace referencia a la caída de una masa de suelo o roca, desestimando aquellos que son debidos a la caída de un bloque previamente aislado. Del primer tipo de desprendimientos mencionados, sólo se han seleccionado aquellos que afectaban a materiales rocosos (Fig. 3.16).

C.2.2. Tipos de desarrollo:

Traslacional (o paquete). Los deslizamientos traslacionales son desplazamientos más o menos compactos del nivel de suelo superficial, siguiendo el contacto con el terreno natural. El mecanismo traslacional de desplazamiento permite por lo general que se conserve la morfología inicial aunque en algunos casos se rompa el bloque en unidades o paquetes más o menos independientes. En cualquier caso la vegetación existente sobre estas unidades deslizantes conserva la posición de vida, por las características del movimiento (Fig. 3.14 y 3.17).

Corrientes. Movimientos rápidos que pueden derivar de una rotura plana o rotacional y que se caracterizan por la deformación que experimenta la masa durante su trayectoria descendente, dando lugar a un flujo desordenado donde se mezclan los material movilizados sean los depósitos superficiales, el sustrato e incluso la vegetación. Dada la baja cohesión que presentan, en su mayoría los materiales afectados por este tipo de movimientos, la velocidad que adquieren durante el desplazamiento suele ser elevada y comunmente aquellos que movilizan gran cantidad de material, discurren siguiendo canales de drenaje ya existentes. A menudo la densidad del flujo es tan elevada que es posible observar bloques de dimensiones extraordinarias formando parte del depósito que ha sido movilizado (Fig. 3.18 y 3.19).

Coladas. Si el flujo de tierra (corrientes) está formado por abundante material cohesivo de

granulometría fina, preferentemente limo-arcillosa, el tipo de desarrollo del movimiento recibe el nombre de colada. Los movimientos se inician, generalmente con rotura rotacional, desarrollando un movimiento de tipo flujo donde el material movilizado se deforma durante el descenso, pero generalmente sin llegar a fragmentarse el grueso del depósito. La morfología del depósito es uno de los factores que caracteriza a este tipo de movimientos, adoptando una forma de lengua que se desplaza, debido a su viscosidad, a velocidades relativamente bajas (Fig. 3.20 y 3.21).

Bloques. Tipo de desarrollo de la masa movilizada, cuando el material se ha desplazado con rebotes, rodadura, etc... como corresponde a una masa desprendida.

C.3. Datos complementarios:

Con el objetivo de complementar la clasificación morfológica se incorporaron a la ficha inventario algunos datos que hacían referencia, por ejemplo a la **evolución posterior del fenómeno**. En este apartado se hace referencia a la regeneración del área degradada por el deslizamiento, mediante la presencia o ausencia de vegetación, tanto en la zona de rotura como en el depósito. También se describe como la acción de las aguas superficiales de arroyada favorecen la erosión.