



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

6.2.2. Función discriminante de las variables que caracterizan la ladera. Contribución de la cobertera vegetal según Tusr.

En esta segunda fase, se ha estudiado el comportamiento de la variable *tusr* como representante cualitativa de la diversidad vegetal del terreno. Tras conocer los resultados discriminantes conseguidos por la función en la que se incluya dicha variable, se podrá determinar cuál de las variables (*Insoq*, *tusr*) descriptivas de la cobertera vegetal, reflejan mejor la influencia de este factor en la conducta inestable de la ladera.

La función discriminante que se ha obtenido del análisis (ver Fig. 6.25) es de la forma:

$$F_{dis} = 1.170421con - 0.10193tusr - 0.29764tre1 + 1.28052lgrfs + 0.12401tanig - 0.02294tancg - 6.21901 \quad (7)$$

siendo la función discriminante con coeficientes estandarizados:

$$F_{est} = 0.637741con - 0.41440tusr - 0.23686tre1 + 0.20387lgrfs + 0.86515tanig - 0.21332tancg \quad (8)$$

El modo de interpretar los valores discriminantes de la función (7), (8) y las variables de predicción que la componen, es el mismo que ya se ha explicado anteriormente en la función (5), (6). De esta forma la variable *tusr* continua favoreciendo la estabilidad tal y como lo hacía su homóloga *Insoq* en la función (5).

Hay que destacar la equivalencia entre los resultados obtenidos de la función (5) y la función (7), donde no existe variación significativa de los coeficientes estandarizados de las variables de predicción, manteniéndose la importancia o peso relativo entre ellas. Parece ser que tanto *Insoq* como *tusr* actúan de la misma manera, teniendo una contribución relativa muy semejante en la función. Como ambas explican en el área de estudio lo mismo tanto cualitativa como cuantitativamente, puede seleccionarse cualquiera de ellas como posible variable de predicción, advirtiéndose que nunca pueden tomarse conjuntamente en la definición de la función.

La marcada influencia de la cobertera vegetal en el comportamiento de la ladera queda claramente reflejada por el análisis, sin embargo por tener *tusr* un carácter discreto que representa mejor que *Insoq* las distintas coberteras, puede ser práctica la utilización de esta variable cualitativa cuando se trata de evaluar su contribución en la estabilidad a nivel

regional, pues facilita en una primera fase la obtención de datos mediante una cartografía de usos del suelo (zonación de coberteras vegetales) que no podría obtenerse a través de la variable Insoq, considerando que ésta representa la densidad arbórea del dominio forestal.

VARIABLE	TOLERANCE	F TO REMOVE
LCON	0.6810084	43.552
TUSR	0.9282686	23.471
TREL	0.9894963	7.7387
LGRFS	0.7505446	4.2951
TANIG	0.7964670	114.95
TANCG	0.7939346	4.9868

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS

EIGENVALUE	PERCT OF VARIANCE	CUMULA PERCENT	CANONICAL CORRELATION	: AFTER WILKS' FCN	LAMBDA	CHISQ.	D.F.	SIGNIF
0.99328	100.00	100.00	0.7059135	:	0	0.5016	189.00	6 0.0000

STANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

LCON	0.63774
TUSR	-0.41440
TREL	-0.23686
LGRFS	0.20387
TANIG	0.86515
TANCG	-0.21332

UNSTANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

LCON	1.170424
TUSR	-0.1019287
TREL	-0.2976426
LGRFS	1.280515
TANIG	0.1240119
TANCG	-0.2294184E-01
(CONSTANT)	-6.219008

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS EVALUATED AT GROUP MEANS (GROUP CENTROIDS)

GROUP	FUNC 1
0	-0.98950
1	0.99662

Figura 6.25. Resultados del análisis discriminante -función (7) (8)- para la separación de las laderas estables e inestables con la incorporación de la variable TUSR para explicar el tipo de cobertura vegetal y uso del suelo.

La frecuencia de deslizamientos con respecto al tipo de cobertera (Tabla 6.6) que se ha obtenido del análisis descriptivo en el área de estudio, corrobora la conducta que la variable *tsur* refleja en el análisis discriminante. Así la tabla muestra, considerando el número de muestras inventariadas, la existencia de una mayor inestabilidad, expresada por el número de deslizamientos, en zonas donde la cobertera es de tipo prado, siendo más baja en zonas con bosque bajo y bosque con claros, ambas con una influencia semejante y bastante menor en áreas donde domina la cobertera forestal densa.

T. Cobertera	F _c	F _d	f _{dc}	F _{dc}
Prado	40.3	44.9	85.5	28.4
Bosque bajo	12.6	12.0	73.1	24.3
Bosque claro	18.4	18.3	76.3	25.3
Bosque denso	28.6	24.7	66.1	21.9

Tabla 6.6. Frecuencia de deslizamientos en el área de estudio según el tipo de cobertera vegetal. F_c: n° de muestras con un tipo de cobertera/n° de muestras totales x 100; F_d: n° de deslizamientos en un tipo de cobertera /n° de deslizamientos totales x 100; f_{dc}: n° de deslizamientos en un tipo de cobertera /n° de muestras con un tipo de cobertera x 100; F_{dc}=f_{dc}/∑ f_{dc} x 100.

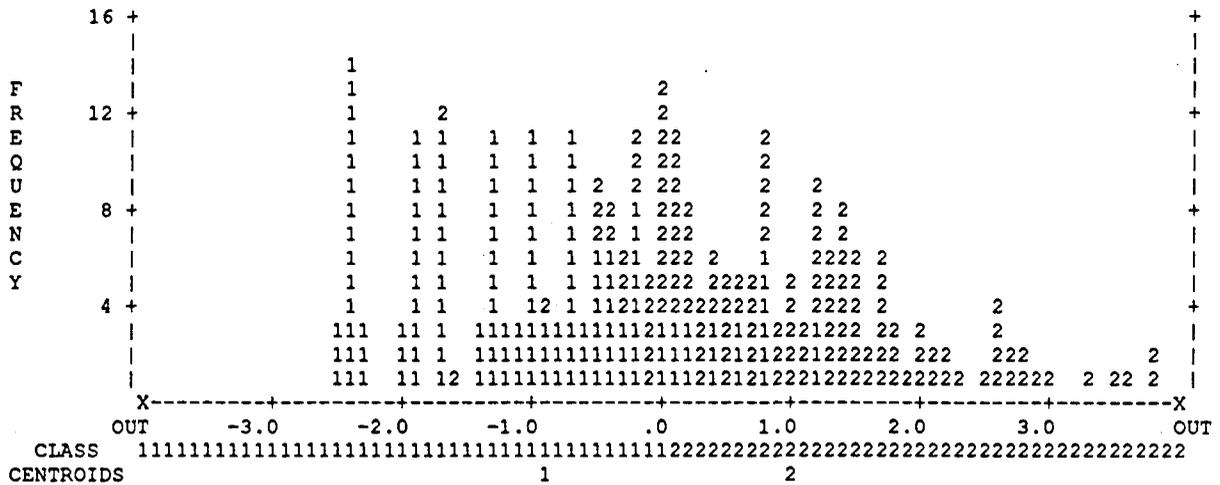
La capacidad de predicción de la combinación de variables que define la función (7) es, de un 82.65% (Fig. 6.26). Si se toma como índice de clasificación un valor de F=-0.4 el porcentaje de clasificación correcto aumenta a un 88.5% (Fig. 6.27), siendo pronosticados un 95.6% de las áreas inestables en detrimento de las áreas con comportamiento estable que decrecen a un 81.4%.

El valor medio de la función (7) para las laderas estables de -0.98950 y para los inestables de 0.99662, no muestran un distanciamiento significativo respecto al obtenido con *Insoq* en la función (5). Sólo los valores de los parámetros indicativos del valor discriminante de la función (λ -Wilks) reflejan, tal como se transmite en los resultados de clasificación, una pequeña mejora en la explicación del comportamiento inestable de la ladera cuando el factor que representa la cobertera vegetal está definido por *Insoq*. Sin embargo, aunque los resultados de clasificación global son ligeramente diferentes (para F=0), cuando se varía la probabilidad de pertenencia de los individuos en las poblaciones estables/inestables, el porcentaje de predicción para áreas inestables (cuando F=-0.4) supera tanto para la función (5) como para la función (7) el 95% con muy poca diferencia entre ambas.

De todos los resultados extraídos de los análisis expuestos hasta el momento, se desprende que no existe diferencia significativa de la influencia que tienen las variables *Insoq* y *tsur*

como representantes de la cobertura vegetal en el comportamiento de la ladera, siendo el criterio seguido para la incorporación de una u otra en la función, la extensión del área que se vaya a estudiar y consecuentemente los medios de que se disponga para realizar la cartografía temática de usos de suelo, necesaria para la definición de la función.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS Y CLASIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN DISCRIMINANTE (7)



CLASSIFICATION RESULTS -

ACTUAL GROUP	NO. OF CASES	PREDICTED GROUP MEMBERSHIP	
		0	1
GROUP estable	140	118 84.0%	22 16.0%
GROUP inestable	139	26 18.7%	113 81.3%

PERCENT OF "GROUPED" CASES CORRECTLY CLASSIFIED: 82.65%

Figura 6.26. Histograma de frecuencias y clasificación (con índice discriminante F=0) de la función discriminante (7) con la situación de los centroides de cada grupo (estable/inestable).

6.2.3. Contribución de la altitud y de la orientación en la estabilidad de la ladera.

Para conocer el control que pueden ejercer algunas de las condiciones topográficas en la generación y distribución espacial de los movimientos de ladera, se ha estudiado en este apartado el comportamiento de dos variables, representadas por la altitud y la orientación de la ladera.

Los objetivos que se persiguen con este análisis son:

- examinar de forma individualizada las características topográficas de altitud y orientación de la ladera, en el área de estudio.
- identificar cómo influyen y cuál es su contribución en la ocurrencia de deslizamientos.

Para alcanzar dichos objetivos se ha llevado a cabo un análisis descriptivo de las variables topográficas además de otro de conjunto con las restantes variables del terreno que han sido estudiadas en el apartado anterior. Tanto el análisis independiente de cada variable como el análisis multivariante, han permitido obtener información del modo en que actúan los factores topográficos en la inestabilidad, pudiendo cuantificar su influencia con respecto a otros parámetros del terreno y por consiguiente que puedan explicar mejor el la susceptibilidad de la ladera frente a deslizamientos desde una perspectiva regional.

El área de aplicación del estudio que a continuación se expone, se centra exclusivamente en la zona del Berguedà-Solsonès y por tanto se excluye del conjunto de la muestra (analizada en el apartado 6.2.1 y 6.2.2) todos aquellos datos que no pertenecen a dicha zona, reduciéndose de este modo a 157 el total de casos del inventario.

El centrar el análisis en una de las áreas de estudio ha sido motivado por el sesgo que se genera en la distribución de altitudes de la muestra como consecuencia de haber seleccionado las áreas estables en la zona del Berguedà-Solsonès, topográficamente más baja que la de Andorra. La marcada diferencia orográfica representada por las altitudes así como la orientación de los valles principales de ambas zonas han condicionado pues el estudio de las variables topográficas. Es necesario pues aclarar que no se contempla todo el rango de altitudes y orientaciones en las que hubo deslizamientos en Noviembre de 1982, siendo el estudio una aproximación al comportamiento de estos factores respecto a la estabilidad.

6.2.3.1. Análisis descriptivo de la orientación y altitud.

Antes de determinar si el comportamiento estable/inestable de la ladera es o no dependiente de las variables topográficas, se han estudiado de forma descriptiva estos

factores para conocer las causas físicas que directa o indirectamente provocan que los mismos se muestren como variables importantes que deban ser consideradas a la hora de hacer un análisis de susceptibilidad a escala regional.

- La orientación (ORIE) de la ladera afecta a la distribución de la precipitación así como a la radiación solar, influyendo en el contenido de agua del terreno y la consecuente reducción de las tensiones efectivas, contribuyendo de este modo a su inestabilidad directa o indirectamente (Gao, J. 1993).

Para poder reflejar mejor la interpretación física que se hace de ORIE a través de las horas de sol a la que se expone la ladera y todas las causas que de ella se derivan, la orientación de cada punto inventariado se ha transformado a valores entre 0° y 180° queriendo expresar su mayor o menor proximidad a las zonas de solana o umbría. Así por ejemplo, una ladera con una orientación 320°N (NW) se representa en el inventario como 40°N (NE), no considerando la diferencia de horas de exposición entre una ladera orientada al NW y al NE.

Las laderas a la solana (S) reciben mayor radiación solar que las de umbría (N), como resultado de ello las laderas orientadas al sur por lo general suelen ser más secas antes de las tormentas, necesitando mayor cantidad de agua para alcanzar el mismo nivel de saturación que las orientadas al norte. Consecuentemente las tensiones de corte que se generan en una ladera a la solana suelen ser menores que en las laderas de umbría, considerando las mismas condiciones (litología, características geotécnicas, etc.) en ambas y por ello más estables (Gao, J.1993).

Otros efectos derivados de la orientación de la ladera son la desecación y fisuración que por exposición solar afectan a las formaciones arcillosas del sustrato. Estas alteraciones mecánicas de los niveles superficiales de estas formaciones favorecen la infiltración, incrementando la permeabilidad del sustrato, aún siendo su matriz prácticamente impermeable. El incremento del contenido de agua en el terreno disminuye la estabilidad como consecuencia de los efectos negativos que provocan al modificar algunas de las propiedades (cohesión, ángulo de rozamiento interno, plasticidad...) del suelo, facilitando el desplazamiento de una superficie potencial de rotura (Crozier, 1986).

Expuestas estas consideraciones generales, parece ser que la distribución de frecuencias de los deslizamientos ocurridos en el área de estudio (Fig. 6.28) no siguen la misma tendencia, pues la figura refleja un dominio de la inestabilidad por deslizamiento en laderas orientadas al sur. Esta aparente contradicción ha sido explicada por Clotet & Gallart, 1984 como causa de la dirección del temporal de lluvias de procedencia S-SE, provocando precipitaciones especialmente importantes en las laderas de solana.

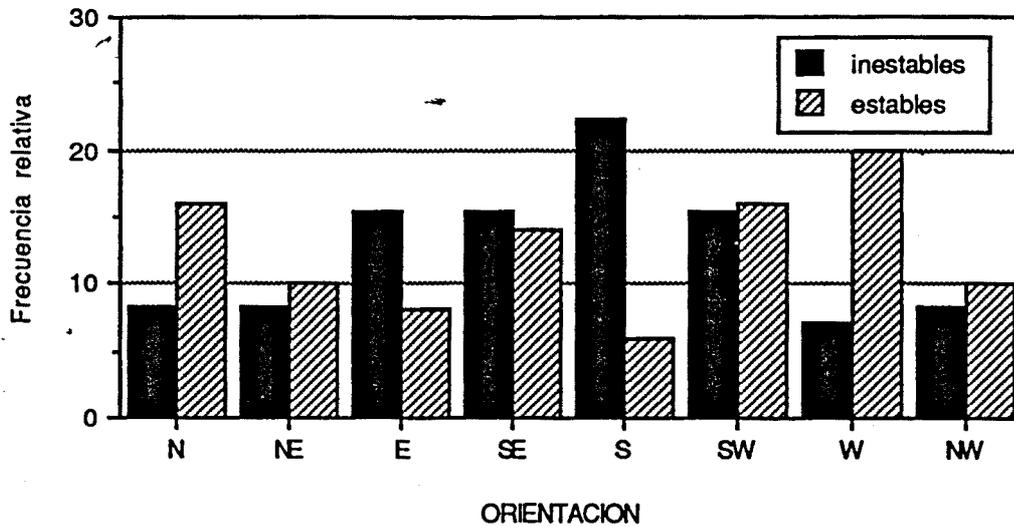


Figura 6.28. Histograma de frecuencias de la orientación (ORIE) de las laderas estables e inestables.

Sin embargo la irregularidad en la distribución de los movimientos no tiene como única respuesta la dirección del temporal, existiendo otros factores que sin duda la han condicionado. La relación entre la orientación de las laderas y el tipo de cobertera vegetal es probablemente una de las causas que mejor explica la distribución espacial de los deslizamientos. Existe generalmente una menor protección de la cobertera vegetal a la solana que se deriva de la insolación que esta recibe, favoreciendo cualquier mecanismo de erosión del suelo. Las vertientes de umbría (Tabla 6.7) muestran en el área de estudio (considerando los puntos del inventario) un dominio de la cobertera forestal de un 61.3%, con una densidad arbórea superior ($\overline{nsq}=16.76$) al de las vertientes de solana ($\overline{nsq}=7.65$), donde dominan los prados y bosques bajos con sólo un 45.3% de bosque.

	Tipo cobertera (TUSR)		Densidad forestal (NSOQ)
	bosque denso	bosque claro	
solana	17.9%	27.4%	7.65
umbría	48.4%	12.9%	16.76

Tabla 6.7. Relación entre la orientación de la ladera (solana/umbría) y el tipo de cobertera analizado según las variables TUSR y NSOQ.

También la estructura geológica de la zona, con continuos niveles más resistentes de calizas y conglomerados buzando hacia el norte han podido contribuir en la distribución de los movimientos.

- La posible dependencia entre la distribución espacial de deslizamientos y la altitud (ALCA) se atribuye a una estrecha relación entre ésta y la pluviometría, contribuyendo indirectamente a la infiltración del agua y sus consecuentes efectos sobre los materiales de la vertiente (Gao, J. 1993).

Gallart & Clotet, 1988 analizaron la relación existente entre la frecuencia de deslizamientos y la pluviometría en la zona de estudio, obteniendo una función de regresión (log-log), a un nivel de significación del 99.8%, de la forma:

$$n = 1.5 \cdot 10^{-16} \cdot r^{7.4}$$

siendo n el número de movimientos de masa y r la precipitación en mm (Fig. 6.29).

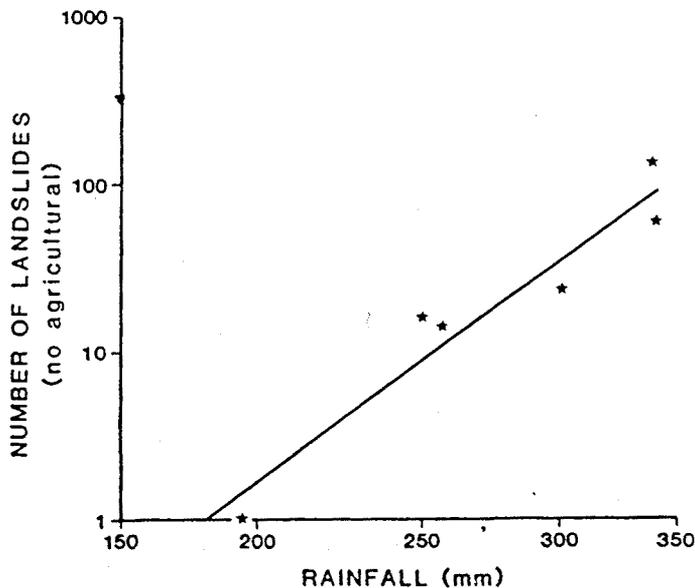


Figura 6.29. Número de movimientos de masa (excluidas las roturas en taludes agrícolas) en 25 Km² alrededor de cada pluviómetro respecto la lluvia total de cada estación. Datos de las lluvias acaecidas durante los días 7-8 de Noviembre de 1982 (Gallart & Clotet, 1988).

La relación entre la ocurrencia de movimientos de masa y la pluviometría en la zona de estudio, parece evidenciarse con los resultados obtenidos por los autores, sin embargo se necesita conocer por qué motivo la distribución de deslizamientos está condicionada por la altitud topográfica (Fig. 6.30), como se podrá comprobar a continuación de los resultados obtenidos en el apartado 6.2.3.3.

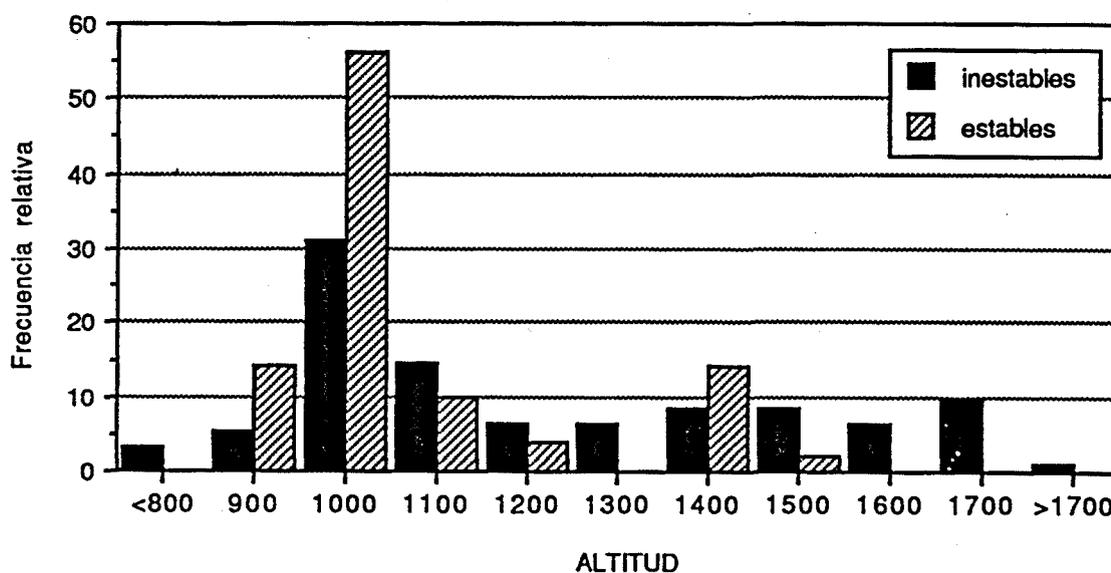


Figura 6.30. Histograma de frecuencias de la altitud (ALCA) de las laderas estables (50) e inestables (107) inventariadas.

Carrara et al, 1978 obtuvieron una correlación entre la altitud y la pluviometría de $r > 0.80$ en Ferro (Italia). Resultados similares son los conseguidos en el Berguedà-Solsonès, tras analizar los datos, de 28 pluviómetros instalados en la zona, cedidos por el Servicio Meteorológico Nacional. Para el análisis se ha utilizado la precipitación acumulada de los días 6 y 7 de Noviembre de 1982 y la altitud correspondiente al pluviómetro. Como se muestra en la figura 6.31, la función de regresión (para $\alpha = 0.01$) es:

$$y = 0.311x - 48.73$$

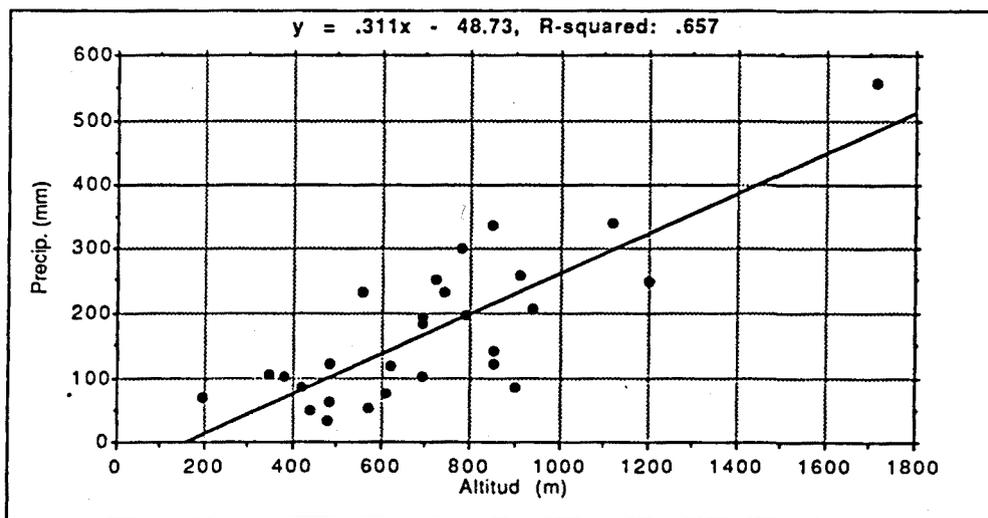
siendo y la precipitación en mm y x la altitud en m. El coeficiente de correlación que se ha obtenido de la función es de $r = 0.81$, siendo $r^2 = 0.66$.

Del análisis descriptivo de los factores topográficos altitud y orientación, se concluye que las causas que indirectamente hacen que éstos tengan una cierta influencia en el comportamiento inestable de las vertientes, son atribuidas en esencia a la pluviometría y la radiación solar respectivamente. Para conocer de forma cuantitativa la contribución de estos

factores en la estabilidad y su relación con otros parámetros relativos al terreno ha sido necesario retomar las técnicas multivariantes que permitan analizar en profundidad su comportamiento conjunto.

	Precip. (mm)	Altitud (m)	localización
1	555.8	1711.0	'La Molina'
2	250.0	1200.0	'Busa'
3	340.0	1118.0	'Vallcebre'
4	207.7	940.0	'Camprodón'
5	258.0	908.0	'Ribes de Fr...
6	122.5	850.0	'Tantellatge'
7	338.0	848.0	'La Pobla de...
8	196.5	790.0	'Borredà'
9	300.0	780.0	'Bagà'
10	232.5	738.0	'Campdevàno'
11	252.0	720.0	'C.T. Cercs'
12	185.0	690.0	'Berga'
13	193.0	690.0	'Ripoll'
14	117.8	617.0	'Casserres'
15	76.8	610.0	'Riner'
16	233.0	555.0	'Organyà'
17	102.0	692.0	'La Seu d'Ur...
18	121.0	480.0	'Emb. d'Olia...
19	85.0	417.0	'Puigreig'
20	100.5	380.0	'Olot'
21	105.0	347.0	'Les Planes ...'
22	86.5	900.0	'Sta M. de B...
23	142.0	850.0	'Vilanova de...
24	51.1	570.0	'Balenyà'
25	60.7	484.0	'Vic'
26	32.7	475.0	'Vall d'En B...
27	50.0	440.0	'Gurb'
28	67.7	193.0	'Darnius'

a)



b)

Figura 6.31. a) Tabla de datos de precipitación y altitud de los puntos utilizados en el análisis de regresión. b) Relación entre la precipitación y la altitud de las 28 estaciones de medida.

6.2.3.2. Relación entre las variables y la estabilidad.

Siguiendo la metodología de análisis previa a la definición de la función discriminante con la que se obtendrá los valores cuantificados de la contribución de los factores topográficos y del terreno, se ha estudiado detalladamente la significación de las variables y sus posibles dependencias.

Sobre el inventario de muestras del área del Berguedà-Solsonès, se han analizado un total de 12 variables, algunas de ellas transformadas adecuadamente de forma que se aproximaran a un modelo de distribución normal. Las variables analizadas son: **tanig**, **tancg**, **ldisc**, **lcon**, **lgrfs**, **lnoq**, **alca** y **orie** como variables cuantitativas y **trel**, **tcar**, **tusr** y **tsub** como cualitativas.

Aunque de los análisis previos ya se conocen correlaciones entre algunas de las variables (**ldisc-lcon**, **tusr-lnoq**), es necesario determinar qué variables de cada par correlacionado representa mejor el conjunto muestral que se está estudiando en ese momento. Es importante destacar la necesidad de analizar todas las variables cuando haya una modificación de la muestra.

Las tablas 6.8 y 6.9 muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de los análisis de varianzas y medias respectivamente sobre las 12 variables representadas en la muestra. Los resultados de ambos análisis siguen destacando la significación estadística de las variables **tanig**, **lgrfs** y **lcon** en la separación de las poblaciones estable e inestable que componen la muestra; seguidamente aparecen las variables **alca** y **trel**. De las medias de los grupos (0,1) se observa que los valores elevados de **alca** favorecen la inestabilidad, siendo este comportamiento el que cabía esperar de los análisis descriptivos realizados en el apartado 6.2.3.1. Aunque la variable **orie** no muestra según el análisis de medias un poder discriminante, la tendencia que se deriva es de mayor inestabilidad para vertientes orientadas preferentemente el S-SE.

La significación de cada una de las variables con un elevado grado de dependencia, determina la elección de una de ellas. Así, **lcon** muestra un valor de F mucho mayor al de su homóloga **ldisc**, siendo seleccionada la primera; contrariamente a los análisis precedentes es aquí **tusr** la que ha sido seleccionada como variable que identifica la cobertera vegetal por su mejor representación y poder discriminante respecto a **lnoq**.

Tras la exclusión de las variables **ldisc** y **lnoq**, a continuación se analizan las relaciones entre las 10 restantes variables, con el objetivo de determinar posibles interacciones entre ellas. Para ello, se analiza la distribución espacial de las variables mediante el análisis factorial de componentes principales.

TIPO DE LADERA (0,1)		
VARIABLE	F	Prob. F ($\alpha = 0.01$)
TANIG	37.499	0.000
TANCG	1.382	0.242
LDISC (\lg_{10} DISC)	1.683	0.197
LCON (\lg_{10} CCON)	14.557	0.000
LGRFS (\lg_{10} GRFS + 1)	16.633	0.000
LNSOQ (\lg_{10} NSOQ)	0.470	0.494
ALCA	9.639	0.002
ORIE	6.047	0.015
TREL	6.394	0.013
TCAR	2.909	0.090
TUSR	1.948	0.165
TSUB	1.750	0.188

Tabla 6.8. Resultados del test oneway para las variables que caracterizan las laderas estables e inestables.

Variable	Tipo Ladera	Media	Desviación estandard	Error estandard	Test F ($\alpha = 0.05$)	Test t ($\alpha = 0.01$)
TANIG	0 = estable	26.151	6.735	0.952	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 \neq \mu_1$
	1 = inestable	33.369	6.771	0.691		
TANCG	0	25.371	7.938	1.123	$\sigma_0^2 \neq \sigma_1^2$	$\mu_0 = \mu_1$
	1	27.356	10.475	1.069		
LDISC	0	1.673	0.378	0.053	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 = \mu_1$
	1	1.774	0.476	0.049		
LCON	0	3.009	0.457	0.065	$\sigma_0^2 \neq \sigma_1^2$	$\mu_0 \neq \mu_1$
	1	3.442	0.730	0.075		
LGRFS	0	0.219	0.150	0.021	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 \neq \mu_1$
	1	0.343	0.185	0.019		
LNSOQ	0	0.009	1.651	0.233	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 = \mu_1$
	1	-0.164	1.324	0.135		
ALCA	0	1021.000	165.340	23.383	$\sigma_0^2 \neq \sigma_1^2$	$\mu_0 \neq \mu_1$
	1	1151.948	273.050	27.868		
ORIE	0	85.420	51.519	7.286	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 = \mu_1$
	1	107.697	52.167	5.324		
TREL	0	0.180	0.850	0.120	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 \neq \mu_1$
	1	-0.188	0.825	0.084		
TCAR	0	2.810	1.714	0.242	$\sigma_0^2 \neq \sigma_1^2$	$\mu_0 = \mu_1$
	1	3.432	2.263	0.231		
TUSR	0	11.700	4.122	0.583	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 = \mu_1$
	1	10.718	1.983	0.407		
TSUB	0	3.200	1.064	0.151	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2$	$\mu_0 = \mu_2$
	1	2.979	0.897	0.092		

Tabla 6.9. Resultados del test t para las variables que caracterizan la ladera diferenciando las estables de las inestables donde se ha producido algún deslizamiento. En estos nuevos análisis se incorporan las variables de orientación (ORIE) y altitud (ALCA).

La matriz de correlaciones de las variables (Fig. 6.32) no muestra una dependencia significativa entre ninguna de ellas. Esta independencia se confirma con el elevado número de ejes factoriales que son necesarios para obtener una buena representación de la varianza total de la muestra. De los resultados del análisis se determina que es necesario un mínimo de 6 componentes principales, a los que se asocia una mayor dispersión (78.3% acumulada), para que esté representada una parte importante de la varianza de cada variable (ver parámetro estadístico final de comunalidad). Sin embargo, para caracterizar correctamente la dispersión total de la muestra, es decir el 100% de la varianza, se necesitan 10 factores.

Con estos resultados, y utilizando el análisis factorial como una herramienta de exploración de las variables, se está en condiciones de asegurar el elevado grado de independencia que existe entre éstos y justificar así, su utilización conjunta en el análisis discriminante.

6.2.3.3. Definición de la función discriminante.

La aplicación de la técnica discriminante sobre el análisis de 10 variables geológico-geomorfológicas, ha permitido valorar la importancia o peso que tiene cada una de ellas en los fenómenos de inestabilidad superficial del área considerada, además de obtener una función, que tras comprobar su fiabilidad y eficacia, permite ser utilizada para predecir la susceptibilidad del terreno frente a este tipo de fenómenos.

Siguiendo criterios de significación ($F > 1$) e independencia, las variables explicativas que han sido introducidas en el análisis discriminante son: *tanig*, *tancg*, *lcon*, *lgrfs*, *alca*, *trel*, *tcar*, *tusr* y *tsub*. Se ha utilizado como variable de grupo *tlad* con valores de 0 y 1 para las poblaciones estables e inestables respectivamente.

Utilizando los mismos criterios de selección de las variables (método y controles estadísticos) que en análisis discriminantes anteriores, la función resultante de la aplicación ha sido (Fig. 6.33):

$$F_{disc} = 0.14136tanig + 0.70799lcon + 2.14408lgrfs - 0.02394tancg + 0.001822alca + 0.05855tcar - 0.10773tusr - 0.28562trel - 7.42184 \quad (9)$$

siendo la función estandarizada de la forma:

$$F_{st} = 0.95236tanig + 0.43137lcon + 0.36070lgrfs - 0.22222tancg + 0.41112alca + 0.11738tcar - 0.43555tusr - 0.23856trel \quad (10)$$

CORRELATION MATRIX:

	TANIG	TANCG	LCON	LGRFS	ALCA	ORIE	TREL	TCAR	TUSR	TSUB
TANIG	1.00000									
TANCG	.24135	1.00000								
LCON	-.16106	.18291	1.00000							
LGRFS	-.02331	.14968	.57184	1.00000						
ALCA	-.10734	.10074	.31670	.11718	1.00000					
ORIE	.09553	.16051	.07446	.18926	.11278	1.00000				
TREL	-.03332	-.04234	-.23137	-.13953	-.03486	-.23241	1.00000			
TCAR	-.08229	-.08909	.23694	.17832	.18167	-.06425	-.05413	1.00000		
TUSR	-.01426	.13760	.26064	.23034	.00974	-.22227	-.03518	.02206	1.00000	
TSUB	.12001	.16226	-.10170	-.27730	-.17965	.23239	-.03816	-.10409	-.03187	1.00000

FINAL STATISTICS:

VARIABLE	COMMUNALITY	* FACTOR	EIGENVALUE	PCT OF VAR	CUM PCT
TANIG	.88005	1	2.16349	21.6	21.6
TANCG	.72920	2	1.60896	16.1	37.7
LCON	.74441	3	1.24411	12.4	50.2
LGRFS	.74671	4	.99740	10.0	60.1
ALCA	.74692	5	.92372	9.2	69.4
ORIE	.75480	6	.89437	8.9	78.3
TCAR	.91587	*			
TREL	.67033	*			
TUSR	.77100	*			
TSUB	.87276	*			

Figura 6.32. Matriz de correlaciones de las variables analizadas y estadísticos finales del análisis de componentes principales.

De los resultados del análisis, lo primero que se advierte es la exclusión de *tsub* y *orie* de la función discriminante. El hecho de que estas variables no hayan sido seleccionadas no debe sorprender, pues a través de los análisis descriptivos de medias y varianzas con los que se había hecho un primer tanteo para conocer el valor discriminante de las variables, se había puesto de manifiesto la poca significación estadística de *tsub*, estando *orie* al límite de la misma.

La función que caracteriza la muestra en el área de estudio, obtenida de este último análisis, está formada por las mismas variables explicativas que habían sido seleccionadas en anteriores análisis (funciones 5,6,7 y 8) a las que se les han sumado *tcar* y *alca*. La variable *tcar*, que hasta entonces no había sido incluida en ninguno de los análisis discriminantes precedentes, ha sido seleccionada en éste, estando en el límite del nivel de significación ($F=1.18$) dado que el control estadístico de entrada de la variable en la función es de $F>1,0$ lo cual determina la baja varianza explicada por la variable.

La variable *alca*, que no había podido ser analizada hasta el momento, muestra una posición de importancia dentro de la función, con una significación estadística elevada.

Los valores discriminantes elevados resultantes de la función se asocian al comportamiento inestable de la ladera, siendo los coeficientes positivos de las variables *tanig*, *lcon*, *lgrfs*, *alca* y *tcar* los que contribuyen a incrementar el valor de la función. Contrariamente son las variables *tancg*, *tsur*, y *trel* las que explican, con coeficientes negativos, las condiciones estables de la ladera.

Las variables *alca* y *tcar*, cuya influencia respecto el comportamiento de la ladera todavía no ha podido ser desmostrada, aparecen en la función claramente unidas a factores inestabilizadores. El comportamiento de *alca*, se asocia a la relación estrecha que existe entre ésta y la pluviometría (ver ap. 6.3.2.1.) en un elevado coeficiente positivo de correlación. Son conocidos los efectos desestabilizadores de la lluvia, cuando ésta se combina con otros factores que pueden favorecer la inestabilidad, aumentando la frecuencia de deslizamientos como se ha demostrado en la relación pluviometría-frecuencia de deslizamientos por *Gallart & Clotet (1988)* en el área de estudio. Todos estas conexiones entre los diversos factores altitud-pluviometría-frecuencia de deslizamientos, corroboran el comportamiento que la variable *alca* muestra en la función discriminante, evidenciando la importante contribución que tiene en la misma.

La variable *tcar* muestra una influencia negativa que se deriva, como era de esperar, de la categorización que de ella se había hecho. La cuantificación que representan las distintas tipologías de cresta, asociada a una estructura determinada del macizo, han expresado correctamente el efecto que tiene el aporte de agua a un punto considerado de la ladera. Las condiciones morfológicas y estructurales del macizo favorecen mayor aporte de agua cuanto

mayor es el valor de la variable, reflejando de este modo un posible incremento de la inestabilidad.

El comportamiento de las restantes variables de la función que ha sido explicado en anteriores análisis, siendo el orden relativo de importancia que expresan los coeficientes de la función (10) semejante al de las funciones 6 y 8. Los resultados siguen mostrando a *tanig* (0.95) como la variable explicativa de mayor peso, seguida a cierta distancia de *lcon* (0.43), *tusr* (0.43) y *alca* (0.41) con similar contribución. Las variables *lgrfs* (0.36), *trel* (0.23) y *tancg* (0.22) son también, aunque con menor significación, importantes en la definición de la función. La baja significación de *tcar* (0.11) ha determinado su exclusión en un próximo análisis.

Tras obtener los resultados de clasificación, se ha comprobado la eficacia de la función discriminante (9) (10) en la predicción de áreas estables e inestables. Con una clasificación global de 82.2% (Fig. 6.34 y 6.35), la función muestra su claro valor discriminante entre las poblaciones con un valor medio (centroide) discriminante para la agrupación estable de -1.0241 y de 1.00978 para la inestable.

La exclusión de la variable *tcar* del análisis mediante controles estadísticos, ha permitido obtener una nueva función discriminante que no ve afectados significativamente los coeficientes de la misma (Fig. 6.36). Sin embargo, la eficacia de esta nueva función es mayor según se desprende de los resultados de clasificación correcta de 84.19% (Fig. 6.37). Con este incremento de la predicción y manteniendo prácticamente constantes parámetros estadísticos como λ -Wilks (0.493) y una correlación canónica de 0.71, se hace más fiable la expresión que resulta de esta nueva combinación de variables. Esto se debe a la baja varianza explicada por la variable *tcar* en la muestra, como ya se había observado en los resultados del análisis factorial (ver ap. 6.2.3.2.), pudiendo afectar negativamente en las restantes variables de la función. Para conseguir una mayor fiabilidad en la predicción de las áreas inestables, el valor que discrimina las poblaciones estables e inestables de la función establecida puede ser modificado, de tal forma que si $F > -0.1$ la clasificación correcta de laderas inestables alcanza un 91.6%, en detrimento de las áreas estables que decrecen hasta un 78.9%. Sin embargo la selección del valor F_{disc} es correcta cuando lo que interesa es acotar adecuadamente el comportamiento de la población inestable.

----- DISCRIMINANT ANALYSIS -----

VARIABLE	TOLERANCE	F TO REMOVE
TANIG	0.7348895	93.761
LCON	0.5671478	10.355
LGRFS	0.6786465	8.5840
TANCG	0.8080387	3.7815
ALCA	0.8808350	14.958
TCAR	0.9215087	1.1865
TUSR	0.8675728	16.680
TREL	0.9711692	5.2801

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS

EIGENVALUE	PERCT OF VARIANCE	CUMULA PERCENT	CANONICAL CORRELATION :		AFTER WILKS' LAMBDA	CHISQ.	D.F.	SIGNIF	
			FCN	:					
1.04129	100.00	100.00	0.7142219	:	0	0.4898	132.01	8	0.0000

STANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

TANIG	0.95236
LCON	0.43137
LGRFS	0.36070
TANCG	-0.22222
ALCA	0.41112
TCAR	0.11738
TUSR	-0.43555
TREL	-0.23856

UNSTANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

TANIG	0.1413645
LCON	0.7079891
LGRFS	2.144080
TANCG	-0.2393619E-01
ALCA	0.1821522E-02
TCAR	0.5854518E-01
TUSR	-0.1077328
TREL	-0.2856215
(CONSTANT)	-7.421836

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS EVALUATED AT GROUP MEANS (GROUP CENTROIDS)

GROUP	FUNC
0	-1.02041
1	1.00978

Figura 6.33. Resultados del análisis discriminante -función (9) (10)- para laderas estables e inestables mediante la utilización de variables que las caracterizan.

HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS Y CLASIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN DISCRIMINANTE (9)

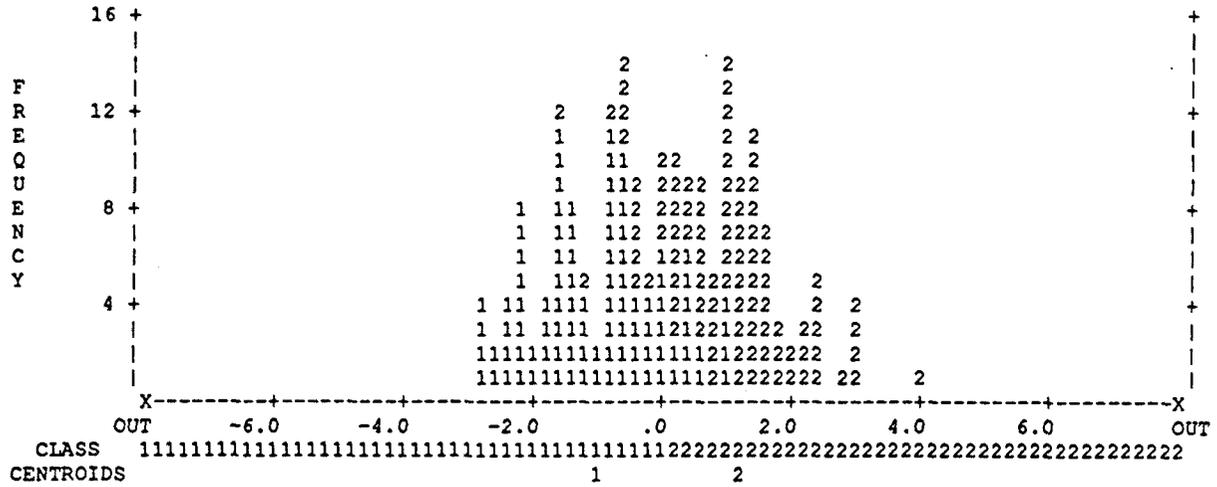


Figura 6.35. Histograma de frecuencias y clasificación (con índice discriminante F=0) de la función discriminante (9).

----- DISCRIMINANT ANALYSIS -----

VARIABLE	TOLERANCE	F TO REMOVE
TANIG	0.7363963	93.710
LCON	0.5711329	11.221
LGRFS	0.6818373	9.2150
TANCG	0.8276773	4.6520
ALCA	0.8918653	16.456
TUSR	0.8677532	17.043
TREL	0.9741353	5.0739

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS

EIGENVALUE	PERCT OF VARIANCE	CUMULA PERCENT	CANONICAL CORRELATION	: AFTER WILKS' FCN	LAMBDA	CHISQ.	D.F.	SIGNIF
1.02806	100.00	100.00	0.7119825	:	0	0.4930	131.16	7 0.0000

STANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

TANIG	0.95248
LCON	0.44671
LGRFS	0.37243
TANCG	-0.24308
ALCA	0.42719
TUSR	-0.44010
TREL	-0.23374

UNSTANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

TANIG	0.1413824
LCON	0.7331723
LGRFS	2.213801
TANCG	-0.2618286E-01
ALCA	0.1892736E-02
TUSR	-0.1088575
TREL	-0.2798495
(CONSTANT)	-7.345912

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS EVALUATED AT GROUP MEANS (GROUP CENTROIDS)

GROUP	FUNC
0	-1.01391
1	1.00335

Figura 6.36. Resultados del análisis discriminante para laderas estables e inestables tras la exclusión de la variable TCAR.

6.3 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.

La aplicación de técnicas estadísticas multivariantes desarrolladas en este capítulo ha contribuido a esclarecer las condiciones que favorecen el comportamiento inestable de una ladera. Mediante el análisis de variables obtenidas a partir de parámetros geológico-geomorfológicos fácilmente medibles sobre el terreno, no sólo se ha podido determinar su relación con la estabilidad, sino lo que es más importante, evaluar de forma cuantificada la susceptibilidad frente al deslizamiento de una área determinada.

Los aspectos fundamentales que se destacan del conjunto de análisis realizados, son los siguientes:

- Asociación de valores altos de las variables **tanig**, **lcon**, **alca**, **lgrfs** y **tcar** con comportamientos inestables del terreno; asociación de valores altos de **Insoq/tusr**, **tre1** y **tancg** con comportamientos estables.
- Destacada contribución del ángulo de la pendiente natural de la ladera (**tanig**), área cuenca (**lcon**) y cobertera vegetal (**Insoq/tusr**) en la evaluación de las condiciones de estabilidad. Con menor peso se muestran las variables referentes a la morfología de la ladera (**tre1**), grosor de la formación superficial (**lgrfs**) y ángulo a la cresta, desde la cabecera en la zona de rotura (**tancg**).
- Significación estadística elevada de la variable **alca** (altitud), que se interpreta como derivada de su relación directa con la pluviometría.
- Escasa influencia de la variable **tcar** (tipo de cima) y nula de las variables **tsub** (tipo de sustrato) y **orie** (orientación).
- Interacción de las variables **tanig** y **tancg** que reflejan el efecto desestabilizador que tiene la morfología longitudinal de la ladera cuando el ángulo interno que forman ambas pendientes es bajo.
- Influencia semejante de la variable cuantitativa (**Insoq**) y cualitativa (**tusr**) de la cobertera vegetal, favoreciendo la utilidad indistinta de cualquiera de ellas en la definición de la función discriminante.
- Clara influencia de algunos parámetros del terreno (**tanig**, **lcon**, **tancg**) en la tipología de la rotura y progresión del movimiento, cuando tienen lugar procesos de inestabilidad superficial.

El contraste entre la clasificación de campo y la clasificación obtenida de la aplicación de las funciones discriminantes, ha permitido comprobar la fiabilidad que tienen éstas para evaluar las condiciones del terreno. Los buenos resultados con las clasificaciones demuestran:

- La utilidad de estas funciones en la predicción de áreas potencialmente inestables, confirmando así la correcta aplicación de los métodos estadísticos en el análisis de estabilidad a escala regional.

Los mismos resultados confirman la opinión de la que ha partido el análisis:

- La inestabilidad y generación de movimientos superficiales no responde a los efectos provocados por un determinado factor sino a la combinación favorable de un conjunto de atributos.

No obstante, las estimaciones estadísticas para conocer las condiciones de estabilidad tienen una serie de limitaciones que deben ser consideradas y valoradas en su justa medida:

- La contribución relativa de las variables consideradas puede variar según el área de estudio e incluso ser diferentes variables las que mejor caractericen el comportamiento inestable de esa área, exponiendo el análisis este hecho mediante funciones que se definen por diferentes combinaciones de variables. Todo esto refleja claramente las distintas relaciones existentes en cada zona, entre los movimientos de masa superficiales y el conjunto de factores geológico-geomorfológicos.
- La función discriminante que mejor explica las condiciones de estabilidad de un área concreta no es aplicable a ninguna otra zona. Sí es extrapolable la técnica y metodología utilizada para la obtención de la función, pero aún considerando que la zona está correctamente caracterizada por los mismos factores (variables), la influencia de éstos probablemente no se exprese de la misma forma.
- La aplicación de la función de predicción implica necesariamente conocer las condiciones geológico-geomorfológicas de la zona, además de la identificación de los deslizamientos y confección, según la técnica utilizada, de mapas temáticos de los distintos parámetros considerados. Esto significa que no existe una desconexión entre las técnicas de reconocimiento tradicionales y las técnicas estadísticas para evaluar la estabilidad.

Finalmente se puede concluir que:

- La aplicación de técnicas estadísticas de análisis multivariante permite cuantificar las condiciones de estabilidad con el fin de producir mapas de peligrosidad que, basados en criterios no condicionados por la persona que los realiza, sean más fiables y más objetivos que los confeccionados hasta el momento mediante métodos no tan estandarizados.

En el capítulo 8 se expone un ejemplo de los resultados obtenidos de los análisis discriminantes aplicados a un área piloto. Mediante la aplicación se ha podido comprobar el ajuste de las variables que definen la función, así como la eficacia de la misma en la predicción del comportamiento inestable del terreno. El análisis de estabilidad regional de esta zona ha servido de base para poder exponer todo el procedimiento general seguido para la creación de los mapas de susceptibilidad, permitiendo obtener además una visión global de la metodología utilizada en la evaluación de la peligrosidad frente deslizamientos.

CAPÍTULO 7

MOVILIDAD Y DISTANCIA RECORRIDA POR EL DESLIZAMIENTO

Una vez se ha iniciado la rotura, la masa inestabilizada se moviliza pudiendo llegar a recorrer grandes distancias desde el área fuente donde se ha originado el deslizamiento. La rapidez con la que se mueven ladera abajo estos grandes volúmenes de suelo o roca, exceptuando los movimientos superficiales ligados a cambios estacionales como el creep o reptación que se propagan a velocidades muy bajas (mm a cm al año), pueden considerarse en muchas ocasiones fenómenos catastróficos de gran impacto socioeconómico. La constante expansión del hombre hacia áreas de alta montaña ha multiplicado las situaciones de riesgo provocando alarma sobre la necesidad de investigar a fondo sobre métodos que además de evaluar la peligrosidad de deslizamientos puedan, de forma particularmente importante, predecir o estimar el alcance que puede llegar a tener la masa una vez movilizada.

La evaluación de la movilidad de los deslizamientos es todavía difícil, pues los conocimientos que se tienen de los mecanismos físicos que rigen el movimiento de la masa están aún poco desarrollados y por supuesto se desconoce la influencia que alguno de los factores de control externo a la masa ejercen sobre la distancia que puede alcanzar el deslizamiento.

Para definir adecuadamente el riesgo al que está sometida una determinada área es necesario conocer por lo tanto, la distancia máxima que puede recorrer el deslizamiento, y para de esta manera poder acotar la zona que puede ser afectada por el mismo así como tomar las medidas correctoras oportunas que mitiguen dicho riesgo. Los métodos que hasta el momento han sido mayoritariamente utilizados para definir cartográficamente el alcance de los movimientos de masa son de tipo empírico, a partir de la situación de bloques caídos en desprendimientos precedentes (*Corominas 1989, 1991*), que pueden a su vez ser tratados estadísticamente (*Berchten et al., 1988; Marie, 1988*). Modelos de simulación de caídas de bloques han sido también desarrollados para predecir el alcance y su posible afección a

posibles construcciones (Gili & Gutierrez, 1992).

Siguiendo la misma línea de trabajo que en los análisis precedentes, en este capítulo se han utilizado técnicas estadísticas para el estudio de la movilidad y la determinación de la distancia recorrida por la masa movilizada. La aplicación de esta herramienta matemática y concretamente de los métodos de regresión simple y múltiple, han permitido evaluar la influencia de algunos de los factores de control del movimiento.

En este estudio se han considerado factores externos al movimiento tales como los relacionados con la topografía o el tipo de vegetación, los cuales pueden afectar de forma decisiva la progresión de la masa movilizada cuando ésta es de pequeño volumen. La dificultad en la obtención de parámetros tales como el ángulo de rozamiento residual o la cohesión entre otros que pueden ayudar a caracterizar físicamente cada uno de los movimientos inventariados, ha impedido la incorporación de este tipo de factores al análisis.

La investigación que se ha llevado a cabo en este capítulo ha tenido como principales objetivos:

- Conocer mejor la influencia de alguno de los factores que controlan la movilidad de la masa inestable.
- Analizar de forma individualizada y conjunta los tipos de movimientos con diferentes mecanismos de propagación de la masa (flujos, deslizamientos y desprendimientos) con el objeto de poder determinar a su vez la posible existencia de una relación entre la movilidad y el mecanismo del movimiento.
- Definir una función que permita la estimación de la distancia máxima recorrida por el deslizamiento.

El capítulo se ha desarrollado en dos apartados que analizan primero la movilidad de los movimientos de masa considerados y segundo el alcance o distancia máxima que pueden recorrer.

7.1. TIPOS DE MOVIMIENTOS CONSIDERADOS.

Como en los anteriores capítulos, aquí se ha utilizado el término "deslizamiento" de forma general para describir una amplia gama de procesos de movimientos de masa, sin implicar

ningún mecanismo determinado. Los deslizamientos considerados se han agrupado en cuatro clases de acuerdo con la clasificación realizada en el capítulo 5 y basada fundamentalmente en la de *Varnes (1978)*. Las agrupaciones realizadas que han sido objeto de estudio se han definido siguiendo criterios de progresión de la masa movilizada, independientemente de los mecanismos de rotura. De este modo las principales clases de deslizamientos analizados son: 1/ caída de bloques, 2/ deslizamientos traslacionales, 3/ coladas y 4/ corrientes de derrubios.

El término de "colada" que identifica una morfología de lóbulo concreto y compuesto por un material cohesivo, fundamentalmente formado por limo o arcilla, equivale a los definidos por *Varnes (1978)* como mudflow y earthflow. El término de corriente que aquí se ha utilizado comprende los definidos por *Varnes* con debris flow, debris slide y debris avalanche.

Las características que definen este tipo de movimientos en la zona de estudio ya han sido comentadas en el apartado 3.2.1.

7.2. ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD.

En este apartado se ha tratado de esclarecer los factores que controlan la progresión de la masa una vez se ha iniciado el movimiento. Se han analizado de forma individualizada alguno de los posibles factores que pueden afectar la movilidad del deslizamiento y consecuentemente la distancia recorrida por el mismo. Entre los factores externos analizados parece obvio que las características topográficas del recorrido por donde discurre la masa movilizada influyen en el alcance final de la misma, así como el tipo de vegetación cuando se trata de deslizamientos de pequeños volúmenes. Como ya ha sido reseñado anteriormente, de entre los factores intrínsecos, las propiedades del material movilizado tales como la textura o el contenido en finos que pueden influenciar la movilidad de la masa, no han sido considerados. De hecho las características de las litologías estudiadas (Keuper, Cretácico superior, facies Garumniense) son, por ser fundamentalmente todas ellas limo-arcillosas, relativamente homogéneas, exceptuando los niveles rocosos. Analizando los resultados obtenidos de las muestras ensayadas en laboratorio (ver apartado 3.3), se ha observado que no existe una diferencia significativa entre los valores del ángulo de fricción residual de las distintas formaciones. Este parámetro que inicialmente se tomó con la intención de analizar la influencia que podía tener la litología en la movilidad de la masa, permite que las propiedades del material, dados los resultados de los ensayos, sean estimadas constantes durante el estudio que aquí se va a llevar a cabo.

Uno de los principales propósitos de esta investigación es determinar si existe una

movilidad relativa que diferencia los tipos de movimientos analizados y que se corresponden con los distintos mecanismos de progresión de la masa.

7.2.1. Descripción de las variables que definen los factores de control de la movilidad utilizadas en el análisis.

Los estudios realizados hasta el momento, evidencian que todavía no se conocen en profundidad los mecanismos que rigen el comportamiento de los movimientos de masa y en consecuencia los factores que determinan la movilidad y la distancia que pueden llegar a alcanzar. Sin embargo existen algunos puntos sobre los cuales la mayoría de autores (*Heim, 1932; Scheidegger, 1973; Nicoletti & Sorriso Valvo, 1991; Cannon, 1993,..*) están de acuerdo:

- Influencia del volumen en la distancia recorrida por la masa movilizada.
- Influencia de las características topográficas por las que discurre la masa.
- Influencia de los mecanismos del movimiento de masa en la movilidad de la misma.

Aunque la idea de una relación entre estos factores intrínsecos y externos al deslizamiento y la movilidad de la masa parecen estar claros, las explicaciones físicas de estos aspectos así como su contribución, no son bien conocidas.

Las variables que describen algunos de estos factores y que se han utilizado en el análisis con el objetivo de esclarecer algunos de estos puntos, comprobando su validez al aplicarlo sobre el conjunto de muestras inventariadas son las siguientes:

TANA (Fig. 4.2): Esta variable definida a partir de la línea que une las partes extremas del movimiento, desde la parte alta de la cicatriz al pie del depósito, expresa la movilidad de la masa deslizada. Este parámetro, propuesto por *Heim (1932)*, aún descuidando otros factores secundarios, es uno de los índices de transporte más simple. La hipótesis principal se basa en que toda la energía perdida durante el movimiento es debida al rozamiento (*Sassa, 1988*). De este modo, el ángulo α , es equivalente a un coeficiente de fricción (*Shreve, 1968; Scheidegger, 1973*) y corresponde al gradiente de la línea de energía.

Dado que la naturaleza del rozamiento durante la movilización no está muy clara, en el estudio que aquí se presenta, el ángulo α se ha utilizado como una medida de la movilidad relativa de los deslizamientos.

VOL: variable que define el volumen de la masa movilizada, calculada en la zona de origen o cicatriz del movimiento.

La relación, ya conocida, entre el volumen y la tangente del ángulo α de los deslizamientos (*Scheidegger, 1973; Hsü, 1975; Davies, 1982; Li, 1983*) para grandes volúmenes ($>10^5\text{m}^3$), donde es más evidente, refleja la importancia que tiene la masa desprendida en la estimación del alcance. Dichos autores describen una relación inversa entre los parámetros mencionados, de forma que el ángulo del recorrido, definido por la tangente de α , disminuye progresivamente al aumentar el volumen. Por debajo del volumen crítico, antes mencionado, los autores observaron que el coeficiente de rozamiento era constante y se aproximaba a la tangente del ángulo de reposo de los depósitos de canchal (0.57 a 0.83). El valor de la tangente de α era de aproximadamente de 0.60, según las observaciones realizadas por *Hsü (1975)*, estableciendo un límite de $0.5 \times 10^6\text{m}^3$ para el límite inferior del volumen.

Cuando se analizan movimientos de pequeños volúmenes ($<10^5\text{m}^3$) parece ser que existen otros factores, tales como la litología o el tipo de movimiento, que tienen mayor o igual influencia en la movilidad que las variaciones de volumen en sí mismas (*Hutchinson, 1988; Corominas et al., 1988*).

Como se desprende de los estudios realizados hasta el momento, el volumen se constata como uno de los factores condicionantes de la movilidad de los deslizamientos. Así, se ha reflejado en algunos de los modelos matemáticos desarrollados por *Cannon & Savage (1988)* y *Cannon (1993)* para la estimación del alcance de corrientes de derrubios. Existe un cierto escepticismo entre la relación volumen-tangente del ángulo del recorrido, aludiendo que la movilidad es más dependiente de otros factores como por ejemplo la altura de caída (*Skermer, 1985*).

Aunque la mayoría de modelos propuestos para la evaluación de la movilidad y alcance están basados en la relación directa entre los factores del volumen y el ángulo α de deslizamiento, desafortunadamente la estimación del primero es muy difícil, a menos que la rotura se haya iniciado y pueda determinarse a partir de la definición de la cicatriz del deslizamiento. Por este motivo, dichas aproximaciones son difícilmente aplicables, siendo únicamente utilizadas hasta el momento para comprobar la bondad de los resultados sobre algunos de los movimientos ya ocurridos (*Eisbacher, 1979; Nicoletti, 1991*).

DISH (Fig. 4.2): esta variable define la distancia horizontal recorrida por el deslizamiento.

Esta variable, que describe el alcance horizontal de la masa, es especialmente interesante a la hora de poder delimitar cartográficamente las áreas que pueden ser afectadas por deslizamientos. *Nicoletti (1989)* y *(1991)* definió tres intervalos diferentes en el posible recorrido de la masa deslizada donde la amenaza de deslizamiento es progresivamente menor. Los denominó "zona de destrucción (Dz)", "zona de riesgo (Rz)" y "zona de seguridad (Sz)". Obtenida la distancia horizontal (L) mediante ecuaciones de regresión en la que se

correlaciona con el volumen, la probabilidad de que un deslizamiento se parara en la zona Dz (L- Δ L) era $p+(100\%-p)/2$, en Rz (L) era p y en Sz (L+ Δ L) era $(100\%-p)/2$. La probabilidad p se estima entre 68% y 71% según los diferentes modelos aplicados y Δ L mediante los resultados de la desviación estandard obtenidos de la ecuación.

TUSV: esta variable que caracteriza el tipo de suelo y cobertera existente en la zona de progresión de la masa movilizada, ha sido utilizada de forma cualitativa para determinar si la vegetación es un factor que condiciona la movilidad de la masa, y si es así de qué modo influye.

Corominas et al. (1990) demostraron que la movilidad de pequeños deslizamientos estaba afectada por el tipo de material y obstáculos debidos a la vegetación, en la zona justamente inferior a la de rotura por donde discurre la masa movilizada. Para grandes deslizamientos la presencia de bosque durante el trayecto de la masa no parece tener gran influencia en su movilidad. Sin embargo, los efectos sobre la movilidad se acentúan con la rugosidad y características topográficas del terreno que pueden a su vez dar un confinamiento o no a la masa deslizada (*Lucchita, 1978; Niccoletti & Sorriso-Valvo, 1991; Corominas, 1994 in press*).

Los atributos del recorrido que han sido considerados en este estudio, donde los volúmenes de los deslizamientos analizados son mayoritariamente inferior a 10^5m^3 , son los siguientes: Prado/sustrato, depósitos de canchal, bosque bajo (matorral), bosque claro, bosque denso.

En el estudio se ha tratado de analizar la influencia de este tipo de atributos sobre la movilidad y consecuentemente sobre la distancia final que puede alcanzar la masa deslizada.

DELT (Fig. 4.2): variable que define el ángulo de la pendiente δ del depósito. Debido a la poca o nula erosión provocada durante el deslizamiento de la masa de los movimientos estudiados, la variable *delt* se ha considerado una estimación del ángulo de la pendiente del terreno por donde se ha desplazado la masa.

Algunos de los factores topográficos tales como el gradiente de la superficie sobre la cual corre la masa movilizada, o el confinamiento de ésta por unas condiciones morfológicas concretas del terreno, han sido evaluadas cualitativamente por algunos autores (*Cannon, 1986; Nicoletti & Sorriso Valvo, 1991*) que han observado su influencia en la movilidad del material afectado.

RDEP: la variable que ha sido definida a partir de la morfología del depósito (relación entre

el ancho del pie del depósito y la longitud del mismo W/L_d (ver apartado 4.4.1), es otro índice que quiere reflejar la movilidad relativa del material deslizado.

Los buenos resultados de clasificación de los movimientos obtenidos en el Capítulo 5, donde esta variable geométrica se introducía como concepto de movilidad del deslizamiento, permite que aquí se evalúe tanto cualitativa como cuantitativamente su influencia en el alcance de la masa.

Es evidente que esta no es una variable fácilmente predecible a priori, pero si se puede analizar la geometría de depósitos de antiguos movimientos producidos en la zona que esté siendo motivo de estudio, entonces se puede llegar a estimar un valor de lr_{dep} para futuros deslizamientos, asumiendo el principio por el cual éstos van a ser del mismo tipo que sus antecesores, si no han habido cambios en los factores geológico-geomorfológicos que los condicionan.

TDES: el tipo de movimiento, considerando únicamente como criterio de agrupación el modo de progresión de la masa deslizada, sin tener en cuenta el mecanismo de rotura, es una de las variables que como ya se ha comentado anteriormente, puede tener gran influencia en el alcance cuando se trata de pequeños volúmenes movilizados.

Dada la buena correspondencia entre la clasificación de los movimientos de campo y los establecidos automáticamente mediante análisis discriminante en el Capítulo 5, se ha analizado aquí la influencia que tienen éstos, según las agrupaciones originales.

Los movimientos considerados corresponden todos a un único evento. Este hecho es especialmente destacado, pues cuando se tratan movimientos que muestran varias fases de aporte de material, las distancias recorridas por la masa movilizada no se corresponden con el volumen total medido, dando un valor del ángulo α mayor al estimado (Götz & Zimmermann, 1993) y por consiguiente subestimando su movilidad. La razón por la que se pueden dar resultados erróneos al estimar el alcance, es el hecho de no poder diferenciar los volúmenes de cada una de las fases, por lo que es conveniente asegurar que el movimiento estudiado corresponde a un solo evento.

7.2.2. Análisis de los datos.

Los datos utilizados para el análisis de la movilidad corresponden a los 106 movimientos inventariados en la zona del Berguedà-Solsonès y comprenden 34 deslizamientos traslacionales, 11 coladas, 51 corrientes de derrubios y 10 caídas de bloques. Los diferentes factores que han sido tratados para éste análisis están representados en los distintos

movimientos, los cuales representan una muestra relativamente amplia de las condiciones en que se pueden encontrar. Estos han tenido lugar en diferentes tipos de cobertera vegetal, tipos de litologías, condiciones topográficas y amplio rango de volúmenes (aunque siempre inferior al 10^5 m^3 que algunos autores toman como volumen crítico) dentro de lo que se consideran deslizamientos de pequeño tamaño.

Con objeto de maximizar la homogeneidad de los factores que son analizados y evitar la infiltración de otros atributos, particularmente del terreno que no pueden ser controlados, se ha determinado utilizar únicamente los movimientos que han sido inventariados en la zona del Berguedà-Solsonès, excluyendo del análisis los movimientos inventariados en la zona de Andorra. Esta determinación conlleva una reducción importante de la población muestral que es objeto de estudio, creando ciertas limitaciones a la hora de generar subpoblaciones.

Todas las variables han sido normalizadas previamente a su utilización, siendo comprobada la bondad del ajuste mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (Tabla 7.1). En la tabla 7.2 se resumen los estadísticos básicos de media y desviación de las variables transformadas. Las figuras de la 7.1 a la 7.3 muestran la distribución de frecuencias de los valores de las variables. Es especialmente destacable la importancia que tiene en el estudio de la movilidad, el rango de volúmenes considerado. El sesgo de volúmenes, con ordenes de magnitud inferiores a 10^5 m^3 , que conlleva el estudio de pequeños deslizamientos tiene importantes implicaciones en los resultados del análisis como se verá posteriormente.

Variable	K-SZ	2-TP	Transformación
LVOL	0.696	0.718	Log_{10}
LDISH	0.367	0.999	Log_{10}
TANA	0.624	0.831	Ninguna
LRDEP	0.481	0.975	Log_{10}
DELT	0.547	0.926	Ninguna
TUSV	-	-	-

Tabla 7.1. Resultados del test de normalidad K-S de las variables con su significación (2-TP).

Variabes	LVOL	LDISH	TANA	LRDEP	DELT	TUSV
$\bar{x} \pm s$	2.45 ± 0.83	1.71 ± 0.46	0.55 ± 0.14	-0.48 ± 0.58	24.58 ± 6.97	4.41 ± 2.91

Tabla 7.2. Valores medios (\bar{x}) y de desviación (s) de las variables analizadas.

TUSV, formando parte del último factor, se muestra totalmente independiente. Analizando la matriz factorial original, se destacan algunas relaciones que pueden ser útiles en análisis subsiguientes. TANA y LRDEP muestran, con un peso semejante, un mismo comportamiento en el primer factor, el cual representa cerca del 50% de la varianza total de la muestra. El hecho de que se relacionen de igual forma con las restantes variables del eje y que ambos se interpreten como un índice de movilidad, permite que puedan ser utilizadas indiferentemente como variables explicativas del alcance, como se verá posteriormente.

- - - - - F A C T O R A N A L Y S I S - - - - -

FACTOR MATRIX:

	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3	FACTOR 4
LVOL	-.84185	.26899	.16395	.41684
LDISH	-.89151	.39898	-.01674	.10231
TANA	.70041	.62562	-.11452	.17563
LRDEP	.64223	-.51575	.29254	.47662
TUSV	.15779	.41015	.87766	-.19093
DELT	.53743	.76375	-.22896	.08028

FINAL STATISTICS:

VARIABLE	COMMUNALITY	*	FACTOR	EIGENVALUE	PCT OF VAR	CUM PCT
		*				
LVOL	.98170	*	1	2.72026	45.3	45.3
LDISH	.96472	*	2	1.64048	27.3	72.7
TANA	.92593	*	3	.94856	15.8	88.5
LRDEP	.99121	*	4	.48513	8.1	96.6
TUSV	.99986	*				
DELT	.93101	*				

ROTATED FACTOR MATRIX:

	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3	FACTOR 4
LVOL		.96211		
LDISH		.83145	-.50374	
TANA	.92661			
LRDEP			.94406	
TUSV				.99066
DELT	.95219			

Figura 7.4. Resultados del análisis factorial con la extracción de los 4 primeros factores, en los que se muestran los pesos de cada variable.

El significado de la correlación tan estrecha entre estos pares de variables, así como otras relaciones se analizarán en profundidad a continuación.

Tras la determinación de las correlaciones más significativas, a continuación se va a proceder al análisis pormenorizado de las distintas variables. Para evaluar la influencia en la movilidad de los factores considerados en el estudio y su importancia como variables de predicción del alcance, la etapa de análisis de los datos se ha desarrollado en dos fases según el orden siguiente:

1. Análisis preliminar de los datos, mediante la representación de gráficas bivariantes.

La representación gráfica entre pares de variables puede aportar información valiosa, aún sin la existencia de correlaciones, gracias a la visualización de la distribución de los datos que están controlados en algunos casos por una tercera variable.

2. Análisis de regresión múltiple de los datos, con el objeto de definir una función de predicción del alcance.

La técnica de regresión múltiple se ha aplicado al conocer, tras los análisis previos, que el alcance no puede ser explicado mediante un modelo de regresión simple. Como podía preverse, son diversos los factores que condicionan la trayectoria de la masa movilizada.

7.2.2.1. RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES. REPRESENTACIONES BIVARIANTES.

Para evaluar correctamente la influencia que tiene sobre la movilidad cada uno de los factores considerados, se ha realizado una primera fase en la que se analiza la relación entre la variable que define el ángulo del recorrido de la masa (tana) y otras variables explicativas.

Las variables TUSV y TDES, de tipo cualitativo, que representan el tipo de cobertera vegetal en zona de progresión de la masa y el tipo de movimiento respectivamente, han sido utilizadas como factor de control de los datos, permitiendo a su vez ver la influencia de esta tercera variable mediante representación gráfica.

La primera relación analizada corresponde a las variables Tana y el volumen de la masa desprendida (Lvol), cuyos valores han sido transformados logarítmicamente. La gráfica Tana-Lvol (Fig. 7.5) integra la información de los diferentes tipo de movimientos, diferenciando

deslizamientos traslacionales, coladas, corrientes de derrubios y bloques (este último lo forman todas las inventariadas en Berga y Andorra, dada la escasa muestra representada por la primera zona).

El ángulo Tana comprende un rango de valores que decrece de 1.1 (47,7°) a 0.23 (13°). Analizando de forma individualizada las agrupaciones de movimientos, se observa que los desprendimientos muestran los mayores valores de Tana. Los valores están comprendidos entre 0.49 (26.1°) y 1.1 (47.7°), estando el 75% de ellas por encima de 0.7 (35°). Las corrientes de derrubios muestran unos valores extremos de 0.26 (14.6°) - 0.76 (37.2°) similares a las de los deslizamientos traslacionales de 0.28 (15.6°) - 0.76 (37.2°). Las coladas con un rango de 0.23 (13.0°) - 0.6 (31°) son los movimientos con valores de Tana más bajos.

Los movimientos individualizados parecen mostrar una tendencia que refleja la relación inversa entre el ángulo del recorrido (α) y el volumen de la masa deslizada. Los grandes movimientos tienden a desarrollar ángulos de α menores a los obtenidos por los más pequeños. Considerando la interpretación que se había hecho de Tana, la gráfica indica una mayor movilidad (menor valor de Tana) para los movimientos de mayor volumen.

Analizando conjuntamente la gráfica, se observa que la distribución de las muestras parece estar controlada por el tipo de movimiento, de tal forma que, aún habiendo gran dispersión, para un mismo volumen la caída de bloques muestra de forma generalizada valores de tana mayores a los de las corrientes de derrubios y éstos a los de tipo traslacional. Entre estos últimos y la caída de bloques, existe una separación nítida (Fig. 7.6).

Según estas observaciones existe una movilidad relativa diferente según el tipo de movimiento. Los deslizamientos traslacionales son pues más móviles que las corrientes de derrubios y éstos a su vez más móviles que las caídas de bloques. Esto podría ser explicado (*Corominas, 1992*), considerando que las caídas de bloques disipa mayor energía al impactar contra el terreno y fragmentarse en bloques más pequeños, colisionando entre ellos dentro de la masa, mientras que los movimientos superficiales de tipo traslacional disipan energía por rozamiento de la superficie de deslizamiento en contacto con el terreno, sin haber pérdida por deformación interna del material. Las corrientes de derrubios que se encuentran en una situación intermedia, pueden disipar energía tanto por rozamiento de la base como por deformación interna de la masa.

Todas las coladas, con valores de tana inferior a 0.6 parecen indicar una mayor movilidad, sin embargo el número tan bajo de muestras (11) que forman esta agrupación no permite asegurar dicha observación, siendo necesario un mayor número de datos para que pudiera ser confirmada.

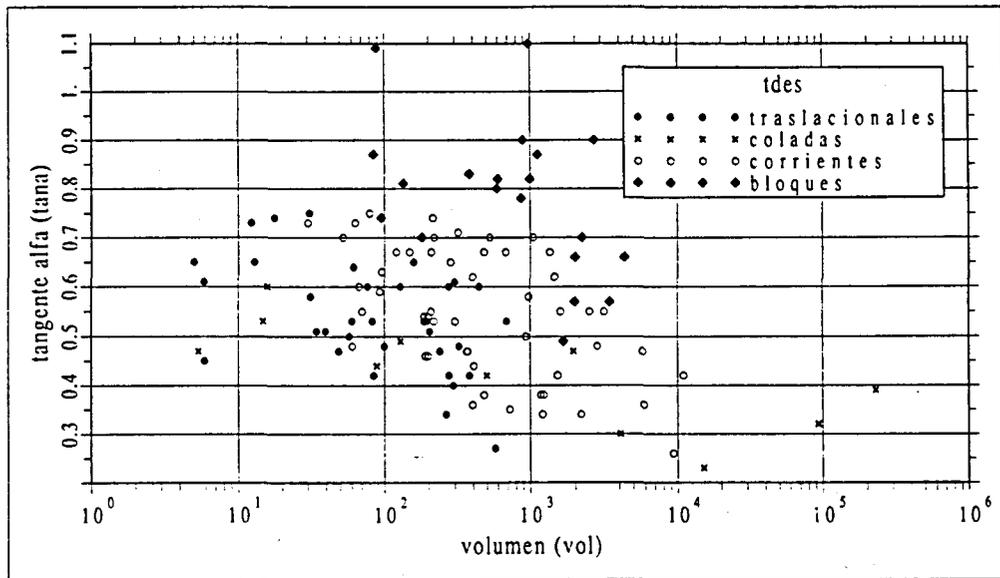


Figura 7.5. Relación entre el ángulo α del recorrido (tana) y el volumen movilizado (lvol) del deslizamiento. En la figura se diferencian los movimientos según el tipo de mecanismo de progresión de la masa (traslacionales, coladas, corrientes y caída de bloques).

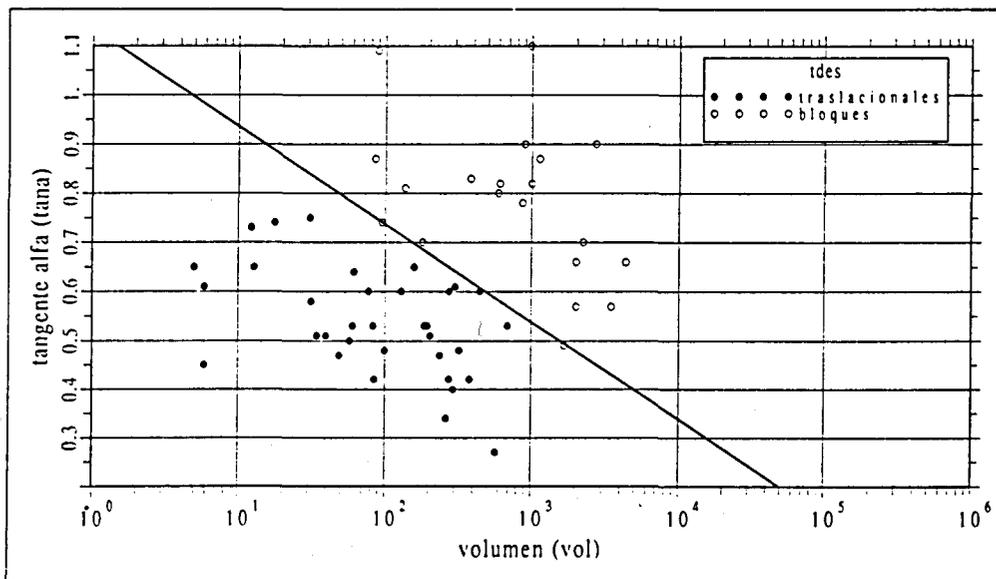


Figura 7.6. Relación entre el ángulo α del recorrido y el volumen (lvol) para los movimientos traslacionales y caída de bloques, representado la línea de separación entre ambos.

La separación entre los mecanismos de progresión del movimiento representados en la gráfica (Fig. 7.5) refleja las observaciones realizadas en el campo, donde se han definido las distintas tipologías. Las agrupaciones muestran, tal como se ha comentado en el capítulo 5 de clasificación de los movimientos, una gradación continua entre uno y otro tipo de movimiento, pudiendo una rotura planar evolucionar mediante un mecanismo de progresión tipo traslacional hasta una corriente de derrubios por fragmentación y deformación de la masa en los últimos estadios evolutivos. No es de extrañar pues, que exista una cierta dispersión de la muestra que integra cada agrupación. Sin embargo la dispersión del conjunto de la población, que impide determinar la ley que rige la relación entre Tana-Lvol, indica que no puede definirse la movilidad de pequeños deslizamientos mediante una relación sencilla. La ausencia de correlación entre ambas puede ser debido a los efectos de otras variables que deberían ser consideradas, tales como las características topográficas del recorrido o los obstáculos del mismo que impiden el avance de la masa movilizada.

Los efectos de retención del material deslizado que provocan los obstáculos locales debidos al tipo de recubrimiento de la ladera, pueden observarse claramente en la figura 7.7. Aquí se puede apreciar la influencia que la vegetación ejerce sobre la movilidad de movimientos de pequeño volumen. Concretamente la figura muestra sus efectos sobre la propagación de la masa en desprendimientos (se incluyen todos los inventariados). La distribución de la muestra es controlada por el tipo de cobertera, diferenciando aquellos que se han movilizado por prado o sustrato, sobre depósitos de canchal o por cobertera forestal clara o densa. La masa, considerando un mismo volumen, se propaga más fácilmente en zona de prado o sustrato que sobre depósitos de canchal, y éstos a su vez más que sobre zonas boscosas. Lo que se observa es que para alcanzar un mismo ángulo de α , la masa que se desplaza por laderas forestales tienen que ser de mayor volumen que las de zonas de prado.

Aunque no de forma tan clara la figura 7.8 muestra, para las corrientes de derrubios, la misma tendencia de tana-lvol con relación al tipo de uso de la ladera, decreciendo la movilidad con los obstáculos con los que se encuentra durante el desplazamiento.

La línea de trazos gruesos representadas en ambas figuras (Fig. 7.7 y 7.8), indica un límite inferior bajo el cual no se encuentran los movimientos considerados. Así, se puede determinar con relativa precisión que, por ejemplo en desprendimientos, volúmenes inferiores a 100m^3 no muestran valores de la variable tana inferiores a 0.7 ó a 0.45 si son corrientes de derrubios.

Hasta ahora y mediante la relación del ángulo α y el volumen se ha podido constatar que la movilidad está condicionada, además del volumen de la masa, por el tipo de mecanismo del movimiento y obstáculos presentes en el recorrido.

A continuación se analiza la influencia que puede tener la pendiente natural del terreno

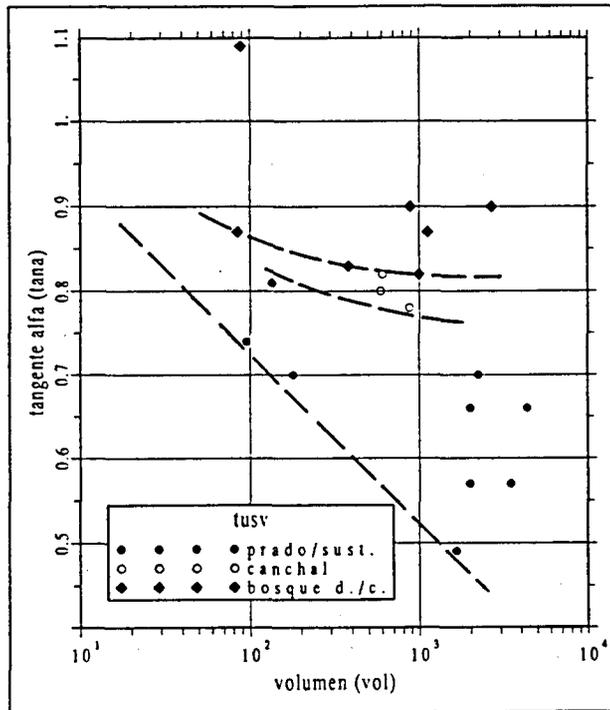


Figura 7.7. Representación gráfica del ángulo α del recorrido expresado por tana y el volumen de diversas caídas de bloques, diferenciando el tipo de recubrimiento de ladera por el que se desplazan.

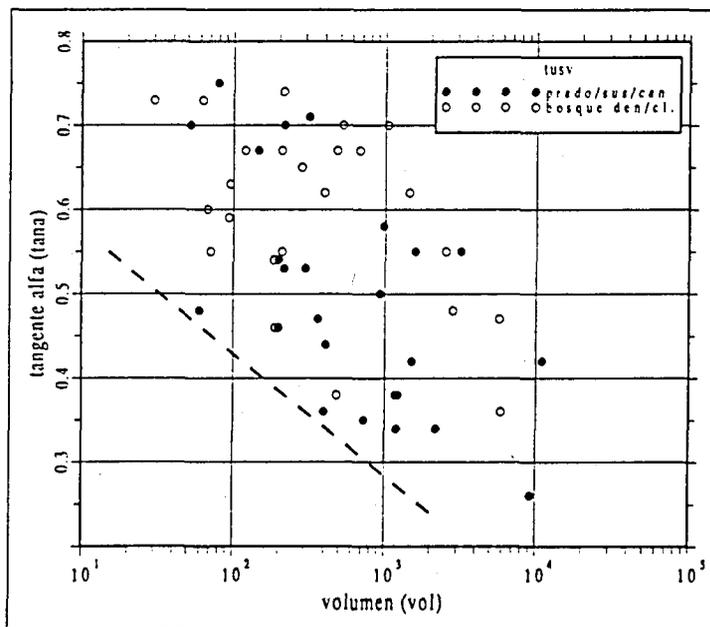


Figura 7.8. Representación gráfica del ángulo α del recorrido y el volumen movilizado de las corrientes de derrubios, diferenciando el tipo de recubrimiento de la ladera.

por el que se desplaza la masa (δ) sobre la movilidad de la misma. Si se observa detenidamente la gráfica representada por la figura 7.9, parece haber una incongruencia en la correlación que muestran las variables que define el atributo topográfico (δ) y la movilidad relativa (según α). Parecería lógica la existencia de una relación directa entre ambas variables, de tal forma que la movilidad fuese mayor cuanto mayor fuese el ángulo de la pendiente δ , sin embargo lo que se deduce de la representación gráfica es lo contrario. La dependencia que muestran las variables no puede interpretarse de forma directa, dada la relación que generalmente existe entre la pendiente δ y la cobertura vegetal que se desarrolla sobre la ladera. Generalmente los prados se desarrollan sobre pendientes menores (con valor medio y desviación de $\bar{x}=23.6^\circ$, $s=6.09^\circ$ en la zona de estudio) a las de zonas con cobertura de tipo boscoso que se extienden sobre pendientes más elevadas ($\bar{x}=26.7^\circ$, $s=7.40$). La relación entre la cobertura vegetal y la pendiente sobre la que se desarrolla, aunque no puede ser demostrada dada la inexistencia de una correlación estadística entre ambas, es lo que podría ser la causa de la aparente y contradictoria dependencia entre la movilidad y el ángulo de la pendiente δ que refleja la gráfica. La interpretación correcta que se podría extraer, tras las observaciones realizadas, es que la gráfica no refleja una dependencia entre δ y α , sino que de forma indirecta se reafirma el hecho de que la movilidad está condicionada por el tipo de cubierta de la ladera, cuando se analizan volúmenes como los aquí considerados.

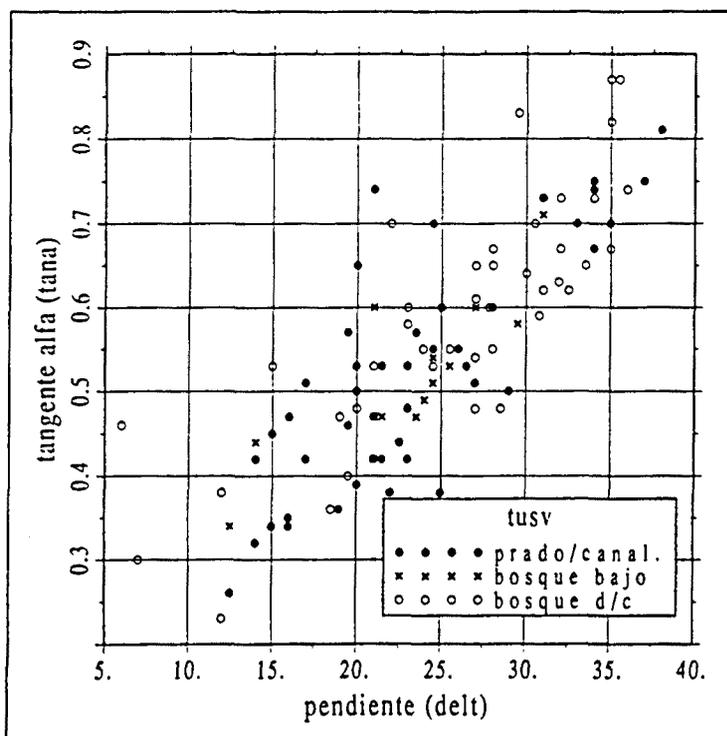


Figura 7.9. Representación gráfica de α respecto a la pendiente δ , separando los deslizamientos según el tipo de recubrimiento de la ladera por donde se desplaza (α).

Para analizar correctamente la influencia de la pendiente se ha realizado la misma gráfica diferenciando la muestra según los valores de la variable $lrdep$ (Fig. 7.10). Esta variable geométrica, que define en cierto modo la movilidad de la masa, separa claramente las dos poblaciones representadas por un valor límite de -0.5 . Las muestras con valores inferiores al de separación indican mayor movilidad que las caracterizadas por valores superiores. En la gráfica puede observarse la relación directa entre la movilidad según $lrdep$ y el ángulo de la pendiente δ , de forma que la primera crece cuando crece la segunda.

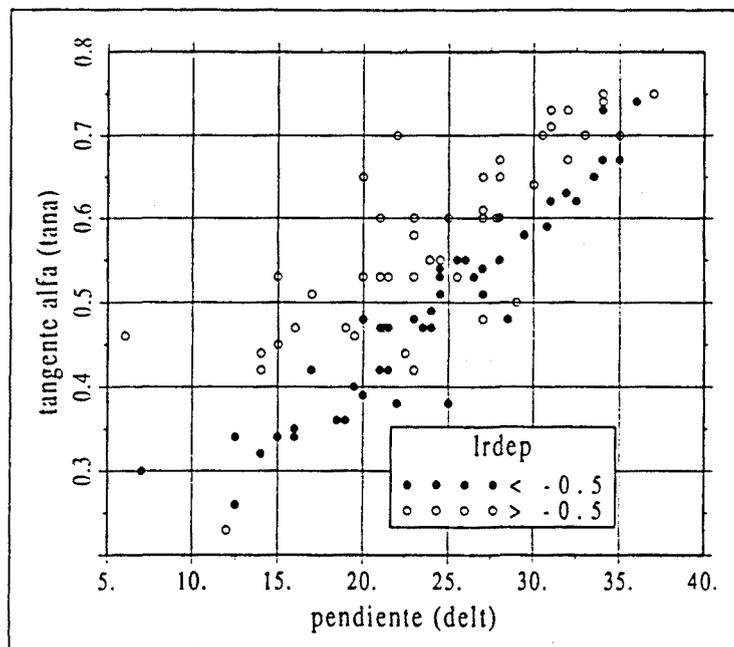


Figura 7.10. Representación gráfica del ángulo del recorrido expresado por tana y la pendiente δ (delta), diferenciando la muestra en función del valor de la variable $lrdep$.

El desnivel (\overline{desni}) conseguido tras el desplazamiento no parece tener ninguna relación con el ángulo de tana alcanzado, como muestra la figura 7.11. En esta gráfica se observa como para un mismo desnivel, el ángulo α del recorrido comprende un amplio rango de valores. Sin embargo sí que se deduce que se necesita más desnivel o caída para los desprendimientos para conseguir valores de tana similares a las coladas (por ej: desprendimientos $\overline{desni}=100-140m$, $\overline{tana}=0.5$; coladas $\overline{desni}=20m$, $\overline{tana}=0.5$).

Dichos resultados parecen indicar que cuando el desnivel es pequeño, el ángulo definido por Tana está principalmente controlado por las condiciones geométricas y obstáculos del terreno por el que se moviliza y probablemente por el volumen de la masa afectada como ha demostrado recientemente *Corominas, 1994 (in press)*.

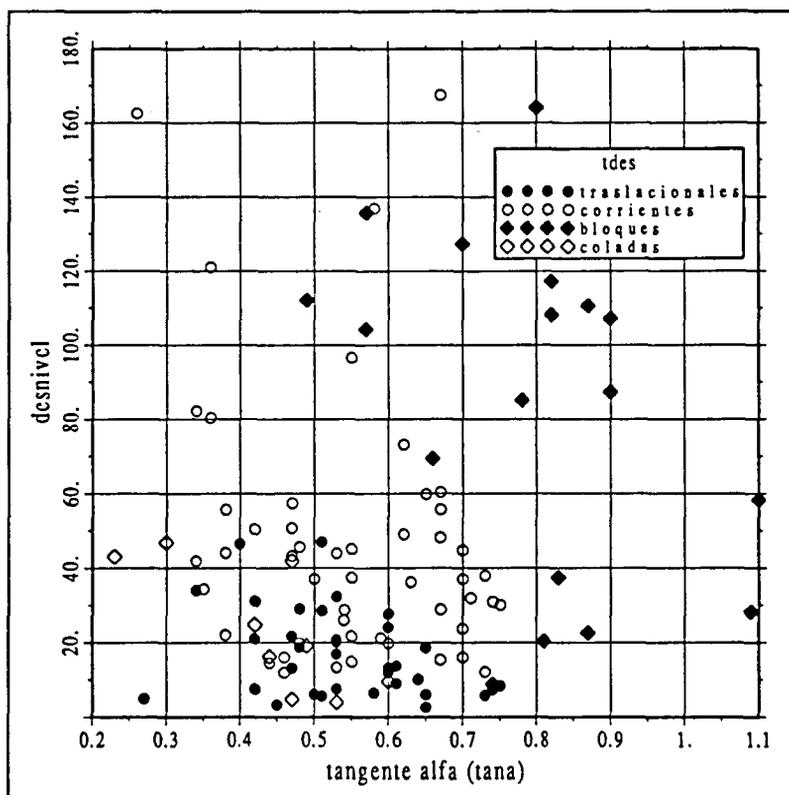


Figura 7.11. Representación gráfica del desnivel (desni) y la variable tana para los diferentes tipos de mecanismo de progresión del movimientos (traslacionales, corrientes, caída de bloques y coladas).

El efecto de los obstáculos presentes durante el recorrido vuelven a apreciarse en la figura 7.12, donde para un desnivel dado, las corrientes de derrubios se propagan con mayor facilidad cuando el uso del suelo es de tipo prado o sustrato y menor cuando es de tipo bosque. Los efectos sobre la movilidad quedan más patentes por debajo de los 100m.

En una segunda fase de análisis, se ha estudiado las posibles relaciones entre la distancia horizontal (Dish) cubierta por la masa movilizada y el volumen afectado y atributos que definen la geometría del recorrido.

La figura 7.13 muestra la relación entre la distancia horizontal (dish) y el volumen transformado logarítmicamente (Ivol). En la gráfica se observa como para un mismo volumen, existe una tendencia generalizada a que las caídas de bloques tengan un mayor alcance que los restantes tipos de movimientos. El mayor alcance de las caídas de bloques

respecto a otros movimientos indica consecuentemente que son más móviles. Esto parece contradecir los resultados obtenidos por tana, donde se ha reflejado claramente su menor movilidad respecto a corrientes y traslacionales, en términos del ángulo del recorrido. Esta contradicción podría tener la explicación en el hecho de que la mayoría de movimientos que comprenden caídas de bloques, tienen lugar en zonas escarpadas con una altura de caída inicial generalmente mayor a la de los restantes movimientos. Parece ser pues, que son necesarios grandes desniveles para cubrir grandes distancias.

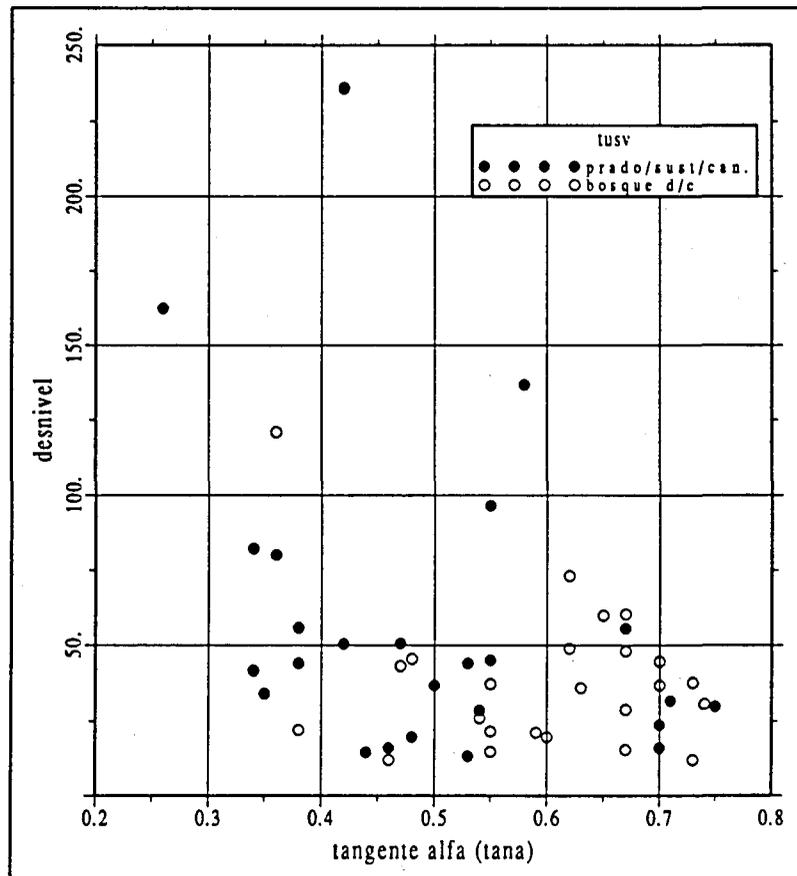


Figura 7.12. Representación gráfica del desnivel (desni) y la variable tana para las corrientes de derrubios, diferenciando el tipo de recubrimiento de la ladera (tusv).

La relación entre la distancia horizontal recorrida (dish) y el desnivel (desni) se confirma de forma clara en la figura 7.14, donde se representan los valores de ambos atributos diferenciados por seis intervalos de volúmenes de la masa que ha sido desplazada. Se evidencia nuevamente la contribución del volumen en la movilidad. En la figura 7.15, donde sólo se han representado los valores de la distancia inferior a 350m, puede apreciarse mejor la influencia del volumen.

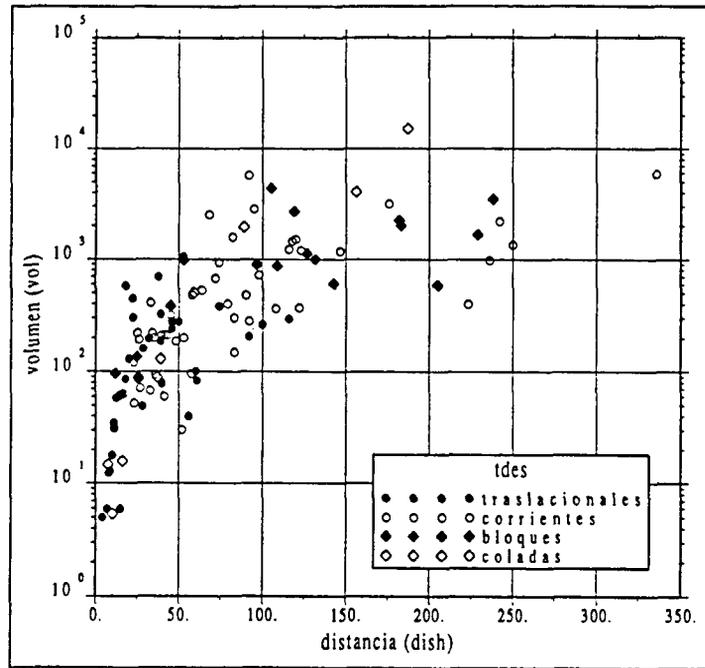


Figura 7.13. Representación gráfica del volumen movilizado (lvol) y la distancia horizontal recorrida por el movimiento de masa (dish), diferenciando el tipo de mecanismo de progresión (traslacionales, corrientes de derrubios, caída de bloques y coladas).

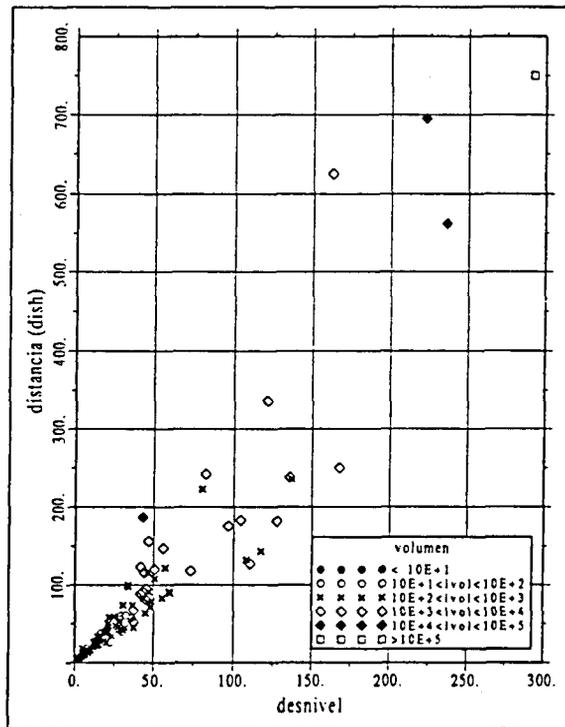


Figura 7.14. Representación gráfica de la distancia horizontal recorrida (ldish) respecto del desnivel (ldesni), diferenciando la muestra según unos rangos de volumen.

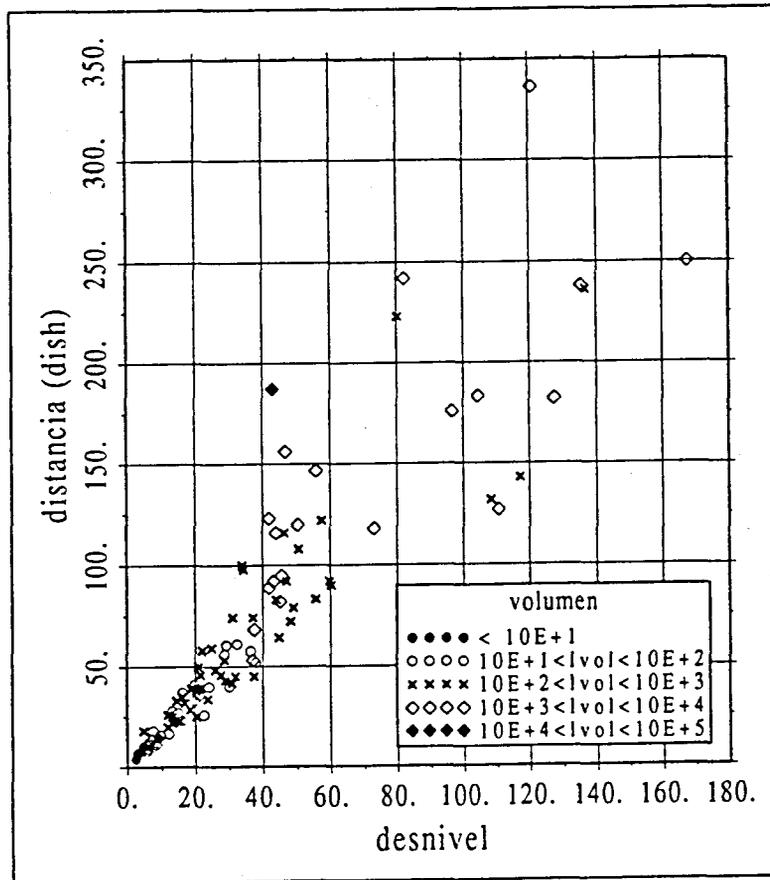


Figura 7.15. Representación gráfica de la distancia horizontal recorrida (ldish) inferior a 350m respecto del desnivel (ldesni), diferenciando la muestra según unos rangos de volumen.

La siguiente figura (Fig. 7.16) muestra los efectos de la movilidad, en términos de L_{rdep} , de la masa sobre la distancia horizontal recorrida. Se ha realizado una gráfica donde se representan las variables, transformadas logarítmicamente, de la distancia horizontal (ldish) y el desnivel (ldesni), diferenciando las muestras según su valor de L_{rdep} . Se observa como las poblaciones definidas por los tres rangos de valores; muestran una buena separación. La distribución de las tres poblaciones, indicativas de una movilidad relativa explicada a través de L_{rdep} , informa sobre la relación existente entre ésta y la distancia máxima alcanzada. Dicha distribución indica que la movilidad, explicada por la geometría de movimiento, favorece la distancia que puede recorrer la masa, siendo los valores pequeños de la variable L_{rdep} los que representan una mayor movilidad. De esta forma se confirman los resultados obtenidos en la figura 7.10, donde ya se había reflejado la influencia de L_{rdep} en la distancia horizontal.

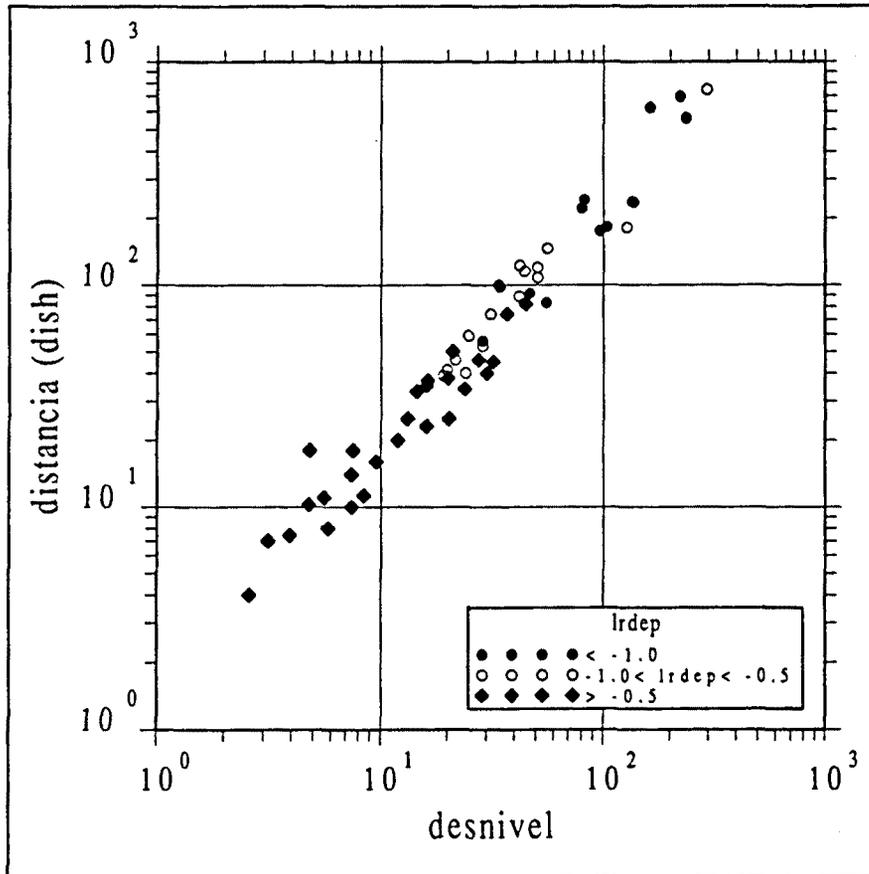


Figura 7.16. Representación gráfica de la distancia horizontal recorrida (l_{dish}) respecto al desnivel del movimiento, diferenciando la muestra en tres intervalos de la variable l_{rdp} .

La última gráfica (Fig. 7.17) muestra la distribución de la población, diferenciada por el tipo de mecanismo de progresión de la masa, según las variables de volumen e índice de movilidad.

El denominado índice de movilidad expresa el parámetro denominado por *Hsiü* (1975) como distancia máxima recorrida ("excessive travel distance") y que está definido por la relación entre la distancia horizontal observada y la distancia horizontal esperada ($H/tg 32^\circ$), cuando el ángulo de fricción normal es de 32° . Seleccionando solo aquellos movimientos que no muestran ninguna posible retención del material deslizado, es decir desestimando los

deslizamientos ocurridos en zonas forestales claras o densas que pudieran impedir el avance de la masa, se ha calculado que la mayoría (77%) de la muestra tienen un índice de movilidad superior a 1. Esto significa que la mayoría de deslizamientos ya experimentan con normalidad una movilidad extrema. Estos resultados contradicen pues, el significado con el que Hsü propuso dicho parámetro. El autor afirmaba que los deslizamientos de pequeñas dimensiones ($<0.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) no presentaban movilidad excesiva (Le), declaraciones que parecen quedar invalidadas tras los resultados obtenidos de la aplicación de este parámetro a movimientos de un volumen inferior a 10^6 m^3 .

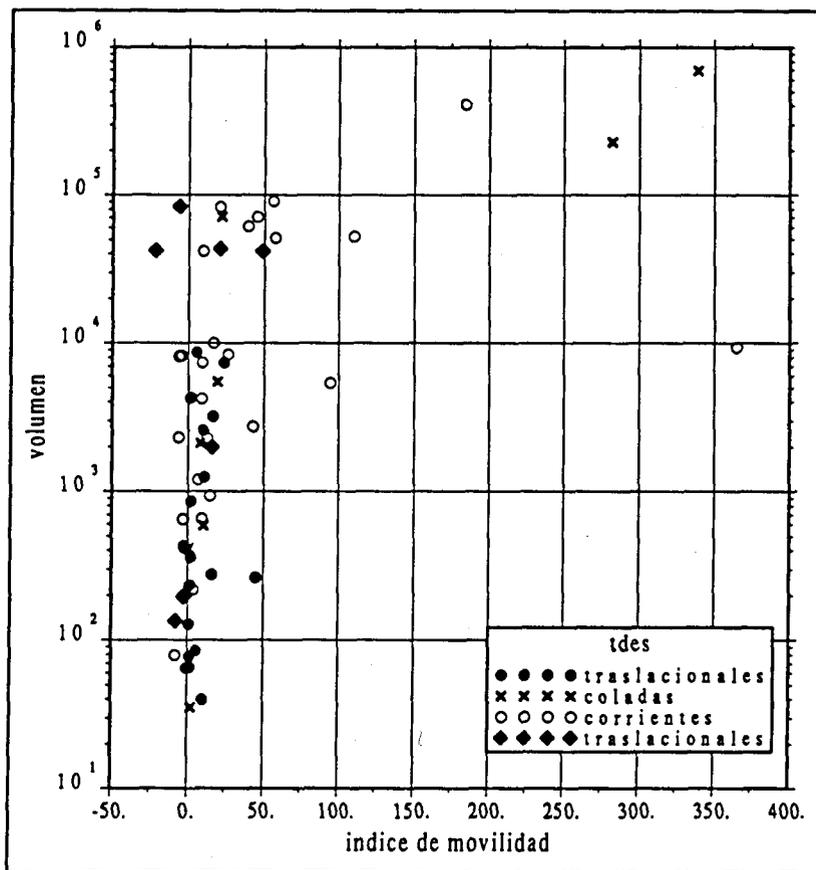


Figura 7.17. Representación gráfica del volumen (lvol) y el índice de movilidad (Hsü, 1975), diferenciando los movimientos según el tipo de mecanismo de progresión.

7.2.2.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE.

La fase preliminar del análisis ha permitido conocer qué factores de los estudiados condicionan la movilidad del deslizamiento y determinar de forma cualitativa su influencia. Sin embargo, el tipo de análisis gráfico entre pares de variables, aunque aporta una información muy valiosa, no permite determinar la contribución relativa que tienen los diferentes factores.

De los resultados obtenidos hasta el momento, se deduce que no existe una relación sencilla que pueda explicar la movilidad, impidiendo así establecer una función simple con la que predecir el alcance.

Si se parte de la premisa de que la progresión del movimiento de masa esté controlado por un conjunto de factores, la combinación de los cuales puede o no favorecer su movilidad, parece evidente que el análisis que debe llevarse a cabo para estimar la distancia recorrida por la masa tiene que tratar de forma conjunta todos los atributos que pueden influir en el alcance.

La técnica de análisis utilizada en estos casos, es la regresión múltiple, la cual permite tratar un gran número de variables al mismo tiempo. El análisis paralelo de estas variables permite a su vez, poder conocer no sólo cuales son las que tienen influencia, sino cuantificar de forma relativa dicha influencia.

Partiendo de un modelo lineal, las técnicas de regresión múltiple se han utilizado para representar la dependencia lineal de una variable *respuesta* y , respecto a otras variables x_1, \dots, x_n .

La variable y , también llamada "dependiente" o "explicada" estará representada por una variable que defina la distancia recorrida por la masa, siendo las variables x_i , llamadas también "regresoras" o "independientes", representadas por las distintas variables que describen los factores del control de la progresión del deslizamiento anteriormente analizadas.

Para construir la función de regresión lineal múltiple se seguirá la metodología siguiente:

- a. Establecer un conjunto de hipótesis básicas de partida.
- b. Tomar una muestra de la población original y estimar los parámetros de la función de regresión.
- c. Diagnóstico de la función mediante el análisis de los residuos.
- d. Validar la función de regresión, a partir de la muestra que no ha sido utilizada para la estimación de los parámetros.

- Selección de la variable explicada.

Las ecuaciones de regresión que han sido propuestas hasta el momento para la evaluación del alcance, están basadas en la reconocida relación que existe entre el volumen y la tangente del ángulo α (ver Capítulo 1. Introducción). Las ecuaciones de tipo univariante que resultan en todos estos estudios (*Scheidegger, 1973; Li, 1983; Davies, 1982*) toman la relación entre el desnivel y la distancia horizontal recorrida (H/L) que definen la tangente α (Tana) como variable dependiente para explicar el recorrido de la masa.

El control de la movilidad, en términos del ángulo α , por el volumen, el uso y cobertura de la ladera (TUSV) y el tipo de mecanismo de progresión de la masa, así como su independencia del resto de atributos del terreno, hace que TANA sea la variable respuesta idónea para definir la función de regresión. Sin embargo, la correlación entre las variables cuantitativas TANA y VOL, ha estado condicionada en este estudio, por el rango de valores de esta última variable que está representado en la muestra. Se ha demostrado en el estudio llevado a cabo por *Corominas (1994 in press)*, que existe una continua reducción del ángulo α con el incremento del volumen para todos los movimientos y sin la existencia de ningún umbral específico de volumen que justifique la presencia de mecanismos de propagación especiales, tal como proponían *Scheidegger (1973)* y *Hsü (1975)* entre otros. Cuando se intenta analizar las relaciones entre TANA y VOL, para un intervalo determinado de todo el posible rango de valores de volumen afectado, no se obtiene ninguna correlación. La ausencia de correlación no debe interpretarse equivocadamente, pues no quiere decir que no exista, simplemente que en el estudio que aquí se plantea, el sesgo de la variable VOL es extremadamente importante, dominando los resultados.

Dadas las limitaciones que se imponen al trabajar con el ángulo α como variable que explica la movilidad, se ha propuesto la variable DISH para la evaluación del alcance de la masa deslizada. Dicha variable ha permitido llevar a cabo el análisis de regresión múltiple con buenos resultados como se verá a continuación.

DISH, como variable que representa la distancia horizontal recorrida por la masa movilizada, ha sido seleccionada considerando que los resultados que se obtienen de la ecuación de regresión tienen como objetivo el análisis de riesgo de un área determinada. Una vez se conocen los valores del alcance, la proyección horizontal de la distancia, puede ser representada directamente sobre un plano, facilitando la cartografía de la zonificación de riesgo. Evidentemente, deben valorarse cautelosamente los resultados que se obtengan de la función de regresión utilizando dicha variable, pues los valores de Dish dependen de la altura de caída, mientras que los valores de Tana son independientes de ella.

- **Definición de la función de regresión.**

Siguiendo la metodología de análisis expuesta anteriormente, se han establecido las hipótesis habituales con las que poder construir la ecuación de regresión. La hipótesis principal supone una distribución normal conjunta donde la perturbación o residuo tiene media 0 y varianza constante σ^2 . La hipótesis adicional necesaria para evitar la ambigüedad en la interpretación de los resultados es que las variables explicativas sean finalmente independientes.

Se ha realizado un análisis de regresión para cada una de las poblaciones en las que se ha subdividido la muestra. Cada población corresponde a un tipo de movimiento según el mecanismo de progresión de la masa. El análisis conjunto de todos los tipos de movimientos, con el objetivo de cuantificar la influencia que tiene el mecanismo (Tdes) no ha sido posible, debido a que la técnica de regresión trabaja con variables numéricas continuas, desestimando las de tipo categórico o de valor discreto por impedir la normalidad del conjunto además de impedir la diagnosis de la función mediante los gráficos de residuos. Para paliar esta limitación y conociendo la influencia que han mostrado algunos factores tras el análisis preliminar de tipo gráfico, se ha trabajado con submuestras homogéneas, en las que las variables cualitativas fueran constantes, es decir, independizando el análisis del efecto de tales factores.

La importancia comprobada del mecanismo del movimiento y la cobertera vegetal y uso de la ladera en el control de la movilidad, ambas variables definidas en el archivo como de tipo cualitativa por Tdes y Tusv, ha determinado la definición de las poblaciones a analizar. Los efectos de retención del material que produce el tipo de cobertera vegetal ha obligado a seleccionar sólo aquellos deslizamientos que hubieran tenido lugar en zonas donde no hubiera habido una posible obstaculización de la masa, desestimando en consecuencia los movimientos ocurridos en laderas bocosas.

Una de las importantes limitaciones que conlleva el análisis de subpoblaciones, es la restricción de la muestra representada en cada una de ellas. Por este motivo se ha creído conveniente analizar en esta fase del análisis todo el conjunto de muestras que componen el archivo de datos (Berga-Solsonès y Andorra). De las cuatro agrupaciones que definen el tipo de movimiento, sólo dos están representadas por un número de datos suficientes que garanticen un correcto análisis e interpretación estadística. Estos dos grupos son los formados por:

Grupo 1: Deslizamientos traslacionales (N=35)

Grupo 2: Corrientes de derrubios (N=49)

Para definir la función de regresión de cada grupo, sólo se ha utilizado una muestra de la población, con el fin de poder posteriormente comprobar la validez de las ecuaciones con

los nuevos datos. El muestreo de los datos con los que se han estimado los **parámetros de la función** se ha realizado de forma automática para que no hubiera subjetividad alguna en la selección que pudiera condicionar los resultados.

Las posibles variables explicativas del alcance han sido preseleccionadas considerando los resultados obtenidos con el análisis de componentes principales y gráficas bivariantes. La aplicación de la técnica factorial de componentes principales sobre el conjunto de datos, ha evidenciado la relación entre la variable respuesta **ldish** y las variables explicativas **lvol** y **lrdep**, que se ha confirmado posteriormente mediante su representación gráfica (Fig. de 7.13 a 7.16).

El análisis de regresión múltiple, se ha llevado a cabo mediante la utilización del paquete estadístico SPSS-X. El programa permite tener un control de la ecuación de regresión, utilizando diversos criterios de selección de las variables explicativas. El método de regresión utilizado ha sido el denominado *Forward*, mediante el cual hay una introducción progresiva de las variables explicativas en la ecuación, tras pasar por unos controles estadísticos (*Drapper & Smith, 1981; Spss Inc., 1988; Peña, 1992*).

Tras realizar un muestreo aleatorio de los casos, se han seleccionado 30 muestras del primer grupo y 43 del segundo grupo, guardando los restantes para la validación.

Una vez aplicado el análisis sobre el total de muestras seleccionadas, las ecuaciones de regresión múltiple que se han obtenido para cada grupo son:

Grupo 1 (deslizamientos traslacionales):

$$Ldish = 0.452439lvol - 0.295715lrdep + 0.453831 \quad (R=0.89) \quad (11)$$

o también

$$Dish = 2.84 vol^{0.45} / rdep^{0.30}$$

Grupo 2 (corrientes de derrubios):

$$Ldish = 0.358151lvol - 0.377182lrdep + 0.701970 \quad (R=0.94) \quad (12)$$

o también

$$Dish = 5.00 vol^{0.36} / rdep^{0.38}$$

	R	R ²	SE	F ($\alpha= 0.05$)	Sig F	
Grupo 1	0.89	0.80	0.17	52.92	0.000	
Variable	S β	Corr	Corr. parc.	Toler.	T ($\alpha=0.05$)	Sig T
LVOL	0.715	0.753	0.845	0.994	8.211	0.000
LRDEP	-0.481	-0.538	-0.729	0.994	-5.528	0.000

Tabla 7.3. Resumen de los parámetros estadísticos de la función de regresión 11 para el grupo 1 que forman los deslizamientos traslacionales.

	R	R ²	SE	F ($\alpha= 0.05$)	Sig F	
Grupo 2	0.94	0.89	0.14	161.28	0.000	
Variable	S β	Corr	Corr. parc.	Toler.	T ($\alpha=0.05$)	Sig T
LVOL	0.601	0.829	0.849	0.800	10.197	0.000
LRDEP	-0.504	-0.776	-0.804	0.800	-8.557	0.000

Tabla 7.4. Resumen de los parámetros estadísticos de la función de regresión 12 para el grupo 2 que forman las corrientes de derrubios.

El valor de las correlaciones ha sido evaluado usando parámetros estadísticos tales como el coeficiente de correlación múltiple (R), el error estándar de la estimación (SE), el estadístico F y los residuales. Un mínimo valor de R de 0.87, con el que se explica el 75 por ciento de la varianza de los datos, ha sido considerado como límite aceptable para el estudio.

El método *forward* utilizado para la construcción de la ecuación de regresión múltiple permite, dadas las características de entrada consecutiva de las variables independientes y definición de la ecuación en cada paso, poder evaluar no sólo la regresión final sino todas y cada una de las formuladas en los estadios preliminares.

Así pues, para ambos grupos se ha definido una primera regresión univariante con la entrada inicial de la variable *lvol* (con mayor significación de F), resultando los estadísticos de $R=0.75$ y $R=0.82$ para traslacionales y corrientes de derrubios respectivamente. Dichos valores de R no alcanzan el valor mínimo establecido, explicando sólo un 56% y 68% de la varianza.

Tras la entrada de la variable *lrdep* y definición de las ecuaciones 11 y 12, los valores del *coeficiente de correlación* $R(>0.89)$ aumentan considerablemente respecto a las regresiones univariantes luego, es necesario utilizar más de un factor para poder explicar la distancia recorrida por la masa. Las tablas 7.3 y 7.4 muestran un resumen de los parámetros estadísticos resultantes de las ecuaciones de regresión 11 y 12. La varianza explicada por las regresiones es de un 80% para el grupo 1, formado por los deslizamientos traslacionales y de 89% para el grupo 2, formado por las corrientes de derrubios. El análisis de la varianza, expresado por el estadístico F, expresa la significación conjunta de las variables. Puesto que los valores de $F_{g1}=52.9$ y $F_{g2}=161.3$ son mayores que $F_{g1(0.05;2.27)}=3.35$ y $F_{g2(0.05;2.40)}=3.23$, para dos grados de libertad de la varianza explicada y un margen de error de $\alpha=0.05$, se puede concluir que la relación encontrada es significativa, es decir, existe relación lineal entre las variables explicativas *lvol*, *lrdep* y la variable explicada *ldish*.

Además del coeficiente de correlación, mediante el cual se ha demostrado la semejanza entre la variable explicada y su estimación lineal para ambos grupos, las tablas incluyen otros coeficientes que pueden ayudar a determinar la importancia relativa que muestran las variables explicativas en la ecuación. En primer lugar se indican los *coeficientes estandarizados de la función* ($S\beta$), los cuales expresan la tasa de cambio que interviene en la variable explicada, cuando la variable explicativa considerada varía en una unidad, manteniendo constantes las demás. Por ejemplo, en la ecuación de regresión representada por los traslacionales, el efecto de un aumento de 1 unidad de volumen (variable tomada en logaritmo) supone un aumento de 0.7 unidades en la distancia horizontal (variable tomada en logaritmo), mientras que el aumento de 1 unidad de la variable *lrdep* supone una reducción de 0.4 unidades de la variable explicada. El peso o contribución de las variables explicativas sobre la variable explicada es semejante en ambas ecuaciones (11, 12), siendo el volumen con un 0.71 y 0.6 respectivamente la variable que muestra mayor influencia en la función. La variable *lrdep* representa el concepto de movilidad de la masa, siendo mayor cuanto menor es el valor de la variable, de ahí que su coeficiente en la función sea negativo.

El *coeficiente de correlación simple* (*Corr*) indica la correlación entre la variable explicada (*ldish*) y cada uno de los regresores (*lvol*, *lrdep*). Como puede observarse en ambas tablas, el valor absoluto de la correlación de la variable volumen es siempre mayor que el de la variable *lrdep* y por tanto mayor es el control de este factor sobre la distancia esperada de la masa movilizada.

El último coeficiente, denominado *coeficiente de correlación parcial* (*Corr. par.*) se utiliza para estudiar la relación entre la variable explicada y una variable explicativa, eliminando el efecto de las restantes variables explicativas. El valor del coeficiente sirve así, para determinar la influencia real de la variable, determinando consecuentemente su rechazo o no de la ecuación.

La *Tolerancia (Toler)*, como la parte de la variabilidad de una variable no explicada por el resto de las variables de la ecuación, informa sobre la posible dependencia de las variables explicativas. Cuanto mayor es el valor de Toler (siempre comprendido entre 0-1) mayor es la independencia entre las variables, siendo preciso eliminar aquellas que tengan una colinealidad elevada. El valor de Tolerancia que muestran las tablas 7.3 y 7.4 es superior a 0.80, indicando una independencia de las variables en ambos grupos.

La significación individualizada de las variables explicativas *lvol* y *lrdep* queda justificada en ambos grupos 1 y 2 por el estadístico *T (t de Student)* a un nivel de significación de $\alpha=0.05$, indicando así la influencia de ambas en la regresión.

Las figuras 7.18 y 7.19 muestran la representación gráfica de los valores observados de la distancia horizontal recorrida respecto los valores estimados por las regresiones para el grupo de movimientos traslacionales y corrientes de derrubios respectivamente. En ambas gráficas se ha indicado con trazo discontinuo y como medida de precisión de la regresión, la banda de confianza del 95% definida a partir de $\pm SE$ (error standard). Se puede observar como el 100% y el 93% de los valores de los movimientos tipo traslacional y corrientes, respectivamente, quedan comprendidos dentro de la banda, reflejando la buena aproximación a la realidad de los valores estimados de la ecuación 11 y 12.

A continuación, se ha realizado un análisis de los residuos con el objeto de comprobar las hipótesis hechas inicialmente para la construcción de las ecuaciones de regresión.

Dado el pequeño número de observaciones de que se dispone de cada una de las poblaciones, no es posible que se pueda detectar fenómenos significativos.

El estudio de los residuos se ha llevado a cabo mediante el análisis gráfico de éstos. Para ello se han construido para los grupos 1 y 2 los siguientes gráficos: gráfico de los residuos respecto a los valores estimados (Fig. 7.20a y 7.21a); gráfico de los residuos respecto a las variables explicativas (Fig. 7.20b y 7.21b) y gráficos parciales de los residuos (Fig. 7.20c y 7.21c).

Se puede observar como los gráficos de residuos respecto a los valores estimados y los de residuos respecto a las variables explicativas *lvol* y *lrdep*, obtenidos de las ecuaciones 8.1 y 8.2 para los grupos de traslacionales y corrientes, muestran una distribución en forma de nube, no presentando estructura, por lo que ninguno ofrece evidencia de error de especificación. No se observa en ninguno de los gráficos anteriores, heterocedasticidad (variabilidad no constante) de las distribuciones, ni dependencia de la perturbación respecto a la estimación o las variables explicativas.

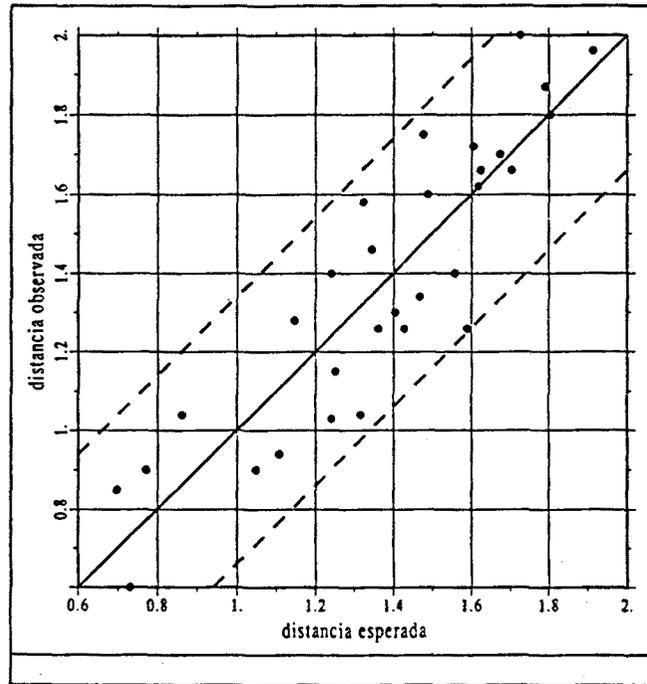


Figura 7.18. Gráfica que muestra los valores observados respecto los obtenidos de la función de regresión 11 de la distancia horizontal recorrida por los *movimientos traslacionales*. Las líneas discontinuas indican las bandas de confianza del 95%.

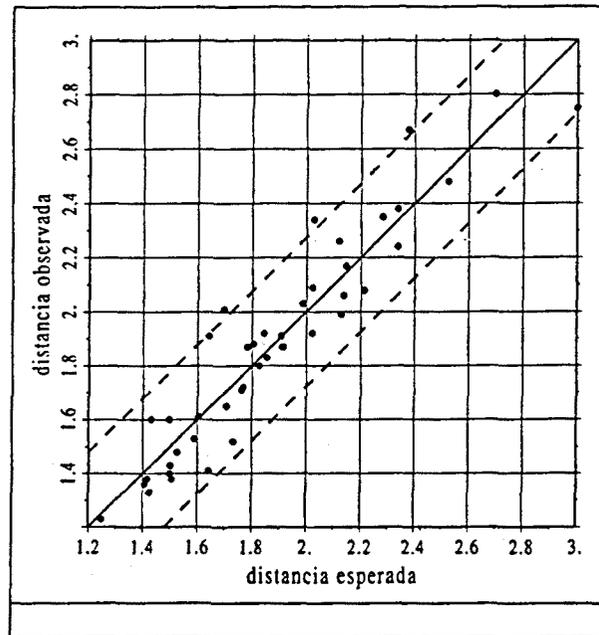
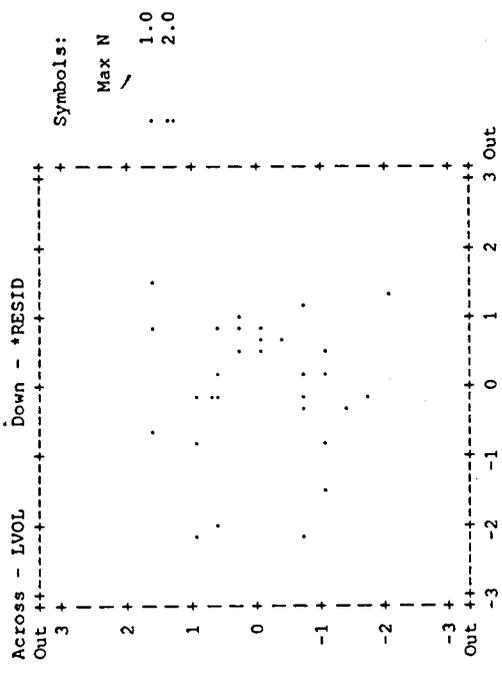
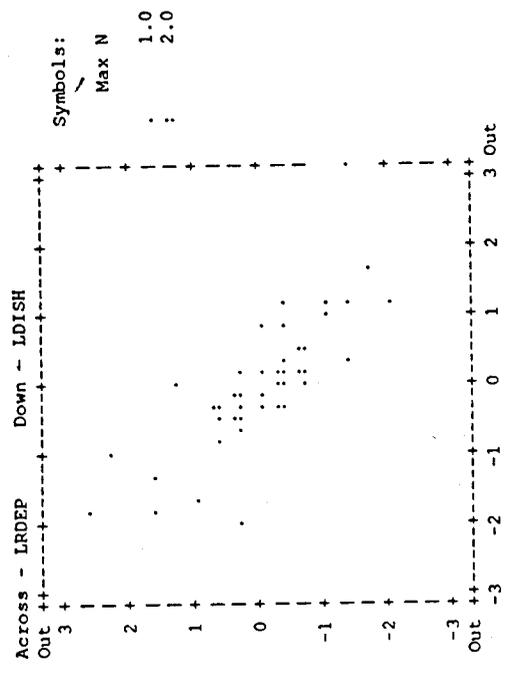


Figura 7.19. Gráfica que muestra los valores observados respecto los obtenidos de la función de regresión 12 de la distancia horizontal recorrida por las *corrientes de derrubios*. Las líneas discontinuas indican las bandas de confianza del 95%.



a)



b)

Figura 7.21. Gráficos de los residuos respecto a las variables explicativas lrdep y lvol obtenido de la función 11 para los movimientos traslacionales (a) y de la función 12 para las corrientes de derrumbios (b).

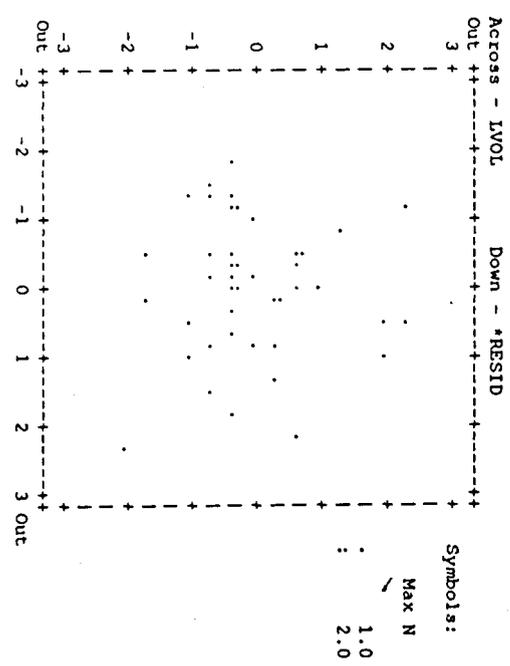
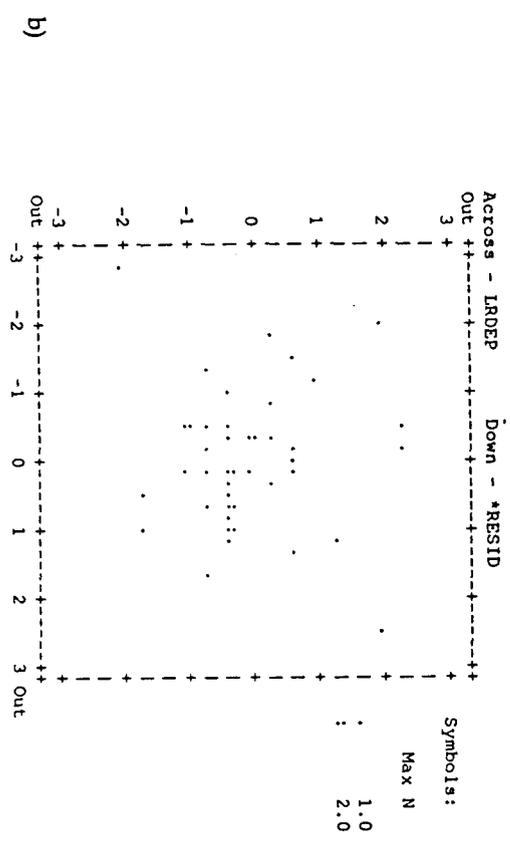
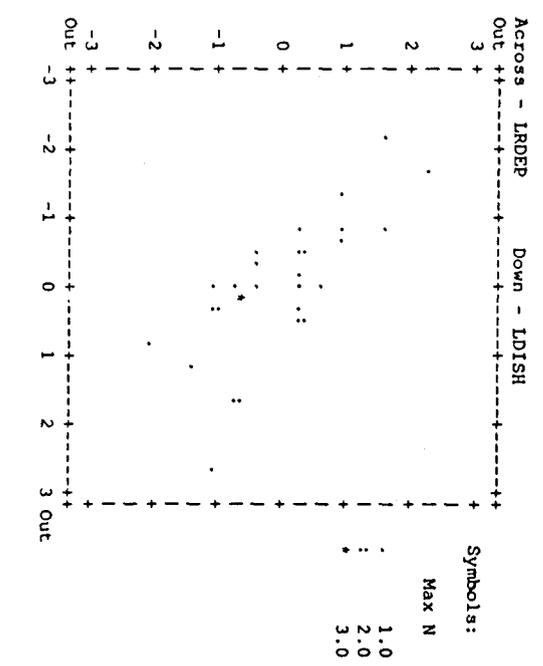
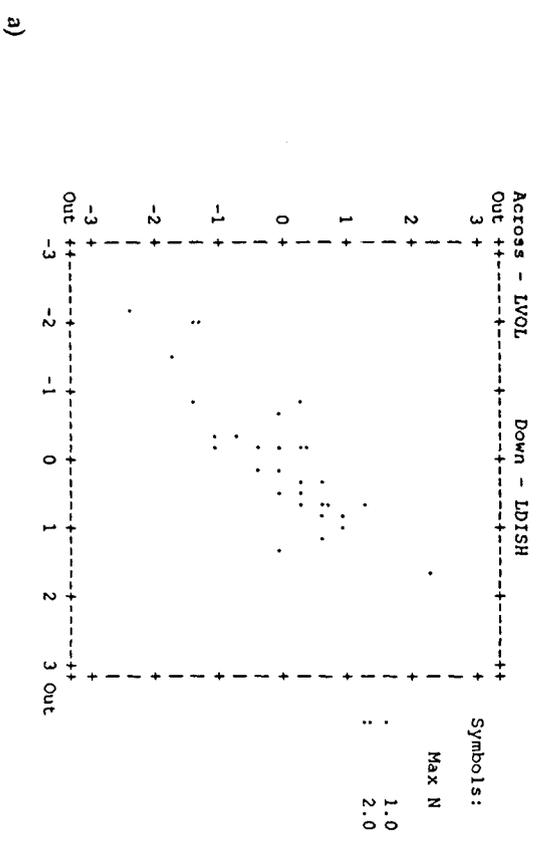


Figura 7.22. Gráficos parciales de los residuos (Ivol-Irish, Irdep-Irish) obtenidos de la función 11 para los movimientos tipo traslacional (a) y de la función 12 para las corrientes de derrubios (b).

Tras la comprobación del modelo lineal que siguen las ecuaciones de regresión, se ha llevado a cabo una validación de las mismas. Las ecuaciones obtenidas sólo serán válidas si pueden predecir el alcance dentro de unos límites de error aceptables. Para verificar esto, se han tomado 10 muestras de las cuales 5 son movimientos traslacionales y 5 son corrientes de derrubios. Sobre cada grupo de muestras se ha aplicado la función de regresión correspondiente (11 y 12), obteniendo el alcance estimado y el error de estimación. Las tablas 7.5 y 7.6 muestran comparativamente los valores observados, estimados y su diferencia o residuo, tras la aplicación. En todos los casos el error de estimación es inferior al 12.0%, encontrándose todas las muestras dentro de la banda de confianza del 95% ($\pm 2S$), lo que supone una precisión aceptable (Fig. 23a y 23b).

TRASLACIONALES (EC. 11)			
Muestra	Observado LDISH (i)	Estimado LDISH (ii)	Error de Estimación LDISH (i) - LDISH (ii)
p075	1.05	1.12	-0.07
p107	1.00	1.04	-0.04
p930	1.08	0.95	0.13
p952	1.17	1.21	-0.05
p771	1.51	1.36	0.14

Tabla 7.5. Valores observados, estimados y error de estimación de la distancia horizontal recorrida para las cinco muestras de movimientos traslacionales.

CORRIENTES DE DERRUBIOS (EC. 12)			
Muestra	Observado LDISH (i)	Estimado LDISH (ii)	Error de Estimación LDISH (i) - LDISH (ii)
1037	2.37	2.34	0.04
1055	1.54	1.71	-0.16
1552	2.10	1.99	0.11
1942	2.15	1.97	0.18
1957	1.89	1.83	0.06

Tabla 7.6. Valores observados, estimados y error de estimación de la distancia horizontal recorrida para las cinco muestras de movimientos tipo corrientes de derrubios.

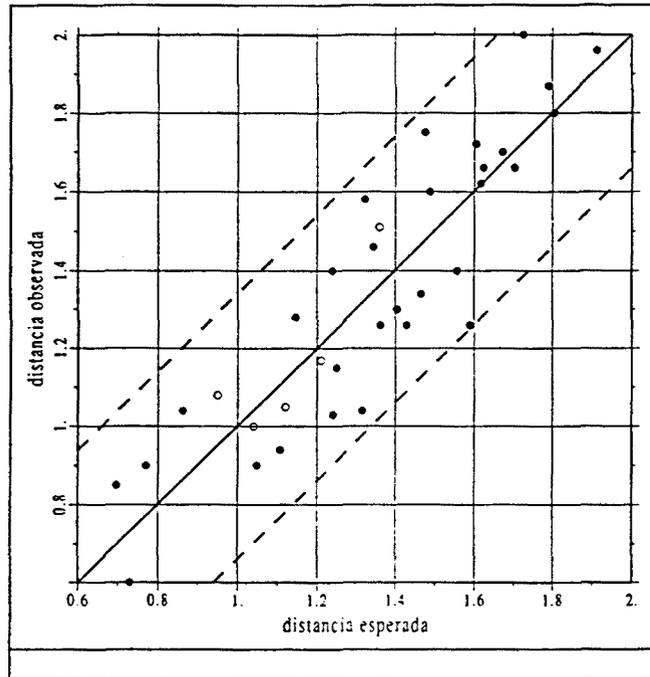


Figura 7.23. Representación conjunta de las muestras originales (•) y las cinco muestras de los movimientos traslacionales con las que se ha validado la función 11. Las líneas discontinuas indican las bandas de confianza del 95%.

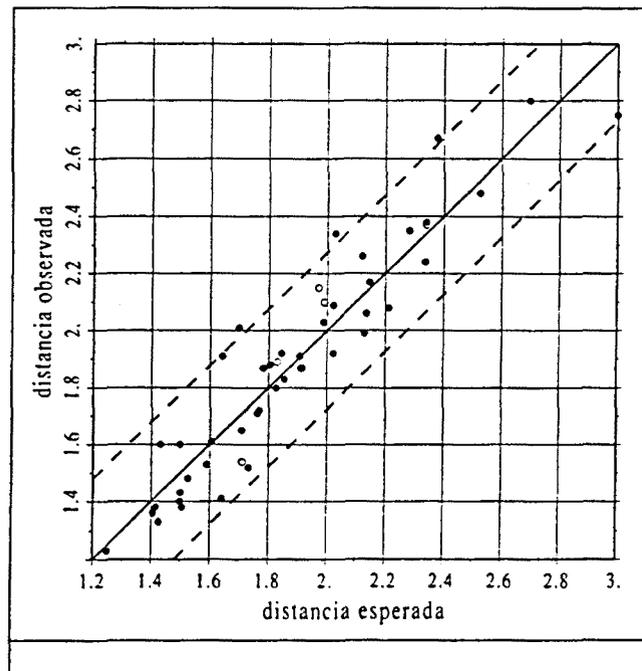


Figura 7.24. Representación conjunta de las muestras originales (•) y las cinco muestras con las que se ha validado la función 12 correspondiente a las corrientes de derrubios. Las líneas discontinuas indican las bandas de confianza del 95%.

Aunque tanto la comprobación de las ecuaciones, como su validación han sido satisfactorias, en próximos estudios debería tomarse un mayor número de datos con los que poder verificar estos resultados.

7.2.2.3. El volumen y las fuerzas de rozamiento como factores de control del alcance.

Las regresiones obtenidas por los traslacionales y corrientes de derrubios, han destacado la importancia del volumen y de la movilidad de la masa en el alcance de pequeños deslizamientos, tras eliminar los factores que producen un efecto de retención durante el desplazamiento.

Los efectos provocados por el incremento del volumen son diversos: menor influencia de los factores del ángulo de fricción por fragmentación del material y reorientación de las partículas del mismo en largos recorridos e influencia del grueso de la masa en el movimiento, favoreciendo la distancia recorrida (*Johnson, 1970*). Para poder explicar físicamente la influencia del volumen en la distancia recorrida por el deslizamiento, algunos autores han propuesto modelos basados en el efecto del cambio de masa y transferencia de la cantidad de movimiento durante el desplazamiento (*Cannon & Savage, 1988; Cannon, 1989; Van Gasen & Cruden, 1989; Cannon, 1993*). Estos sugieren que la modificación de la masa inicial por pérdida de material que se deposita durante el trayecto ladera abajo es una de las causas que condiciona la distancia final alcanzada, parándose el deslizamiento cuando el volumen todavía movilizado llega a ser despreciable. Estos estudios que no consideran que la masa del deslizamiento permanezca constante con el movimiento, tiene su justificación en las observaciones realizadas en campo, donde se ha podido comprobar que existe generalmente un proceso gradual de deposición del material durante el movimiento, dada la morfología elongada de muchos deslizamientos. Sin embargo, el cambio de masa también puede ser positivo, es decir, en algunos casos puede haber una adición de material a la masa inicial. Todos estos cambios pueden afectar la dinámica del sistema y consecuentemente la distancia recorrida (*Cannon, 1993*).

En los modelos propuestos se incluyen las fuerzas de rozamiento, debido a su influencia en el cambio de masas y por tanto en el alcance. Según el modelo de *Cannon & Savage (1988)*, basado en la segunda ley de Newton, la variación de la cantidad de movimiento está controlada por las fuerzas que actúan sobre el sistema:

$$d(mv)/dt = mgsen\theta - \mu mgcos\theta - Rv$$

donde $mgsen\theta$ representan las fuerzas que favorecen el movimiento, siendo θ el ángulo de la pendiente y $\mu mgcos\theta - Rv$ las fuerzas resistentes que se oponen al movimiento, siendo Rv

una fuerza viscosa que depende de la velocidad. Realizando algunas simplificaciones con el objeto de poder resolver la ecuación, se obtiene que la distancia final (s_f) del recorrido es proporcional a la masa inicial (m_0) y a la velocidad inicial (v_0) e inversamente proporcional a la resistencia viscosa (R). El modelo indica pues, que la resistencia viscosa produce una deceleración de la masa que influye en la distancia recorrida, siendo ésta menor cuanto mayor sea R . Dadas las estrictas condiciones de contorno impuestas para poder resolver la ecuación inicial, la distancia recorrida (s_f) se utiliza de forma adimensional, sirviendo de punto de referencia para evaluar la influencia del cambio de masa, pendiente y fuerzas de rozamiento de casos más complejos (ver *Cannon & Savage, 1988*).

Este modelo puede ayudar a explicar el por qué de la elevada contribución de lv_0 y $lrdep$ seleccionadas en las regresiones, la elevada correlación parcial de ambas con la distancia, así como el valor del parámetro estimado de cada una de la variables.

$lrdep$, definida a partir de la geometría del depósito, es una variable que refleja la mayor o menor movilidad de la masa y consecuentemente su estrecha relación con las fuerzas resistentes que se oponen al movimiento. Asumiendo esta relación entre la variable explicativa $lrdep$ y las fuerzas resistentes, parece obvio el valor negativo del parámetro estimado en las ecuaciones 11 y 12, el cual indica su efecto obstaculizador respecto al desplazamiento.

El volumen del material afectado por el movimiento es uno de los factores que influyen en la distancia, debido al efecto de pérdida y cambio de masa durante el trayecto que produce, a su vez, una variación de la cantidad de movimiento. El valor positivo del parámetro estimado para la variable que representa el volumen en las ecuaciones, refleja su relación directa con la distancia recorrida, como se acaba de exponer.

La contribución elevada de ambas refleja la importancia destacada que tienen los factores a los que representan, en la estimación del alcance del deslizamiento.

7.2.2.4. Limitaciones de las funciones de regresión obtenidas para la estimación del alcance.

Los resultados obtenidos de las ecuaciones de regresión 11 y 12 formuladas para la estimación del alcance, parecen haber sido claramente satisfactorias. Si además, se tiene en cuenta que se ha explicado una variabilidad muy alta de la muestra con un modelo relativamente sencillo, de tipo lineal y con tan solo dos variables explicativas, todavía tiene mayor interés su aplicación. Sin embargo, esta aplicación presenta ciertas limitaciones, condicionado principalmente por los mismos factores mediante los cuales se ha intentado explicar la distancia recorrida por la masa. Las funciones de regresión definidas en este estudio, requieren a priori una estimación del volumen de material que puede ser

potencialmente movilizado, así como la determinación de la posible movilidad, dado por un valor de l_{rdep} . El volumen puede ser directamente estimado en la zona potencial de rotura, cuando hay un marcado dominio estructural que permita delimitar la posible masa movilizada. Otra estimación puede realizarse a través de un estudio previo de los volúmenes que ya han sido movilizados en la zona de interés considerada. El valor de l_{rdep} únicamente puede estimarse a partir de la observación y medición de la geometría de los depósitos de los movimientos de ladera antiguos que se hayan preservado en la misma zona de interés.

Estas restricciones hacen difícil su aplicación inmediata, siendo en cualquier caso necesario un estudio previo de la zona de interés.

Otras limitaciones son las que se derivan al no haber podido controlar, o mejor dicho, independizar la distancia horizontal de la altura de caída de la masa, factor que influye en el recorrido como ya ha sido comentado anteriormente. Esto provoca que, aún pudiendo estimar con precisión el valor de l_{vol} y l_{rdep} , todavía deben tomarse con precaución los resultados obtenidos de la función, considerando todas sus limitaciones.

Finalmente es necesario recordar que el rango de volúmenes considerado ha condicionado el análisis de movilidad, siendo las funciones de regresión obtenidas sólo aplicables a deslizamientos superficiales de pequeñas dimensiones. Pues, se ha comprobado que los modelos que mejor explican la movilidad, cuando se analizan conjuntamente deslizamientos de pequeñas y grandes dimensiones, no siguen una ley lineal sino de tipo logarítmico o exponencial (Corominas, 1994 *in press*).

7.3. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.

En primer lugar, en este capítulo se ha realizado un análisis preliminar de tipo gráfico de las variables que definen algunos de los factores de control del recorrido de la masa, con el objeto de conocer el comportamiento de cada una y su relación con la movilidad de pequeños movimientos. Aunque en el inicio del capítulo ya se ponían de manifiesto algunas características conocidas de estas variables, éstas han podido ser confirmadas tras los resultados obtenidos del análisis, permitiendo además una cuantificación de la influencia conjunta de los factores mediante análisis multivariante.

Los aspectos más destacados del estudio han sido los siguientes:

- No se establece una dependencia clara entre el volumen y el ángulo del recorrido de la masa cuando, como consecuencia del análisis de movimientos superficiales, el rango de volúmenes considerado es pequeño, existiendo un sesgo de la variable l_{vol} que

impide definir una ley entre ambas.

- Influencia del mecanismo del movimiento, diferenciado según el tipo de progresión de la masa, en la movilidad relativa de pequeños deslizamientos en términos del ángulo α , reflejándose una movilidad creciente desde la caída de bloques, pasando por las corrientes de derrubios hasta los movimientos traslacionales.
- La progresión del material movilizado está controlada en parte por los efectos provocados por los obstáculos locales presentes en el recorrido. Así la propagación del deslizamiento depende del tipo de ocupación de la ladera, siendo mayor sobre una cobertera vegetal baja y poco poblada (prado o bosque bajo) que sobre una zona forestal.
- Influencia de la altura de caída de la masa movilizada en la distancia cubierta por la misma, pero no en el ángulo α del recorrido. Grandes alturas de caída corresponden a grandes distancias horizontales, pero grandes distancias horizontales no tienen por que corresponder a bajos ángulos α del recorrido. Esto implica que el concepto de movilidad que sugiere el término del ángulo α no se corresponde, y por tanto, no debe confundirse con el de alcance, pues no todos los movimientos que presenten bajos ángulos α del recorrido cubren grandes distancias.

La dificultad de realizar un análisis cuantitativo de todo el conjunto de factores de control de la movilidad de pequeños deslizamientos en términos del ángulo α del recorrido, ha dado lugar a un análisis del alcance, según la distancia horizontal cubierta, con todas las limitaciones que ello comporta. Tras eliminar el efecto de retención del material provocado por obstáculos locales y realizando un análisis individualizado de los movimientos mejor representados (traslacionales y corrientes de derrubios) se destaca que:

- Ambos mecanismos experimentan un mayor alcance con el incremento del volumen y la movilidad del deslizamiento, en términos de $lrdep$.
- En las regresiones obtenidas para movimientos traslacionales y corrientes de derrubios, el factor volumen muestra mayor contribución que el factor movilidad ($lrdep$) en la estimación del alcance horizontal del deslizamiento.
- La influencia del volumen movilizado en la distancia recorrida por el deslizamiento puede derivar de los efectos de los cambios de masa durante el recorrido y la consecuente transferencia de cantidad de movimiento a la parte de la masa todavía móvil. Los cambios de masa, o según este estudio el volumen, afectan a la dinámica del sistema y por consiguiente al alcance del deslizamiento.

- La variable $lrdep$, que explica la movilidad según la morfología del depósito, refleja la importancia que tienen las fuerzas friccionales, como fuerzas de oposición al movimiento, en el recorrido de la masa deslizada.

Aunque las regresiones obtenidas de los dos grupos de movimientos han resultado, dados los elevados coeficientes de correlación y su posterior validación, ser efectivas en la estimación del alcance, muestran importantes limitaciones que derivan de:

- La dependencia de la variable estimada con la altura de caída y su consiguiente control sobre el alcance.
- La previa estimación del volumen y la posible movilidad del material deslizado.

A pesar de estas limitaciones, estas funciones son las únicas de que se dispone actualmente para estimar la distancia recorrida de pequeños deslizamientos, pudiendo delimitar de manera aproximada las áreas que se encuentran bajo riesgo.

Para dar una mayor precisión del riesgo, es necesario mejorar la estimación de la distancia recorrida por el deslizamiento a partir de una mayor comprensión de los mecanismos que rigen cada tipo de movimiento y de los factores de control del mismo. Y, aunque los resultados obtenidos de los análisis ha permitido ver que las ideas básicas son correctas, en próximos estudios es recomendable:

- tomar un muestro mayor para poder estimar correctamente la movilidad y alcance de los diferentes tipos de movimientos.
- tomar un rango mayor de volúmenes que permita analizar la movilidad de pequeños y grandes deslizamientos conjuntamente.
- incorporar nuevas variables que definan con precisión el perfil topográfico del recorrido, así como otras características intrínsecas del material deslizado, que no eran objeto de este estudio, que pueden tener una cierta influencia en la movilidad y alcance final de la masa.

CAPÍTULO 8

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

En el Capítulo 6 se ha desarrollado una metodología que ha permitido, mediante técnicas multivariantes, conocer las condiciones de estabilidad del terreno frente a los deslizamientos. Mediante la definición de funciones discriminantes se ha podido determinar la tendencia a la estabilidad o inestabilidad de las laderas según la contribución de simples atributos del terreno.

Aquellas laderas que muestran condiciones desfavorables a la estabilidad pueden presentar una menor o mayor probabilidad de deslizamiento. Para poder evaluar dicha probabilidad, se ha examinado el grado de ajuste de una de las funciones discriminantes que mejor explican el comportamiento de la ladera en una zona piloto. El contraste entre las laderas evaluadas como de elevada probabilidad de rotura y las roturas realmente observadas, indica el grado de fiabilidad de las predicciones realizadas por la función, permitiendo por consiguiente, comprobar la utilidad de la metodología establecida.

8.1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA PILOTO.

La zona piloto pertenece al área de estudio general del Berguedà, y ha sido seleccionada por tener una litología potencialmente inestable, estructuralmente sencilla y de la que existiera una cartografía geológica que pudiera facilitar la interpretación de los resultados aquí obtenidos. Finalmente la elección de la zona ha estado condicionada por la existencia de mapas topográficos con escala 1:10.000, la cual se ha considerado suficientemente significativa para la adquisición de datos.

Considerando las variables que mayor influencia han mostrado tener en la estabilidad del

terreno y que consecuentemente constituyen la función discriminante, la zona seleccionada debía caracterizarse por una variabilidad de los factores representados por la función. Por ejemplo, representación de diversos tipos de cobertura vegetal. Con ello, lo que se pretende es que haya una buena muestra del rango que define a cada factor, sin la existencia de sesgo en ningún caso. Sólo de esta forma se puede validar correctamente la función de aplicación.

8.1.1. Situación geográfica.

El análisis de estabilidad mediante técnicas estadísticas discriminantes se ha realizado en la Cuenca de Vallcebre, situada en la parte occidental de la cuenca de l'Alt Llobregat en la comarca de l'Alt Berguedà.

La Cuenca de Vallcebre se encuentra limitada septentrionalmente por el valle del río Saldes y meridionalmente por el barranco de l'Obaga del Bosc de la Garganta, el cual es un tributario directo del Llobregat. Al oeste se elevan los relieves de la Serra d'Ensija (Gallina Pelada, 2.320m) y de la Serra de Malarrodona (Tossal de Caubell, 1.580m) que constituyen las cabeceras de los torrentes que drenan parte de la cuenca.

La Cuenca se divide en dos subcuencas separadas claramente por el escarpe de Conangle y del Grau Foradat. El escarpe que limita las dos subcuencas es atravesada por los cursos de agua procedentes de la subcuenca superior, formando un pequeño cañón denominado La Foradada (960m).

El área piloto seleccionada para el estudio corresponde principalmente a la subcuenca superior, aunque también se ha incorporado al análisis una pequeña zona de la parte de poniente de la subcuenca inferior tal como se muestra en la figura 8.1 y 8.2.

La subcuenca superior está atravesada por los torrentes de Costa Freda, del Forat y del Coll de Fumanya principalmente, procedentes de los relieves que forman la Serra d'Ensija y Costa Freda fundamentalmente y que confluyen, tras el escarpe de Conangle, para dar nombre al torrente de Vallcebre. La cuenca se ve afectada en un área aproximada de 0.7 Km² por las excavaciones a cielo abierto de la explotación de lignitos que afloran al pie de la Serra d'Ensija, pero que no han estado consideradas dentro del área de estudio.

8.1.2. Situación geológico-geomorfológica.

La zona de estudio se encuentra situada geológicamente en el denominado manto del Pedraforca en el subpirinéo oriental. Los relieves de la cuenca de Vallcebre están excavados sobre el sinclinal del mismo nombre y sobre el flanco del anticlinal que forma parte de la

Serra d'Ensija. Los materiales que constituyen estos relieves forman parte de la série de edad Maastrichtiense y fácies Garumniense del Manto alóctono del Pedraforca.

La litología y estructura de la cuenca de Vallcebre ha sido estudiada por Aepler (1968) (en *Balasch, 1986*). Dicho autor describe la siguiente série de abajo a arriba (Fig. 8.3):

- Calizas y calcarenitas con bioconstrucciones, seguidas de margas arenosas grises. Materiales datados del Maastrichtiense (Cretácico superior).
- Los materiales de la Fácies Garumniense (Cretácico superior-Paleoceno inferior) es de carácter continental regresivo y los constituyen de abajo a arriba:
 - Série de calizas inferior formada por calizas y margocalizas con fósiles (20-30m).
 - Série de margas inferior con niveles lignitíferos. La série finaliza con niveles de areniscas conglomeráticas y conglomerados cuarzosos (400-500m).
 - Série de calizas intermedias con algún nivel intercalado de margas grises (40-75m).
 - Série de margas intermedias con intercalaciones de yeso. La série finaliza con algún paquete de areniscas y calizas arenosas (100-150m).
 - Série de calizas superior, donde alternan los niveles de calizas con margas color gris y marrón (20-40m).
 - Série de margas superior ricas en arena y margas rojas con alguna intercalación de yeso (250m).
- Conglomerados del Eoceno superior-Oligoceno inferior, con disposición discordante.

Estructuralmente es una zona formada por pliegues con vergencia sur, afectados localmente por una fracturación poco desarrollada.

La orientación del anticlinal d'Ensija es NE-SO en la zona próxima a Vallcebre, siendo algo más compleja la estructura formada por el sinclinal de Vallcebre. Éste presenta dos ejes de plegamiento, uno de dirección E-O (al N d'Ensija) y otro NNE-SSO, paralelo al anticlinal.

Uno de los factores que ha condicionado fuertemente la geomorfología de la zona ha sido la litología, siendo la disposición estructural de los materiales lo que ha influenciado decisivamente el modelado a gran escala.

Los materiales que están mejor representados en la zona son las margas, tal como refleja la série geológica, además de la formación superficial cuaternaria. La poca resistencia de los materiales margosos favorece la incisión de las aguas superficiales, facilitando el desarrollo de las cárcavas. Las características mecánicas de estos materiales favorecen la formación de movimientos de masas. La heterometría y mayor granulometría de los coluviones no favorecen la arroyada pero dada su elevada permeabilidad respecto al sustrato, provoca condiciones de inestabilidad que se derivan en la formación de cuantiosos movimientos superficiales.

La estructura y alternancia litológica han condicionado la distribución espacial de la red de drenaje. En la subcuenca superior el torrente de Coll de Fumanya corre sinuosamente por un valle de dirección N-S, condicionado lateralmente por la barra de calizas de Vallcebre y calizas d'Ensija. Los torrentes de Costa Freda y del Forat procedentes de la Serra d'Ensija, drenan la cuenca hasta su confluencia con el torrente de Coll de Fumanya, tras atravesar la barra de calizas de Vallcebre y desagüar en el torrente principal del mismo nombre en la subcuenca inferior.

Sobre los materiales margosos del Garumniense, en los cuales ha desaparecido previamente la formación superficial, se desarrollan en algunas zonas de la cuenca las cárcavas, áreas altamente degradadas por la incisión de aguas concentradas. La meteorización del sustrato en las cárcavas es favorecida por la ausencia de una cobertera vegetal densa que impida la incisión de las aguas de arroyada. La cobertera fundamentalmente de tipo prado, de algunas zonas de la cuenca ofrece baja protección respecto la degradación del terreno.

Otros procesos de gran importancia que provocan la degradación del terreno son los movimientos de masa que actúan tanto sobre la formación superficial como el sustrato de la ladera.

Los movimientos de ladera que aparecen en la cuenca de Vallcebre muestran diversas tipologías. Se pueden diferenciar movimientos rápidos superficiales aislados y movimientos más lentos y profundos que son generalizados, además de procesos de soliflujión.

La existencia de una formación superficial más o menos continua sobre el sustrato margoso, hace que el terreno natural presente una discontinuidad sensiblemente paralela a la superficie y situada en el contacto de ambos. La diferencia de permeabilidad entre estos materiales favorece la inestabilidad del terreno, originando continuos deslizamientos superficiales. Los deslizamientos que se observan en la cuenca son fundamentalmente de tipo planar-traslacional asociados a zonas con fuertes pendientes. Son paquetes que movilizan un volumen reducido y que aíslan superficies relativamente pequeñas. Los de tipo rotacional se producen en la proximidad de taludes verticalizados de los torrentes, donde la sobreexcavación acelera el proceso de inestabilidad. Las coladas aparecen en algunas zonas

(Costa Freda) canalizadas en los lechos que se forman en las áreas de cárcavas. Los desprendimientos que se producen en la zona están condicionados por la disposición estructural de los materiales, por lo que aparecen asociados a las barras calizas de Vallcebre, El Boixader, etc.

Por lo general las cicatrices en el terreno provocadas por deslizamientos desprotege al mismo de la erosión del agua por la pérdida de la formación superficial y la cobertura vegetal existente. Por este motivo, la generación de movimientos favorece el desarrollo de las cárcavas al hacer que el terreno sea vulnerable a las incisiones de la escorrentía superficial.

Análisis detallados de la geomorfología de la zona pueden encontrarse en los estudios realizados por Clotet (1984); Gallart & Clotet (1983); Balasch (1986).

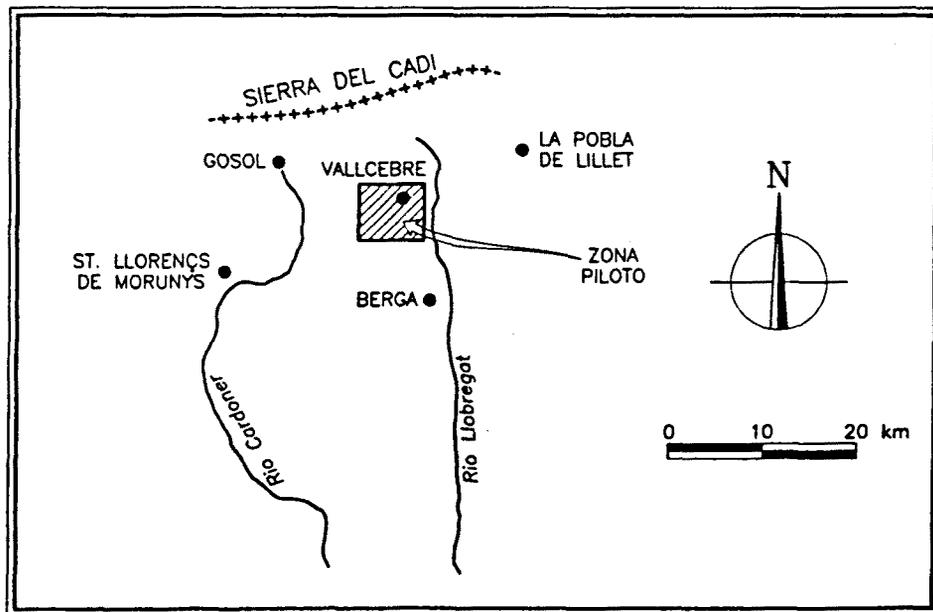


Figura 8.1. Situación geográfica del área piloto.

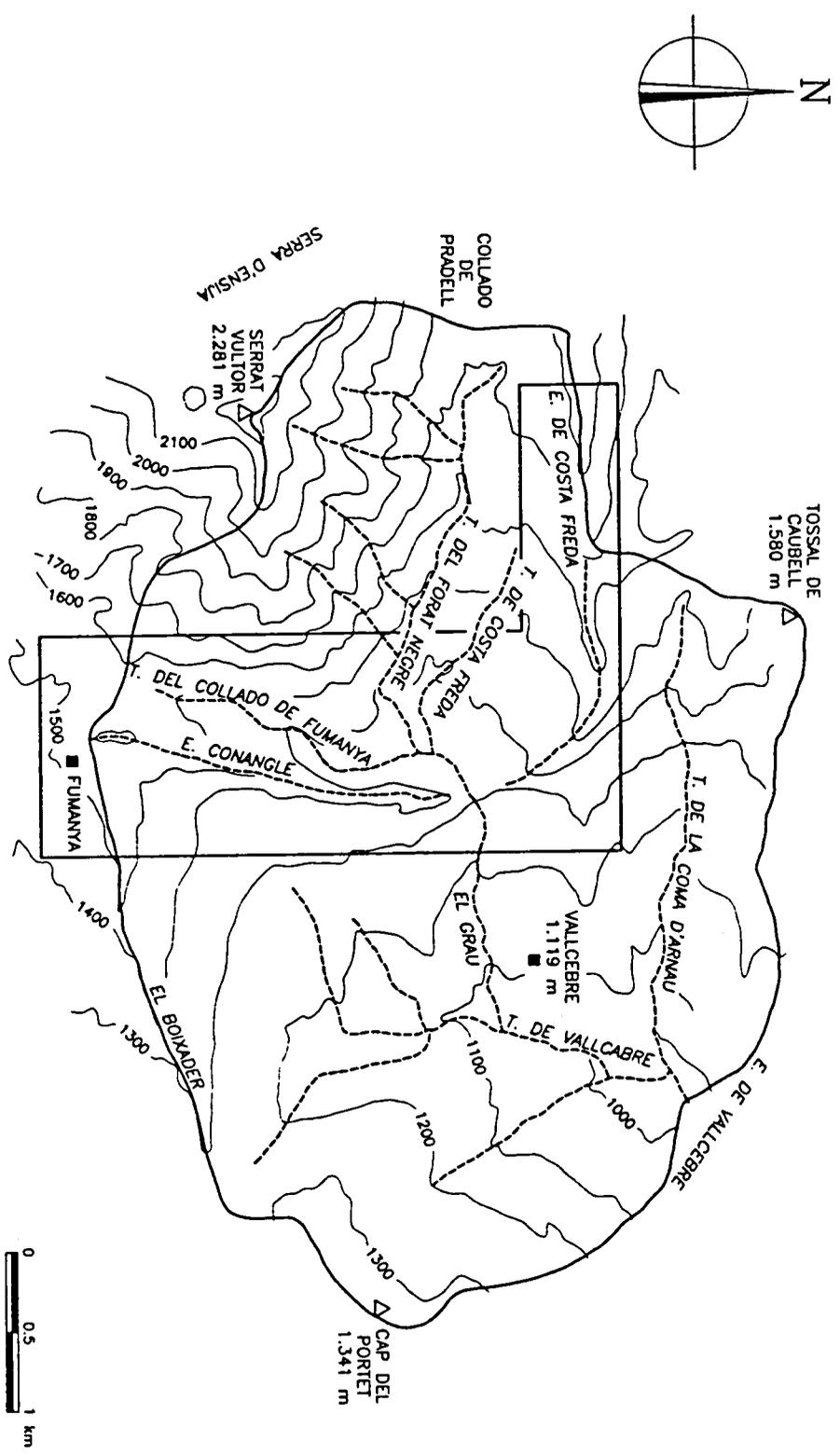


Figura 8.2. Límites del área piloto en la Cuenca de Vallcebre.

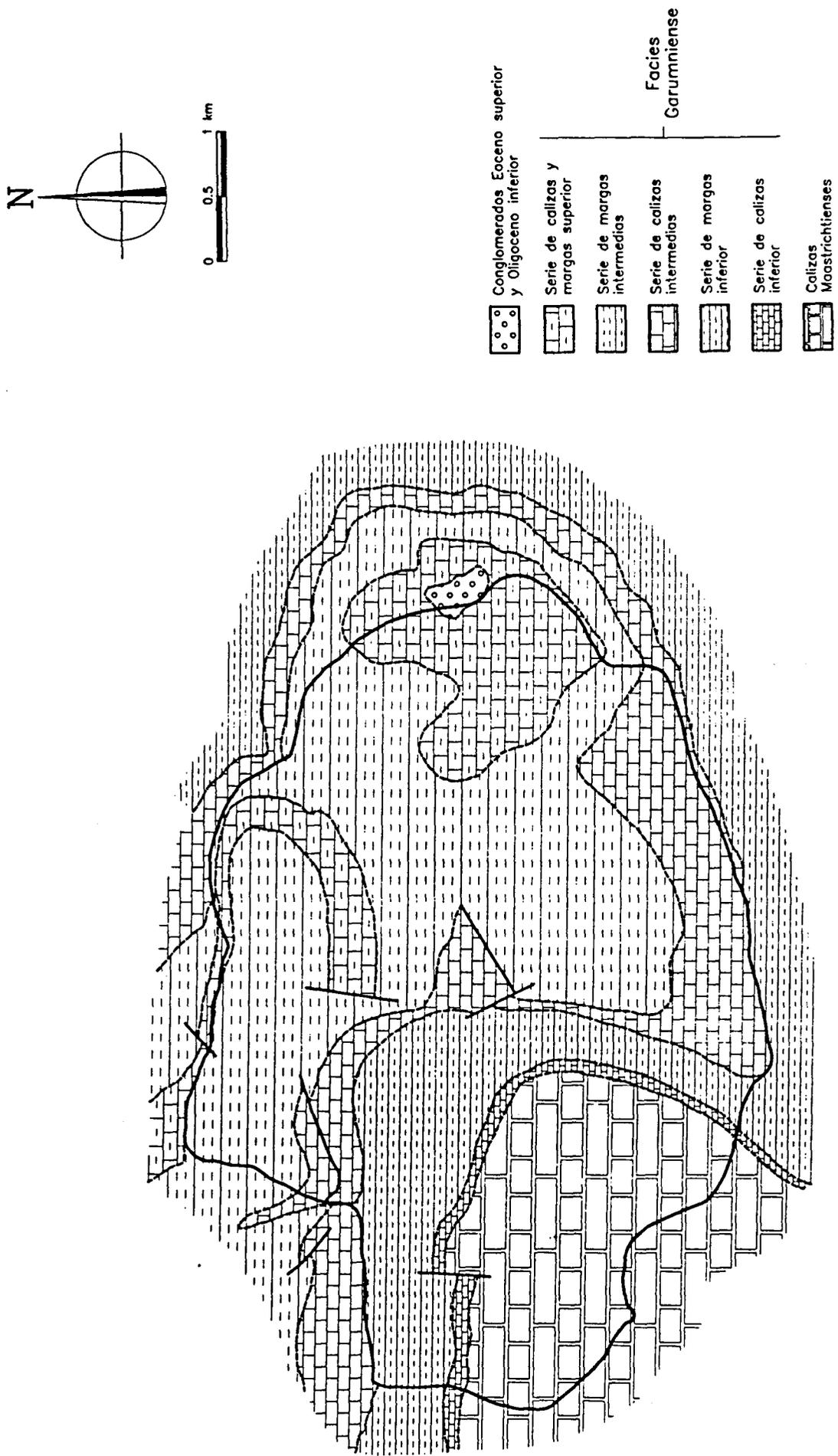


Figura 8.3. Esquema geológico de la Cuenca de Vallcebre (Balasch, 1986).

8.2. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD.

El concepto de "susceptibilidad" que aquí se utiliza, explica la ocurrencia de deslizamiento de una zona en términos de probabilidad relativa. Cuando se delimitan áreas que presentan la misma probabilidad relativa frente a este tipo de fenómenos se obtiene los llamados "mapas de susceptibilidad". Estos mapas pueden confeccionarse de forma sencilla a partir del análisis de la influencia que un factor litológico, topográfico, geomorfológico, etc., que caracteriza el terreno, ejerce sobre la estabilidad del mismo, o ser más complejos y derivarse de procesos matemáticos que consideran el efecto simultáneo de numerosos factores. Aunque este tipo de mapas no son un indicador absoluto de las condiciones de estabilidad, son extremadamente útiles como base para una planificación territorial y deben ser considerados en cualquier caso, como una herramienta que suministra información general sobre la estabilidad regional permitiendo, en el caso de tener un carácter preliminar, detectar aquellas zonas que por su nivel de peligrosidad o de vulnerabilidad requieren una investigación más detallada de acuerdo con la naturaleza del proyecto.

Considerando los objetivos que persigue la Tesis, en este capítulo no se abordan las posibles aplicaciones que puedan derivarse del mapa de susceptibilidad que aquí se expone. La elaboración de este mapa ha tenido como principales objetivos:

- conocer la fiabilidad de las predicciones obtenidas de las funciones discriminantes y así,
- validar la metodología general que se ha empleado para evaluar las condiciones de estabilidad y detectar áreas potencialmente inestables.

8.2.1. Bases del método predictivo.

Las técnicas estadísticas multivariantes, expuestas en el Capítulo 6, han permitido evaluar la influencia de diferentes factores en la inestabilidad y ocurrencia de deslizamientos superficiales. Tras la determinación de la contribución relativa de estos factores, se han definido unas funciones discriminantes con las que se puede valorar la susceptibilidad de deslizamiento del terreno. Estas funciones pueden ser utilizadas como herramienta de predicción para conocer las condiciones de estabilidad y su probabilidad relativa frente la rotura, dadas unas características geológico-geomorfológicas concretas. Dada su capacidad predictiva, las funciones pueden ser utilizadas para confeccionar mapas que reflejen diferente probabilidad relativa, es decir, niveles de susceptibilidad.

La metodología utilizada para la estimación cuantificada de la susceptibilidad se basa en un modelo conceptual bien conocido, el denominado **principio del actualismo**, que aplicado

a la problemática que aquí se estudia, implica que los deslizamientos que se produzcan en un futuro, tendrán lugar bajo las mismas condiciones que los ocurridos en el pasado y presente (Varnes, 1984).

La función discriminante seleccionada se aplica siguiendo este principio, de manera que la detección de áreas potencialmente inestables se realiza a partir de la caracterización previa de las condiciones de estabilidad en la región. Las condiciones límite, definidas por la función, serán las que finalmente determinen la susceptibilidad del terreno. Los valores que definen estas condiciones límite se expresan a través de los índices discriminantes, los cuales reflejan una combinación más o menos desfavorable de un conjunto de factores respecto a la estabilidad.

Este método, implica así, la identificación de estas condiciones y la evaluación de su contribución relativa en la formación de movimientos de masa, antes de poder ser aplicado a nivel predictivo. Por ello, tal y como ya se ha comentado en el Capítulo 6, las funciones discriminantes seleccionadas para el análisis de estabilidad de una zona concreta, no son transferibles a ninguna otra región, a no ser que ambas se caractericen por tener las mismas condiciones morfológicas, litológicas, pluviométricas, etc., lo cual es poco probable.

8.2.2. Aplicación del método de predicción.

El análisis de estabilidad del área considerada, requiere un procedimiento general en el que se integran diferentes operaciones: adquisición, proceso y análisis de los datos.

La adquisición de datos corresponde a las características morfológicas, de vegetación, cuenca, etc., que representan los factores geológico-geomorfológicos identificados en la primera etapa de investigación (capítulo 6) y que definen la función discriminante que va a ser aplicada en el área piloto.

La etapa de procesamiento de datos corresponde a la aplicación de la función de predicción seleccionada. Tras esta operación se obtienen unos valores estimativos de la contribución relativa del conjunto de factores que integran la función y que permite determinar las condiciones de estabilidad del área considerada.

El análisis de los datos obtenida durante la etapa de procesado, permite definir los grados de susceptibilidad mediante los cuales se confecciona el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de la zona.

A continuación se describe la metodología de trabajo seguida para la elaboración final de este tipo de cartografía indirecta.

8.2.2.1. Adquisición de datos.

Una de las características comunes de todos los factores geológico-geomorfológicos que han sido estudiados para la evaluación de la susceptibilidad, es su variabilidad espacial. La correcta medición y cartografía de éstos debe realizarse mediante la utilización de métodos que permitan la asignación de valores de los parámetros a unidades del terreno, de manera objetiva y sistemática. Uno de los métodos más utilizados para el muestreo, que facilita el análisis y posterior representación cartográfica de unidades geohomogéneas, es el uso de una malla de zonificación o parcelación del terreno. Cada unidad del terreno se caracteriza por un conjunto de factores representados por diversas variables que hacen que se diferencien o no, según los valores de los factores considerados, de la unidad adyacente.

La utilización de un malla regular, sin consideración previa de ningún factor que determine su topología (por ejemplo, la malla poligonal considerando pendientes uniformes o cualquier condición de contorno homogénea), simplifica sustancialmente la adquisición de datos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta sus limitaciones, puesto que la definición de una malla geométrica siempre conlleva una pérdida de información que se deriva de la ausencia de los cambios naturales que el terreno pueda tener por parte de alguno de los factores. Esto debe contrarrestarse con una escala de trabajo y consiguiente tamaño de unidad de malla suficientemente pequeño para que los valores de cada área sean aproximadamente constantes.

Para conocer las condiciones de estabilidad de la zona, el área piloto se ha subdividido de este modo en parcelas regulares que han servido de unidad de trabajo y de las cuales se ha extraído la información cuantitativa y cualitativa necesaria para la aplicación del método. Considerando las limitaciones antes expuestas y con el objetivo de conseguir una buena precisión del mapa final, se ha definido una malla con una superficie de celda de 50m x 50m, cuyas dimensiones están condicionadas por la escala del mapa topográfico (1:10.000) disponible de la zona de estudio. Los datos que se obtienen de cada unidad del mapa son representativos de un área del terreno que corresponde a la superficie de la celda y por consiguiente difícilmente comparables, sobre todo aquellos de tipo cuantitativo, con los valores medidos en el campo.

Previamente a la adquisición del conjunto de datos que caracterizan cada una de las celdas de la malla, es necesario definir la función discriminante que se ha utilizado para la predicción. La selección de la función se ha realizado considerando:

- la información y contribución relativa aportada por las diversas variables respecto de la estabilidad y,

- la dificultad en la obtención y representación cartográfica posterior de las variables de la función.

Siguiendo el criterio de maximizar la relación información aportada/coste de obtención y representación, se ha seleccionado la combinación de variables que forman la función discriminante siguiente (Fig. 8.4):

$$F_{disc} = 1.364961ccon + 0.12545tanig - 0.09752tusr - 0.02462tancg - 0.30808trel - 6.55537 \quad (11)$$

siendo, $lccon = \lg_{10}(ccon + 15)$

La función está representada por 5 de las variables de mayor influencia en el comportamiento inestable de la ladera. Dicha función es semejante a la función (7) descrita en el Capítulo 6, de la que se ha excluido la variable $lgrfs$. El elevado coste de tiempo que se requiere para la medición de este parámetro (grosor de la formación superficial), ha impedido que fuese integrado en la función. Utilizando el mismo criterio, ha sido seleccionada la variable $tusr$ en representación de la cobertera vegetal.

Tras conocer las variables que componen la función de aplicación, se procede a la adquisición de los cinco atributos mencionados (pendiente natural, área cuenca, tipo de cobertera, pendiente a la cresta y perfil transversal) que han de caracterizar conjuntamente cada celda del área de estudio. Paralelamente a la medición de estos factores, se han realizado 5 mapas temáticos representados por diferentes intervalos de las variables cuantitativas $tanig$ (MT.1), $ccon$ (MT.2), $tancg$ (MT.5) y cualitativas $tusr$ (MT.3) y $trel$ (MT.4), que permiten ver la influencia individualizada de cada factor según la distribución de sus valores en el área piloto (ver anejo III). Los intervalos de las variables cuantitativas se han tomado de la función de distribución de cada una (para $ccon$ se ha tomado la función de transformación de la variable original), seleccionando aquellos que mejor reflejaban cambios significativos en la distribución. Para la definición de los intervalos no se han considerado parámetros estadísticos tales como la media o la moda. Para una mejor visualización de la influencia que tienen los valores de la variable respecto a la estabilidad, se ha determinado una gama de colores semejante para cada mapa, que indica las condiciones que, de más a menos, favorecen la estabilidad (azul-verde-amarillo-rojo-marrón).

La obtención de los valores de los cinco atributos considerados, se ha realizado sobre una base topográfica 1:10.000 con el análisis simultáneo de los fotogramas aéreos correspondientes a los vuelos siguientes: 1:15.000 de Octubre 1980 (P-7) y 1:22.000 de Junio de 1983 (P-7),

mediante los cuales se ha hecho una identificación preliminar de las áreas problemáticas afectadas por deslizamientos.

----- DISCRIMINANT ANALYSIS -----

VARIABLE	TOLERANCE	F TO REMOVE
LCCON	0.8450749	81.193
TANIG	0.7967451	116.60
TUSR	0.9446559	21.443
TANCG	0.7968752	5.7098
TREL	0.9901188	8.2072

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS

EIGENVALUE	PERCE OF VARIANCE	CUMUL PERCENT	CANONICAL CORRELATION	: AFTER FUNCT	WILKS' LAMBDA	CHISQ.	D.F.	SIGNIF.
0.96229	100.00	100.00	0.7002798	: 0	0.5096	185.04	5	0.0000

STANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

LCCON	0.74374
TANIG	0.87521
TUSR	-0.39649
TANCG	-0.22896
TREL	-0.24517

UNSTANDARDIZED CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTION COEFFICIENTS

LCCON	1.364959
TANIG	0.1254543
TUSR	-0.9752306E-01
TANCG	-0.2462397E-01
TREL	-0.3080808
(CONSTANT)	-6.555367

CANONICAL DISCRIMINANT FUNCTIONS EVALUATED AT GROUP MEANS (GROUP CENTROIDS)

GROUP	FUNC
0	-0.97395
1	0.98095

Figura 8.4. Resultados del análisis discriminante -función (11)- para la separación de laderas estables e inestables.

8.2.2.2. Proceso de datos.

La estimación cuantificada de las condiciones de estabilidad del terreno y su consecuente potencialidad de rotura, se evalúa mediante la función discriminante. El valor de la función es, de este modo, asimilable a la probabilidad relativa de que se produzca deslizamiento.

El elevado número de celdas que componen el área de estudio, cada una de las cuales va a tener un valor discriminante, ha aconsejado el desarrollo y puesta a punto de un programa en Fortran que optimiza la aplicación de la función. Dicho programa se aplica sobre un archivo de datos que contiene toda la información que caracteriza cada celda de la malla. El resultado de la aplicación es un valor de la función asociado a cada celda. Estos valores han permitido posteriormente confeccionar tras la definición de unos intervalos, el mapa de susceptibilidad de la zona.

8.2.2.3. Análisis de los datos.

El método de análisis empleado para la identificación de las áreas con diferente potencialidad de deslizamiento y la confección final del mapa de susceptibilidad de la zona, se basa en:

- a. La aplicación de la función discriminante en el área piloto.
- b. La validación de la función discriminante.
- c. El ajuste de la función, si ésta lo requiere.
- d. La definición de los niveles de susceptibilidad.
- e. La confección del mapa de susceptibilidad del área de estudio, mediante la aplicación de la función discriminante seleccionada.
- f. El análisis del mapa de susceptibilidad.

A. Aplicación de la función discriminante.

El conjunto de variables seleccionado por la función, ha sido utilizado en la zona piloto para definir áreas con semejante potencialidad de rotura, siguiendo el concepto de

superposición e integración espacial de información. La información que se ha utilizado de forma conjunta, la constituyen las variables de la función seleccionada, pero no con carácter equitativo sino con un parámetro constante que identifica su contribución en la definición de la estabilidad y que está representado por el coeficiente de cada una de ellas en la función.

Para analizar de esta forma la información y facilitar posteriormente la zonación espacial del área considerada, según unos grados o niveles de susceptibilidad, se ha creado como se ha explicado en el apartado 8.2.2.1., una malla de trabajo cuyas celdas se caracterizan por un conjunto de variables. Sobre la información que integra cada celda se ha aplicado la función discriminante (11) seleccionada (los criterios de selección han sido comentados en el apartado 8.2.2.1.) que se define por los siguientes parámetros estandarizados:

$$F_{st} = 0.743741ccon + 0.87521tanig - 0.39649tusr - 0.22896tancg - 0.24517trel \quad (12)$$

El histograma de frecuencias y clasificación (con índice $F_{dic}=-0.3$) de la función discriminante de las poblaciones estables e inestable de la muestra original con la que se ha definido ésta, se presenta en la figura 8.5.

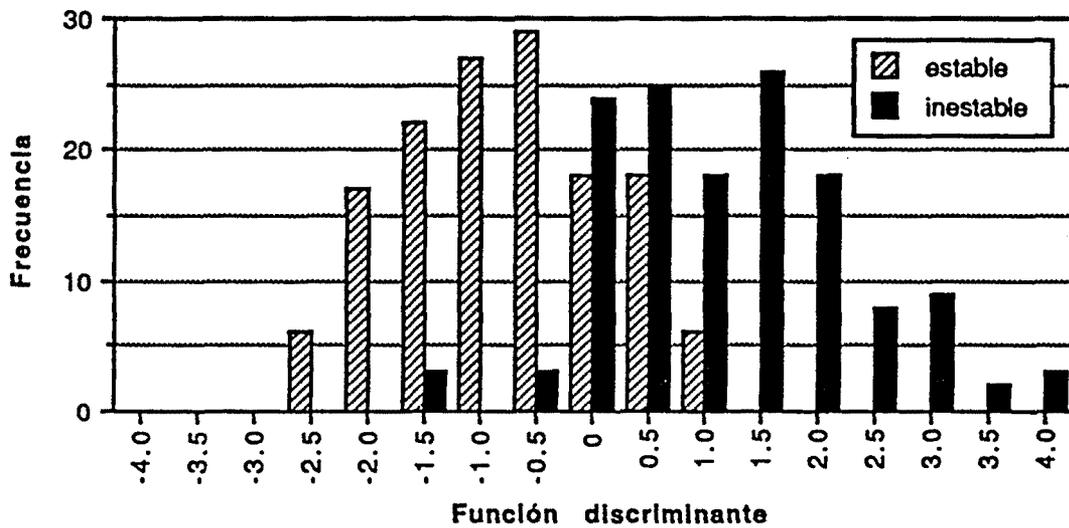
La distribución de valores discriminantes que se obtiene de la aplicación de la función sobre la malla de trabajo, se muestra en la figura 8.6.

B. Validación de la función.

Para comprobar la validez de la función en el área piloto, se han contrastado los resultados obtenidos de la aplicación con los deslizamientos en la zona. Simplificando los niveles de susceptibilidad en tan solo áreas estable e inestables mediante el índice discriminante, se puede verificar la función analizando los valores de F_{disc} que indican condiciones inestables y comprobando si estas corresponden a unidades del terreno donde se ha producido algún deslizamiento.

Para llevar a cabo la validación, se ha realizado un mapa de localización de movimientos (MT.8 en anejo III) a la misma escala que los restantes mapas temáticos. Este ha permitido, mediante la superposición de la malla de trabajo, identificar aquellas celdas en las que aparece algún deslizamiento. Tras contrastar las celdas que tienen valores de $F > -0.3$ (siendo éste el índice discriminante de las poblaciones estables e inestables) que indicarían inestabilidad, con las celdas en las que hay deslizamientos (con un total de 55 movimientos

inventariados), se ha dado una correspondencia del 87.3%. El 12.7% restante corresponde a unidades del terreno en las que se han observado deslizamientos y la función discriminante ha identificado como áreas estables. El hecho de que el porcentaje de error en la clasificación sea tan elevado, en el área piloto, cuando la función original de la que parte el análisis solo establecía un 5% de error para las zonas inestables, ha obligado a redefinir la función, de manera que ésta se ajuste mejor al comportamiento de las condiciones de estabilidad observado en la zona.



CLASSIFICATION RESULTS -

ACTUAL GROUP	NO. OF CASES	PREDICTED GROUP MEMBERSHIP	
		0	1
GROUP estable	140	104 74.3%	36 25.7%
GROUP inestable	139	7 5.0%	132 95.0%

PERCENT OF "GROUPED" CASES CORRECTLY CLASSIFIED: 84.65%

Figura 8.5. Histograma de frecuencias y clasificación (F=-0.3) de la función discriminante (11) de la muestra original.

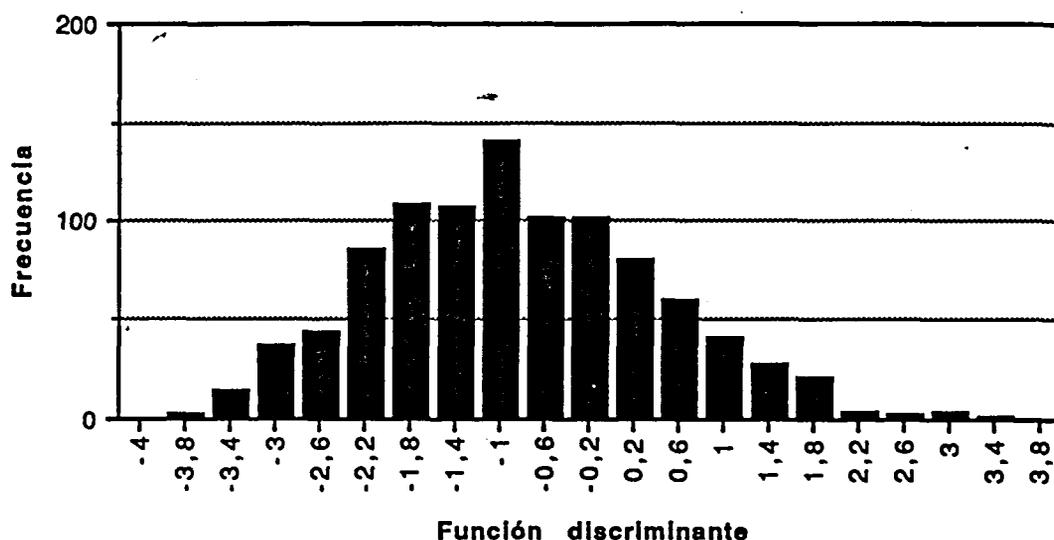


Figura 8.6. Histograma de frecuencias de los valores discriminantes obtenidos de la aplicación de la función 11 a cada una de las celdas del mapa.

C. Ajuste de la función.

Los resultados de clasificación de la función aplicada (11) (12) indican una baja efectividad de ésta a la hora de determinar las condiciones de estabilidad. Mejorar la efectividad de la función significa mejorar los resultados de clasificación, siendo necesario para ello ajustar la función mediante la transformación de las variables que la definen. La transformación de las variables de la función debe realizarse de tal modo que reflejen la forma en que actúan estos factores del terreno respecto a la estabilidad en la zona de estudio considerada.

Una vez realizadas las transformaciones de la(s) variable(s), se debe redefinir la función determinando los parámetros o coeficientes de cada variable. La nueva función discriminante tiene que ser de nuevo validada.

La distribución de las áreas con clasificación estable/inestable que se ha obtenido de la aplicación de la función inicial (11) (12) a cada celda del mapa, muestra que un cierto número de deslizamientos inventariados en la zona aparecen como estables en la función, definiendo áreas inestables a aquellas, que sin haber presencia de deslizamientos, se caracterizan por tener pendientes elevadas.

La clasificación de estable/inestable del terreno que define la función, está muy condicionada por el peso de la variable *tanig* (ángulo de la pendiente natural). El comportamiento que expresa esta variable va a controlar los resultados de clasificación que se deriven de la función. La variable *tanig*, tal como se define en la función, tiene un comportamiento lineal creciente, favoreciendo las condiciones de inestabilidad cuanto mayor es el valor del ángulo de la pendiente. Este no es el comportamiento que se observa en la zona de estudio, donde los deslizamientos aparecen en pendientes intermedias (~35°), mostrando condiciones de mayor estabilidad por encima y debajo de dichas pendientes.

Las condiciones de estabilidad que se observan en la zona están en parte controladas por las diferentes litologías presentes. La figura 8.3, donde se muestra un esquema de la geología de la cuenca, puede ayudar a explicar el comportamiento observado. Las zonas que muestran deslizamientos corresponden a los niveles de margas de la facies garumniense y depósitos de la formación superficial cuaternaria. Ambas formaciones inestables contrastan con los niveles de calizas inferiores e intermedias garumnienses más resistentes que muestran unas condiciones de mayor estabilidad en la zona.

En las zonas del mapa que corresponden a los bancos calizos de Conangle y Costa Freda del área piloto con pendientes superiores a los 45°-50°, no aparecen deslizamientos, mientras sí se ven afectadas las zonas con pendientes inferiores que caracterizan los niveles margosos. Esto indica que en la zona la litología es uno de los factores que, por sus características mecánicas y estructurales, condiciona fuertemente la estabilidad. Si la diferencia de litologías pudiese, controla en parte el comportamiento estable/inestable del terreno, es lógico esperar que la función discriminante seleccionada no refleje correctamente dichas condiciones, no siendo posible en tal caso predecir con una buena aproximación la susceptibilidad. La función aplicada no incorpora la diversidad litológica como factor discriminante, puesto que había sido definida para una litología homogénea, fundamentalmente lutítica (que forman las unidades litoestratigráficas estudiadas en el apartado 3.3), por lo que de forma indirecta las características de ésta quedan incorporadas en la misma función a través de los restantes factores (pendientes, cuenca vertiente, vegetación, etc...).

Para adaptar la función y generalizar su aplicación a las condiciones de estabilidad de la zona piloto, se ha determinado modificar la variable con mayor peso en la función (*tanig*) aplicando una función de transformación que refleje la conducta del ángulo de la pendiente natural en la zona de rotura, es decir, mayor estabilidad cuando las pendientes son muy elevadas (caracterizadas por los niveles calizos) o muy bajas y menor cuando tienen valores intermedios (caracterizadas por los niveles margosos).

La incorporación del factor litológico a la función discriminante hubiera sido posiblemente el proceder más correcto, sin embargo la poca variabilidad litológica de las laderas inventariadas, pues se recuerda que en el capítulo 6 únicamente se han analizado las

condiciones de rotura para formaciones susceptibles de producir deslizamientos no desprendimientos, ha contribuido a su exclusión reiteradas veces de las funciones analizadas en el capítulo 6. Esto ha determinado, finalmente utilizar el procedimiento de ajuste de la función a partir de la transformación de sus variables, de forma que se refleje el comportamiento inestable de la zona.

Se han analizado diversas funciones de transformación de la variable $\tan \alpha$, alguna de ellas ya utilizadas en la literatura por algunos autores (Jones, 1961). En todos los casos, la transformación realizada $\tan \alpha$ ¹ resalta los valores medios (30°-35°) sobre los valores extremos de la variable pendiente natural, de tal modo que al analizar estos valores mediante la función discriminante, se destacan mayores condiciones de estabilidad para valores extremos de la variable y menores para valores intermedios.

La tabla 8.1 muestra las diferentes transformaciones de la variable $\tan \alpha$ que han sido estudiadas y cuyos resultados se exponen a continuación.

Función de transformación	
F. senoidal (SN)	$\sin 2x$
F. hiperbólica (HP)	$\frac{2 \bar{x}}{\exp_{(e)} \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right) + \exp \left(- \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right)}$
F. cuadrática (CU) (Jones, 1961)	$\frac{(1 + I g_{10} x)^2}{10}$

Tabla 8.1. Funciones de transformación de la variable $\tan \alpha$. La variable $\tan \alpha$ (pendiente natural en zona de rotura) está representada en las diversas funciones por x .

¹. La transformación de la variable original $\tan \alpha$, estará definida a partir de ahora por una nueva variable $\tan \alpha$

Para conocer qué transformación de la variable *tanig* es la que explica mejor las condiciones de estabilidad del área de estudio, se ha llevado a cabo una segunda etapa de redefinición de la función discriminante. La aplicación del análisis discriminante sobre la muestra original del inventario de campo, ha permitido obtener una función para cada una de las variables transformadas *ltanig*.

La tabla 8.2 muestra los parámetros que definen cada variable, así como los resultados de clasificación mediante los cuales se ha comprobado la precisión de la función.

Variables	Coeficientes de la función					
	SN	SN _s	HP	HP _s	CU	CU _s
<i>ltanig</i>	7.469	0.890	0.046	0.381	16.894	0.884
<i>lcon</i>	1.331	0.725	1.467	0.799	1.348	0.736
<i>tusr</i>	-0.120	-0.488	-0.145	-0.588	-0.108	-0.437
<i>trel</i>	-0.324	-0.257	-0.425	-0.338	-0.312	-0.248
<i>tanig</i>	-0.030	-0.278	-	-	-0.028	-0.256
C	-8.499		-4.306		-12.797	
Clas. general (%)	83.51		75.05		84.09	
parcial (E/I)	80.0 / 87.1		76.0 / 74.1		84.0 / 84.2	

Tabla 8.2. Coeficientes y clasificación de las funciones discriminantes obtenidas a partir de la muestra original para las transformaciones aplicadas a la variable *tanig* (SN: senoidal; HP: hiperbólica; CU: cuadrática). El subíndice *s* indica los coeficientes estandarizados de la función. La clasificación parcial refleja la predicción de estables (E) e inestables (I).

Los resultados de la tabla evidencian el mal comportamiento de la función HP con transformación hiperbólica de la variable *tanig*, con un porcentaje de clasificación general muy inferior incluso al de la función original (11) (12). Esto se debe a la mala definición de *ltanig* en la función, donde los coeficientes que la caracterizan son extremadamente bajos, restando peso a dicha variable. De hecho estos resultados eran previsibles dada la poca significación de la variable *ltanig* (según HP) en la muestra (Tabla 8.3).

Tras la exclusión de esta función, se procede al estudio de las dos restantes SN y CU, las cuales muestran un comportamiento similar que se refleja tanto por los coeficientes de las variables como por los resultados de la clasificación general. Aunque ésta es algo mayor según la función CU, la clasificación parcial de la función SN refleja mejor el comportamiento

de la población inestable, siendo ésta la que interesa poder acotar y llegar a conocer mejor para la predicción espacial. Dada la diferencia tan poco significativa en la clasificación global, ambas se han aplicado a la zona piloto.

Tipo de ladera (estable/inestable)		
Variable	F	Prob. F ($\alpha = 0.01$)
ltanig (HP)	7.579	0.006
ltanig (CU)	60.892	0.000
ltanig (SN)	65.183	0.000

Tabla 8.3. Resultados del test Oneway (análisis de la varianza) para las diversas transformaciones de la variable tanig (HP: f. hiperbólica; CU: f. cuadrática y SN: f. senoidal).

La aplicación de las funciones CU y SN a las celdas de la malla del área piloto, mediante la puesta a punto de un programa desarrollado en fortram que permite la selección del tipo de función y la consiguiente obtención de los valores adscritos a cada celda, ha permitido de nuevo validar y conocer el ajuste de ambas funciones.

Seleccionando como índice discriminante de la función $F=-0.3$ que corresponde a un valor inferior al 5% de error de clasificación de la población inestable, los resultados de clasificación de la muestra original para CU y SN son los que se muestran en la tabla 8.4.

Clasificación (%)		
	Estable (CU/SN)	Inestable (CU/SN)
Estable (CU/SN)	74.0 / 70.0	26.0 / 30.0
Inestable (CU/SN)	5.0 / 3.6	95.0 / 96.4

Tabla 8.4. Resultados de clasificación (con índice discriminante $F=-0.3$) de las funciones obtenidas con la transformación senoidal (SN) y cuadrática (CU) de la variable tanig.

Tomando dicho valor de F como límite de separación de las poblaciones estable e inestable y según la distribución de los valores discriminantes que se obtienen de la aplicación de la función CU y SN a la zona piloto (Fig. 8.7 y 8.8), se ha comprobado el ajuste de ambas

funciones mediante la clasificación que se hace de las áreas deslizadas de la zona. La figura 8.9 muestra en porcentajes, el grado de ajuste de las funciones a través de la clasificación correcta/incorrecta de los deslizamientos observados en el área de estudio.

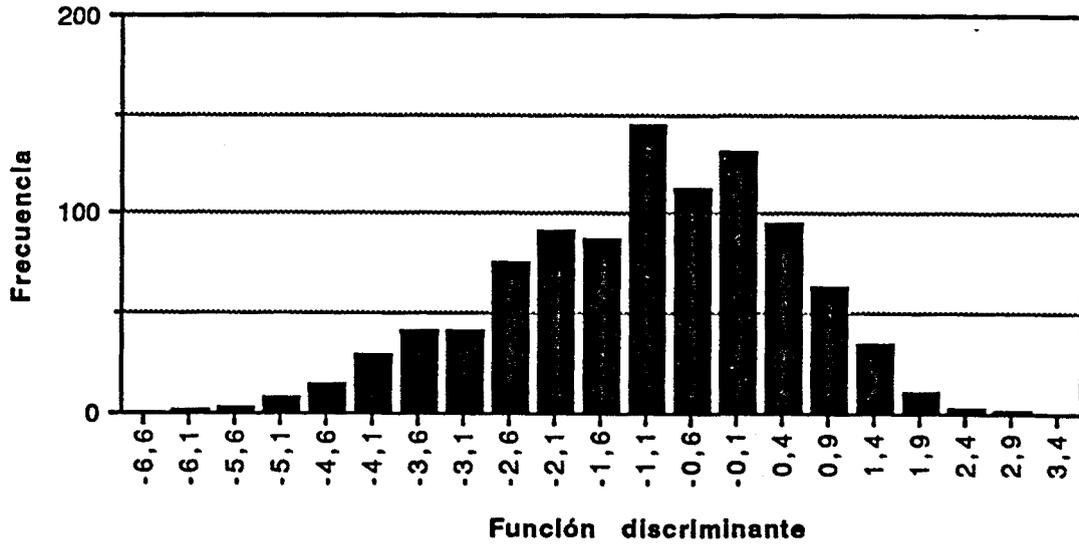


Figura 8.7. Histograma de frecuencias de los valores discriminantes obtenidos de la aplicación de la función CU a la zona piloto.

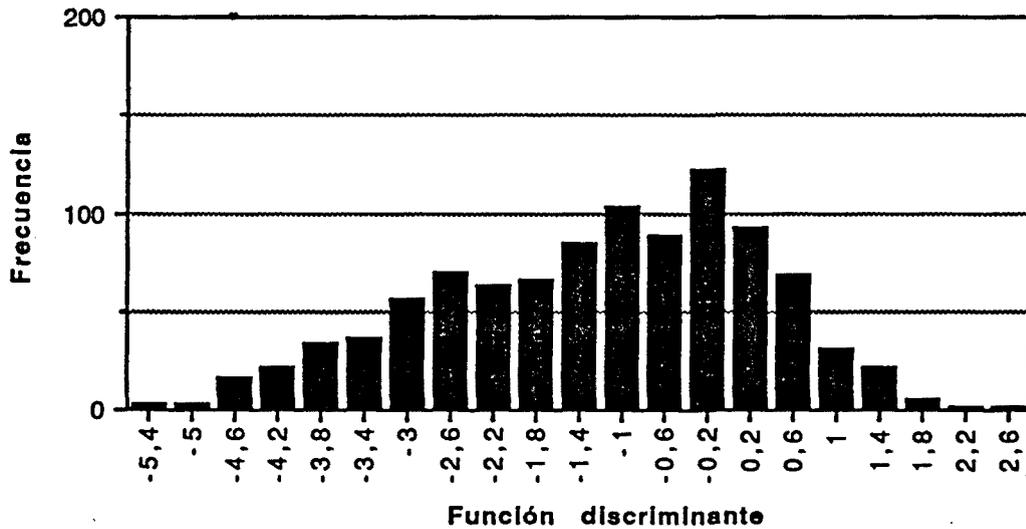


Figura 8.8. Histograma de frecuencias de los valores discriminantes obtenidos de la aplicación de la función SN a la zona piloto.

La figura incluye los resultados de clasificación de la función (11) (12) sin transformación de *tanig*. La gráfica pone de manifiesto, con un 96.4% de clasificación correcta, el buen ajuste de la función senoidal. Estos datos objetivizan el valor de predicción de esta función discriminante, que es de todas las transformaciones realizadas sobre la variable *tanig*, la que mejor refleja las condiciones de estabilidad que presenta la zona piloto.

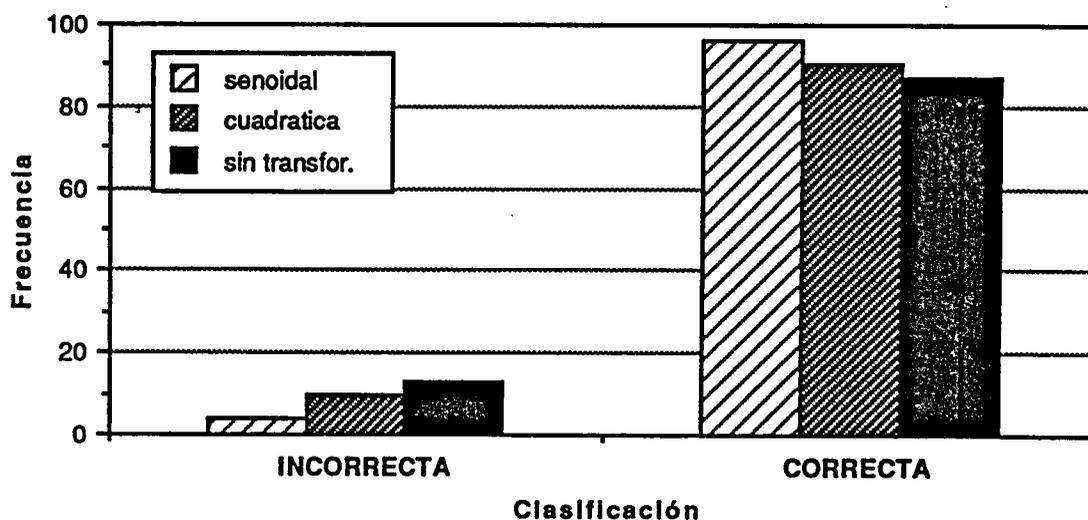


Figura 8.9. Histograma de frecuencias que refleja el grado de ajuste de cada función aplicada a la zona piloto. La función discriminante original (sin transformación de *tanig*) ha mostrado una predicción del 87.3%, la función cuadrática un 90.0%, alcanzando un 96.4% la función de transformación senoidal.

D. Definición de los niveles de susceptibilidad.

La característica destacable de los mapas de susceptibilidad de deslizamientos es la división espacial del terreno en áreas con diferentes niveles de potencialidad del fenómeno. Esta zonación tiene una gran aplicabilidad posterior, pudiendo ser utilizada para la planificación territorial así como para proyectos de ingeniería.

Lo más importante del mapa de susceptibilidad son los límites que definen las zonas. Los criterios que se utilizan para establecer dichos límites son en muchos casos poco objetivos. La determinación que aquí se ha hecho de estos límites, se basa en el análisis de los valores que se obtienen de la función discriminante. Para definir los límites se parte del denominado valor crítico de la función, sobre el cual el valor discriminante refleja condiciones inestables. Este valor crítico está expresado por la función discriminante como aquel que separa, a un

determinado nivel de confianza, las poblaciones estable de las inestables donde se han producido deslizamientos. Pero a menudo no es suficiente la subdivisión del terreno en tan sólo dos grados, por lo que frecuentemente este tipo de mapas se confeccionan tras la definición de cuatro o más niveles de susceptibilidad (Brabb, 1972; Carrara, 1984a,b; Bonnard & Noverraz, 1984; Kawakami et al., 1984; Yin & Yan, 1988; Chacon et al., 1992). La zonación representada por los distintos niveles expresa la probabilidad relativa de que se produzca un deslizamiento. Esta probabilidad se expresa a su vez mediante intervalos definidos por dos valores de la función que caracterizan un conjunto de muestras, de entre las cuales hay un número determinado de áreas estables y deslizamientos, según la distribución de los valores de la función. Ha sido el número de deslizamientos del intervalo respecto del total de ellos el que ha indicado dicha probabilidad relativa, explicando de este modo la potencialidad del fenómeno en la zona.

A continuación se ha hecho un análisis comparativo de las distintas funciones estudiadas hasta ahora (CU/SN/ST²), determinando los niveles de susceptibilidad para cada una y contrastando los resultados, con el objetivo de confirmar con nuevas aportaciones la validez de la función senoidal.

Tras la selección de un mismo valor crítico ($F=-0.3$) para las funciones discriminantes estudiadas, que corresponde al índice de separación con un error de clasificación inferior al 5%, se han definido varios niveles de susceptibilidad a partir de la distribución de los valores discriminantes. Los diferentes niveles de susceptibilidad se han establecido siguiendo unos criterios basados en el porcentaje de deslizamientos respecto el total de muestras (población estable e inestable), de tal forma que equivalga a una probabilidad de deslizamiento según el valor de la función. Los diferentes niveles corresponden a intervalos de la función, siendo de menor a mayor grado de susceptibilidad: I- ausencia de deslizamientos; II- incluye un 10% de deslizamientos; III- incluye un 30%; IV- incluye un 70% y V- incluye un 100%. Debido a que la distribución de frecuencias de los valores de las tres funciones no es simétrica y para mantener en todas ellas el mismo porcentaje en cada intervalo, los valores de la función que comprenden es variable. Por consiguiente, los límites marcados por la función para cada nivel no están definidos por el mismo valor en todas las funciones. Esto es debido a que la distribución de frecuencias de valores no es la misma para las funciones SN, ST y CU.

Una vez definidos los niveles de susceptibilidad mediante las funciones originales y tras la aplicación de CU, SN y ST a la malla de trabajo, se ha realizado la subdivisión de los valores que se obtienen de las celdas de cada una de las funciones según dichos niveles. La tabla 8.5 muestran los resultados contrastados de las tres funciones. Los niveles de susceptibilidad corresponden a: I. Nulo; II. Bajo; III. Moderado; IV. Alto y V. Muy alto.

². ST son las siglas que serán utilizadas a partir de ahora en el texto al hablar de la función discriminante original, sin transformación de la variable $\tan\alpha$.

Niveles de Susceptibilidad	% deslizamientos (n)			% celdas (N)			(n/N) / Σ (n/N) \times 100		
	ST	CU	SN	ST	CU	SN	ST	CU	SN
I	0.0	0.0	0.0	24.5	33.3	33.8	0.00	0.00	0.00
II	3.6	0.0	0.0	30.0	19.2	19.3	1.68	0.00	0.00
III	27.3	32.7	27.3	20.7	25.3	27.0	17.75	14.85	8.33
IV	40.0	42.3	61.8	16.3	18.1	18.6	32.61	29.90	27.68
V	29.0	20.0	10.9	8.1	4.1	1.4	47.96	55.26	63.99
$n_{total} = 55$ $N_{total} = 986$									

Tabla 8.5: Datos relativos a los cinco niveles de susceptibilidad obtenidos de la aplicación de la función original (ST), cuadrática (CU) y senoidal (SN) a la zona piloto. Las últimas tres columnas reflejan el grado de ajuste de las funciones. El valor de $(n/N)/\Sigma(n/N) \times 100$ está calculado con el número de deslizamientos y celdas, no con sus porcentajes.

Las tres primeras columnas de la tabla 8.5, expresan en porcentaje, el número de deslizamientos observados que se encuentran en los distintos niveles de susceptibilidad según los valores discriminantes obtenidos de cada función. Las tres columnas siguientes indican el número total de celdas que han sido clasificadas con un determinado nivel de susceptibilidad según la función, también expresado en porcentaje. Los resultados que se muestran en las siguientes columnas de la tabla, son los que mejor definen el grado de ajuste de la función. Estos reflejan, mediante el cociente entre la relación N_d/N_c (n° deslizamientos/ n° de celdas) de un nivel determinado y el sumatorio $\Sigma N_d/N_c$ de todos los niveles de susceptibilidad multiplicado por 100, la distribución relativa de los deslizamientos. La clasificación de los deslizamientos en los distintos niveles, que se obtienen de cada función discriminante, indica si ésta es o no eficaz a la hora de reproducir las condiciones de estabilidad de la zona a través de los factores que la representan. Así, es evidente que la función no reflejará bien el comportamiento inestable cuando los deslizamientos se clasifiquen en niveles I y II caracterizados por la ausencia y un bajo porcentaje de deslizamientos respectivamente, aproximándose más a lo observado cuando haya un incremento de la clasificación hacia niveles superiores de susceptibilidad (III, IV y V). Para visualizar mejor dichos resultados se ha realizado una gráfica donde se observan los valores contrastados de la clasificación entre las tres funciones (Fig. 8.10).

El valor crítico o índice discriminante seleccionado de $F=-0.3$ ha establecido el límite de las poblaciones estable e inestable a un nivel de significación diferente según la función. Los niveles que se han definido en CU, SN y ST toman valores de $F<-0.3$ en I y II; $F\approx-0.3$ en III y $F>-0.3$ para IV y V. Es decir, los niveles III (con valores $F>-0.3$), IV y V corresponden a valores que caracterizan la población inestable, siendo I, II y III (con valores de $F<-0.3$) valores que caracterizan la población estable.

Según lo expuesto, la función aplicada podrá considerarse válida si los deslizamientos observados se sitúan en celdas definidas por valores discriminantes superiores a -0.3 y clasificados en los niveles o categorías III ($F>-0.3$), IV y V. Cuanto mayor sea el número de deslizamientos observados que se sitúen en celdas con categoría V mejor será el ajuste de la función.

Si se observan detenidamente las últimas tres columnas de la tabla 8.5, se aprecia comparativamente un mejor ajuste de CU y SN respecto de ST. Esta última función clasifica un 1.65% de deslizamientos en la categoría II y un 11.02% en la III con $F<-0.3$; la función cuadrática CU, clasifica un 10.0% de deslizamientos observados en la categoría III (con $F<-0.3$) correspondiente a la población estable; evidenciando claramente la buena correspondencia entre lo observado y lo establecido por la función senoidal SN, donde sólo un 3.6% de deslizamientos recaen en la categoría III (con $F<-0.3$), habiendo una correspondencia del 96.4% que integra los clasificados en los niveles III con $F>-0.3$, el IV y V.

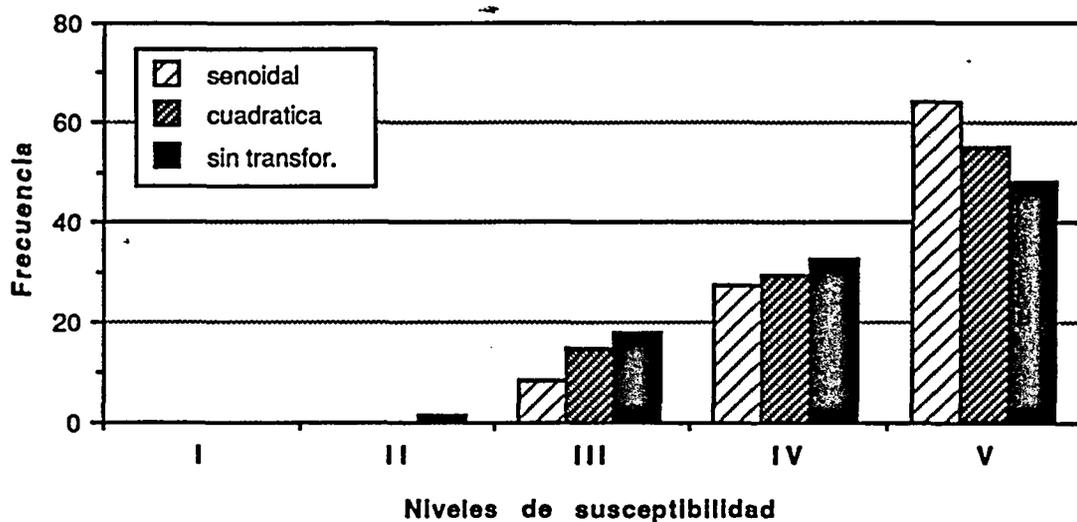


Figura 8.10. Distribución de los deslizamientos observados, en los cinco niveles de susceptibilidad obtenidos de las funciones discriminantes. Obsérvese el mejor ajuste de la función senoidal.

E. Confección del mapa de susceptibilidad mediante la aplicación de la función discriminante seleccionada.

La confección del mapa de susceptibilidad se inicia con la adquisición de datos de la zona piloto y su representación sobre una malla cuadrada que ha facilitado, tras la definición de unos intervalos de la variable considerada, la creación de los mapas temáticos siguientes (ver anejo III):

- MT.1. Mapa de la variable $\tan \alpha$ (pendiente natural).
- MT.2. Mapa de la variable I_{con} (cuenca vertiente).
- MT.3. Mapa de la variable t_{usr} (recubrimiento de la ladera).
- MT.4. Mapa de la variable t_{rel} (perfil transversal).
- MT.5. Mapa de la variable $\tan \alpha_{cg}$ (pendiente a la cresta).

Tras la toma de datos, se ha llevado a cabo la etapa de almacenamiento y procesado de

éstos. El análisis de los datos, ha permitido validar la función original y contrastar diversas transformaciones de la variable tanig, seleccionando finalmente la función senoidal por tener un mejor ajuste.

Recordando la función senoidal (Tabla 8.2):

$$F_{disc} = 7.469(\sin 2\tanig) + 1.331\lg(ccon + 15) - 0.120(tusr) - 0.324(trel) - 0.030(tancg) - 8.499$$

Los niveles de susceptibilidad que se han definido son:

I	nula	$F < -1.8$
II	baja	$-1.8 \leq F < -0.9$
III	moderada	$-0.9 \leq F < 0.1$
IV	alta	$0.1 \leq F < 1.4$
V	muy alta	$F \geq 1.4$

La aplicación de la función senoidal a la malla cuadrada, da como resultado un valor discriminante que depende de la contribución de las variables que caracterizan cada celda. La distribución de frecuencias de los valores de la función de la malla han sido mostrados en la figura 8.8.

Una vez obtenidos los valores discriminantes, se ha clasificado cada celda según los niveles de susceptibilidad establecidos previamente.

Con los resultados del análisis se han confeccionado finalmente dos mapas (ver anejo III):

MT.6. Mapa de clasificación de áreas estables e inestables.

Corresponde a la subdivisión de las celdas según el valor crítico $F=-0.3$. Las celdas con un valor inferior al crítico, se consideran de susceptibilidad baja por tener una probabilidad relativa muy baja de producir rotura. Las celdas con un valor superior al crítico se consideran de susceptibilidad alta por tener una probabilidad relativa elevada de que pertenezcan a la población inestable y de este modo producir el deslizamiento (Fig. 8.11).

MT.7. Mapa de susceptibilidad frente deslizamiento.

Por ser la anterior una clasificación demasiado simple, se ha confeccionado este mapa utilizando los cinco niveles de susceptibilidad anteriormente establecidos (Fig. 8.12). Donde los niveles corresponden a:

Nivel de susceptibilidad nula	I	(0% deslizamientos)
Nivel de susceptibilidad baja	II	(10%)
Nivel de susceptibilidad moderada	III	(30%)
Nivel de susceptibilidad alta	IV	(70%)
Nivel de susceptibilidad muy alta	V	(100%)

La transcripción visual de la información representada en los mapas temáticos del 1 al 5 se ha realizado mediante color. El color es la forma más eficaz de representación gráfica cuando se tiene que diferenciar la información contenida en el mapa o cartografía según una categorización. La gama de colores utilizada quiere distinguir una jerarquización en la contribución de la variable representada. El orden de color azul, verde, amarillo, rojo y marrón indica de mayor a menor, la contribución de la variable en la estabilidad. Las variables cuantitativas diferencian cinco categorías, mientras que las cualitativas están representadas por tres o más según la definición de la variable.

Para reforzar la visualización del fenómeno, la representación gráfica de los mapas 6 y 7 se ha realizado mediante la utilización de color y trama. En estos mapas, donde se sintetizan los resultados obtenidos de todo el proceso analítico, se ha diferenciado siguiendo los mismos criterios de representación, las áreas con grados de susceptibilidad diferentes (MT.7). En el MT6 se ha diferenciado las áreas con valor de la función $F < -0.3$ en color verde (susceptibilidad baja) de las áreas con un valor de $F > -0.3$ en color rojo (susceptibilidad alta).

La densidad de la trama define, al igual que el color, un mayor grado de susceptibilidad. La trama se ha utilizado en los casos en los que no ha sido posible la representación en color.

Los cinco mapas temáticos que representan cada una de las variables que definen la función discriminante, han sido realizados manualmente al no disponer de la base topográfica digitalizada de la zona de aplicación y de programas informáticos que facilitarían su confección. Los mapas MT.6 y MT.7, donde se muestran los resultados finales obtenidos de la aplicación, han sido realizados excepcionalmente por ordenador mediante el programa CAD.

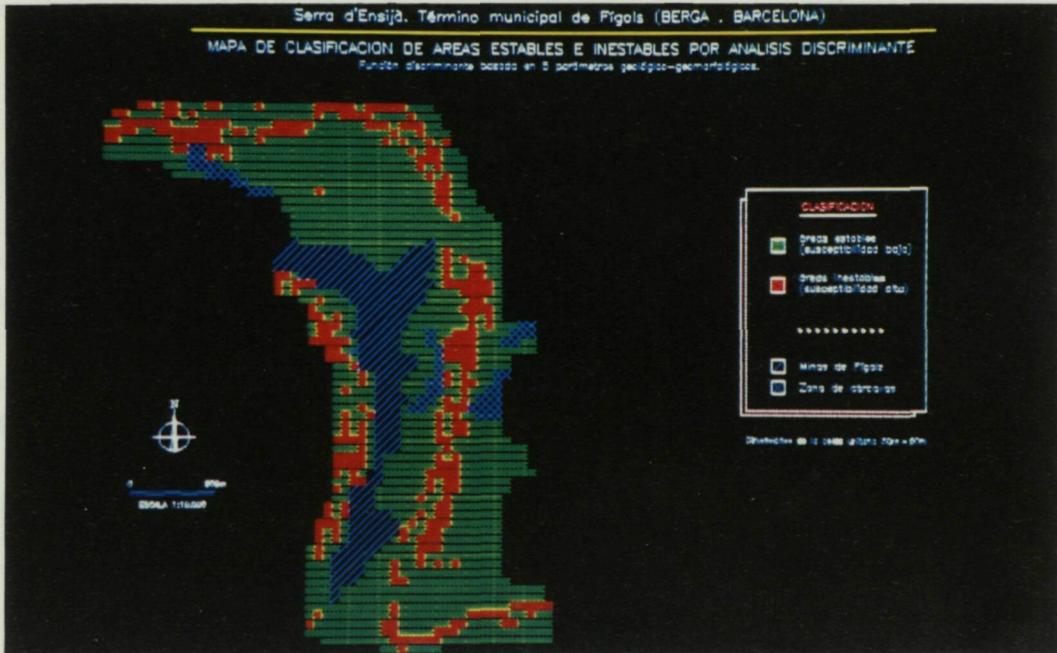


Figura 8.11. Mapa de clasificación de áreas estables e inestables (MT.6).

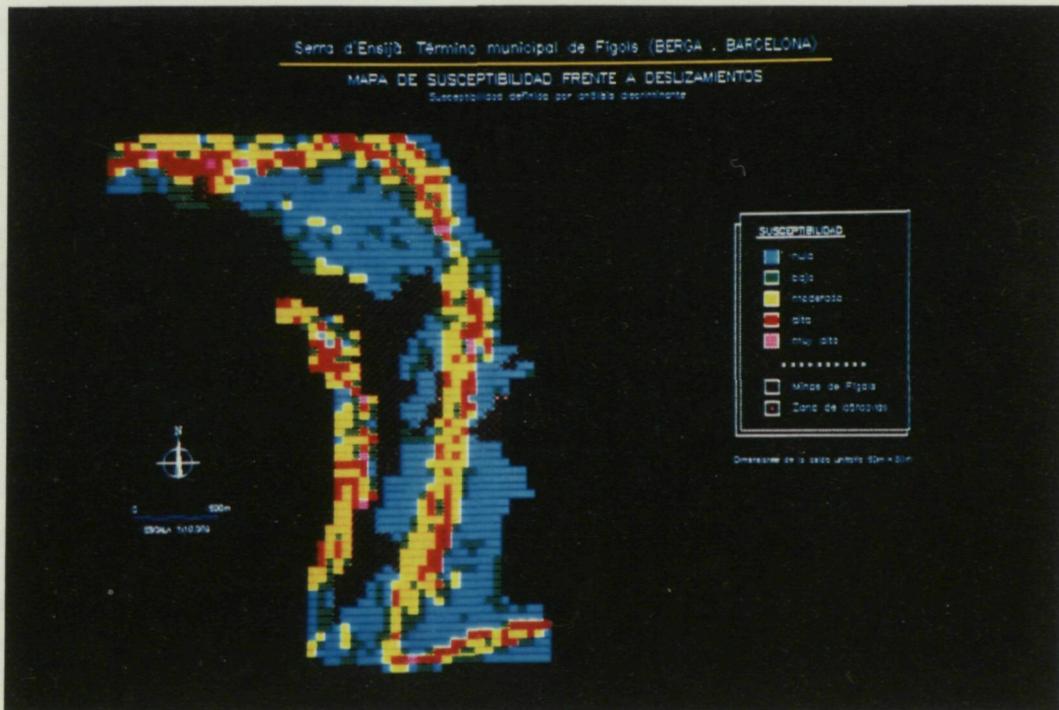


Figura 8.12. Mapa con los cinco niveles de susceptibilidad (MT.7).

En próximos estudios, la confección automatizada de los mapas temáticos, necesarios para la obtención de los datos de cada celda que configura la malla de trabajo, facilitarían su registro en bases de datos sobre los que se podría aplicar un sistema de información geográfica (GIS), permitiendo un análisis más detallado de la susceptibilidad.

F. Análisis del mapa de susceptibilidad.

La confección del mapa permite ver la distribución de los niveles de susceptibilidad del área piloto, informando de la diferente potencialidad de deslizamiento de la zona.

La tabla 8.6 muestra los valores medios que caracterizan el área piloto, la distribución de los cuales puede observarse en cada uno de los mapas temáticos.

Características generales del área piloto			
	Pendiente natural	Superficie cuenca (lg_{10})	Pendiente hasta la cresta
media (x)	24.2	3.2	26.6
desviación (s)	11.6	0.4	11.8

Tabla 8.6. Valores medios (x) y desviación estándar (s) de las variables cuantitativas utilizadas en la función discriminante aplicada a la zona.

Del análisis descriptivo de los cinco niveles de susceptibilidad, se han obtenido los estadísticos básicos de media (x) y desviación estándar (s) de la pendiente natural, superficie de la cuenca vertiente y pendiente hasta la cresta que muestra la tabla 8.7.

La superficie ocupada por los diferentes niveles que muestra la tabla, indica un dominio estable de la zona (53.2% niveles I+II). Las zonas con elevado nivel de susceptibilidad son restringidas y sólo ocupan un 20.0% (niveles IV+V).

Las zonas con nivel de susceptibilidad muy alto (V) se caracterizan por tener una pendiente natural semejante a la del nivel IV, sin embargo la potencialidad de deslizamiento se incrementa, no por el ángulo de pendiente sino por tener mayor superficie de cuenca vertiente y menor pendiente a la cresta que facilita la infiltración. Hay que destacar que los valores mínimos de las variables siguen una tendencia creciente cuanto mayor es el nivel de susceptibilidad, siendo el valor más elevado el que define la categoría V.

Niveles de susceptibilidad															
Variable	I			II			III			IV			V		
	\bar{x}	s	min	\bar{x}	s	min	\bar{x}	s	min	\bar{x}	s	min	\bar{x}	s	min
Pendiente natural	12.7	4.2	4.0	22.3	8.5	9.0	31.5	8.7	11.0	35.6	7.1	22.0	35.2	6.9	24.5
Superficie cuenca (lg)	3.1	0.4	2.3	3.3	0.3	2.3	3.2	0.3	2.4	3.3	0.3	2.5	3.5	0.4	2.6
Pendiente a la cresta	15.8	7.0	5.0	25.9	10.0	7.6	33.5	8.5	7.8	36.5	8.1	6.1	30.7	11.4	8.0
área ocupada (%)	33.7			19.5			26.9			18.5			1.5		

Tabla 8.7. Valores medios (\bar{x}), desviación estandar (s) y valores mínimos de la pendiente natural en zona de rotura, cuenca vertiente y pendiente hasta la cresta, que caracterizan cada uno de los niveles de susceptibilidad de la zona. La última fila de la tabla indica la superficie ocupada (%) en el mapa por cada uno de los niveles de susceptibilidad, mostrando las condiciones relativas de estabilidad de la zona.

La cobertura vegetal de la zona se distribuye en prado con un 33.0% del área, bosque claro un 12.4%, bosque denso un 50.6% y un 4.0% en la que aflora roca. Los valores de pendientes y superficies de cuenca para cada tipo de cobertura se muestran en la tabla 8.8. Se observa en la tabla que el prado se desarrolla sobre pendientes más bajas que el resto de coberturas en la zona. Este hecho ocasiona que las grandes extensiones de prado aparezcan como áreas mayoritariamente estables o con baja susceptibilidad. La influencia negativa de este tipo de cobertura respecto a la estabilidad, como ya se ha descrito en el apartado de análisis de la función del Capítulo 6, se hace patente cuando se comparan áreas de iguales características (pendientes y área cuenca).

Uso del suelo (TUSR)								
variable	Prado		Bosque claro		Bosque denso		Roca	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Pendiente natural	19.2	10.7	31.5	15.0	25.6	9.9	25.0	11.3
Superficie cuenca (lg_{10})	3.1	0.3	3.2	0.3	3.3	0.4	3.2	0.5
Pendiente cresta	21.5	11.8	34.6	13.7	27.8	9.8	28.8	11.1
Area ocupada (%)	33.0		12.4		50.6		4.0	

Tabla 8.8. Valores medios (\bar{x}) y desviación estándar (s) de la pendiente natural, superficie de cuenca vertiente y pendiente a la cresta para los distintos tipos de uso del suelo que caracterizan la zona. La última fila de la tabla indica la superficie ocupada por cada tipo de recubrimiento.

En la tabla 8.9, se ha diferenciado el tipo de cobertura (excluyendo $tusr=1$ por su baja representación) para cada nivel de susceptibilidad. Se observa que el valor medio de la pendiente natural del terreno aumenta del nivel I al V para el mismo tipo de cobertura. La superficie de cuenca, parece seguir la misma tendencia, aunque no tan claramente. Sin embargo, se observa que para un mismo nivel, la superficie de cuenca aumenta generalmente de prado a bosque denso, a excepción del nivel III. Si es necesaria una mayor superficie de cuenca vertiente para que se de una rotura en zona de bosque, significa que el bosque denso tiene un efecto estabilizador, pues necesita mayor aportación de agua (mayor cuenca), respecto a zonas con otro tipo de recubrimiento (prado o bosque claro), para que se den unas condiciones que favorezcan la rotura y se produzca el deslizamiento.

Estos datos corroboran así, los resultados que se han obtenido de las variables $lnsq$ y $tusr$

(tipos de cobertera vegetal y uso del suelo) en las diversas funciones analizadas en el Capítulo 6 y donde se ha reflejado su contribución a la estabilidad.

El valor de la variable $\tan\alpha$ (pendiente a la cresta) aumenta hacia niveles superiores. Puesto que en la función, dicha variable aparece con coeficiente negativo, los valores altos de la variable deberían favorecer la estabilidad, sin embargo los resultados que aquí se muestran parecen contradecir este comportamiento. Los efectos que ello pueda provocar en la definición del nivel de susceptibilidad es prácticamente nulo, puesto que el coeficiente que define a esta variable en la función de predicción es bajo y su contribución respecto al resto de variables no hace variar significativamente los resultados del análisis.

Al final de la tabla se han indicado los porcentajes de cada tipo de cobertera para un mismo nivel de susceptibilidad. Aquí se determina claramente que las zonas con condiciones de estabilidad más precarias, que muestran mayor potencialidad de rotura (niveles altos de susceptibilidad) son preferentemente zonas de prado (en niveles IV y V), mientras que las zonas con cobertera boscosa tienden a ser definidas con niveles de susceptibilidad más bajos (I, II y III). El nivel I afecta por igual a zonas de prado y bosque denso, aunque las primeras aparecen destacadas por la baja pendiente natural que generalmente muestran en la zona de estudio.

		Niveles de susceptibilidad											
Variable	Tipo de uso	I		II		III		IV		V			
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s		
Pendiente natural	Prado	10.9	3.1	16.2	2.8	22.2	3.4	34.3	6.1	38.1	6.3		
	Bosque claro	12.0	3.7	33.6	18.0	37.5	11.1	40.5	6.6	-	-		
	Bosque denso	14.8	4.5	24.0	5.9	32.6	6.9	34.6	6.1	35.0	-		
Superficie cuenca (lg)	Prado	3.0	0.4	3.3	0.2	3.3	0.2	3.2	0.3	3.4	0.4		
	Bosque claro	3.2	0.4	3.4	0.3	3.1	0.3	3.3	0.2	-	-		
	Bosque denso	3.2	0.3	3.4	0.4	3.2	0.4	3.6	0.4	4.0	-		
Pendiente cresta	Prado	12.8	5.4	20.1	8.0	27.2	7.9	36.5	6.9	29.9	13.9		
	Bosque claro	17.3	7.7	37.6	17.0	40.4	8.8	41.6	6.1	-	-		
	Bosque denso	18.6	7.2	27.2	7.6	33.8	7.4	33.6	8.0	32.0	-		
Area ocupada dentro del nivel (%)	Prado	46.2		28.7		14.0		44.6		90.0			
	Bosque claro	9.4		8.8		12.5		25.9		-			
	Bosque denso	44.4		62.4		73.5		29.5		10.0			

Tabla 8.9. Valor medio (\bar{x}) y desviación estandar (s) de las variables cuantitativas para cada tipo de recubrimiento de la ladera que caracteriza cada nivel de susceptibilidad de la zona.

8.3. SÍSTESIS Y CONCLUSIONES.

La aplicación de una función discriminante sobre el área piloto de Fígols, mediante técnicas estadísticas multivariantes a partir de un conjunto de datos geológico-geomorfológicos del terreno, ha servido para analizar la estabilidad y confeccionar el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de la zona.

- El proceso de elaboración del mapa ha permitido validar la función discriminante utilizada. Los resultados de clasificación que se obtienen de la función cuando se utilizan las mismas muestras durante el proceso de definición de ésta y la etapa de clasificación pueden ser algo optimistas. Por ello es necesario comprobar la precisión de los resultados, mediante la aplicación de esa misma función a nuevos datos que en este caso caracterizan la zona piloto seleccionada sobre la que se ha realizado la prueba.
- Para mejorar la predicción y conseguir mayor fiabilidad de la función, ha sido necesario ajustar la función mediante la transformación de la variable con mayor contribución en la misma (tanig). Se han realizado diferentes transformaciones de la variable (hiperbólica, cuadrática y senoidal), definiendo nuevas funciones discriminantes para cada una de ellas. Tras desestimar la función hiperbólica, se ha llevado a cabo el contraste entre las restantes funciones de transformación. Una vez aplicadas sobre la zona piloto, se ha determinado la transformación senoidal como la función que mejor explica las condiciones de estabilidad del área considerada.
- La validación definitiva de la función transformada ha permitido finalmente elaborar un mapa de susceptibilidad de deslizamientos. Mediante la definición de cinco niveles de susceptibilidad (nula, baja, moderada, alta y muy alta), a partir de la función senoidal y su aplicación a los resultados discriminantes obtenidos del área, se ha llevado a cabo una zonificación de la región piloto, identificando la probabilidad relativa de ocurrencia de deslizamiento. La zonificación permite determinar las zonas inestables con elevado potencial de deslizamiento en la región. Su identificación y localización permite delimitar aquellas zonas en las que deberían realizarse estudios más detallados, si en algún momento éstos fueran requeridos.

El ejemplo de aplicación desarrollado en este capítulo ha puesto de manifiesto:

- la correcta selección de las variables que constituyen la función y su significación como factores con elevada contribución en la formación de deslizamientos en el área de estudio.

- la eficacia de la metodología utilizada para la previsión del comportamiento de las laderas frente deslizamiento a partir de unas características intrínsecas (topográficas, geológicas, geomorfológicas..) de la misma y basada en la definición de probabilidad de rotura que se obtiene de la función discriminante.

Deben destacarse sin embargo algunos aspectos importantes que deben considerarse a la hora de aplicar la metodología y obtener una predicción válida. Se ha demostrado en este capítulo, que se obtiene una máxima fiabilidad en la predicción de la función cuando las condiciones de estabilidad de la zona a analizar se asemejan a aquella sobre la que se ha desarrollado la función discriminante. Esto se ha podido comprobar a través de la función aplicada sobre la zona piloto, cuyo error de predicción respecto a los deslizamientos observados ha sido mayor que el error de clasificación de la función original de la que ha partido el análisis.

Las funciones analizadas en el capítulo 6, en las que se incluye la utilizada en la aplicación, se han independizado de la litología, la cual ha mostrado una baja influencia en las condiciones de estabilidad de la zona de estudio, como consecuencia de haber seleccionado las muestras del inventario sobre una zona representada por una baja diversidad litológica. Sin embargo la zona de aplicación se ha caracterizado por una alternancia de materiales calizos y lutíticos que ha condicionado la estabilidad y consecuente distribución de deslizamientos. Este hecho ha determinado la redefinición de la función, con la transformación de la variable que mejor caracteriza las diferencias existentes entre ambas litologías.

- Con ello se quiere destacar la dificultad que existe en la extrapolación de las funciones discriminantes a otras zonas que no sean sobre las que se ha desarrollado el proceso de obtención de dichas funciones.

- Además debe remarcarse que las funciones analizadas en este estudio sólo son válidas para analizar las condiciones de estabilidad de una región frente movimientos superficiales. La tesis no ha tenido por objeto el estudio de movimientos profundos, cuyo tratamiento es distinto. Los factores que pueden influir en el desarrollo de este tipo de movimientos son probablemente diferentes a los analizados en esta investigación, siendo algunas de las variables utilizadas aquí (nsoq, tusr, grfs, etc...) irrelevantes para la evaluación de las condiciones de estabilidad de zonas afectadas por estos movimientos.

Aún dadas las limitaciones impuestas en la aplicación de las funciones discriminantes analizadas, se ha demostrado sin embargo la validez de la metodología empleada para su

consecución, siendo ésta totalmente generalizable y aplicable a cualquier zona.

- La validez de la metodología de predicción que aquí se ha desarrollado, ha permitido conocer algo más sobre los fenómenos de movimientos de masa superficiales, concretamente deslizamientos, así como algunos de los factores que los controlan. La aplicación de esta metodología en la confección de mapas de susceptibilidad, ha ayudado a dar un paso al frente en la objetivización de los resultados que estos aportan, puesto que es un tratamiento cuantitativo de la información original y donde el bajo grado de subjetividad que puede haber lo constituye únicamente aquella fase en la que se determinan las características del terreno que deben inicialmente estar representadas (inventario).

- Las limitaciones que tienen las funciones discriminantes a la hora de evaluar las condiciones de estabilidad, se derivan del número restringido de factores que son representados por las variables que la forman. La necesidad de seguir buscando nuevos factores geológico-geomorfológicos (por ej. parámetro que caracterizen correctamente la influencia del agua en la ladera) que hagan mayor la efectividad en la predicción, provoca consecuentemente que los mapas de susceptibilidad de deslizamientos elaborados mediante funciones discriminantes como los obtenidos en esta investigación, deban ser considerados como una herramienta de análisis preliminar de la estabilidad de la zona, siendo muy útiles en etapas previas a fases constructivas, de investigación geotécnica o desarrollo de planificación territorial.

- Finalmente hay que remarcar que el coste, pero sobre todo el tiempo que se invierte en la definición final de estas funciones de predicción, para evaluar la susceptibilidad de deslizamiento, es bastante elevado. Por este motivo, es interesante que este tipo de investigación se integre en proyectos de mayor alcance e incluso multidisciplinares, en los cuales los datos de base puedan ser compartidos y utilizados por otros especialistas, disminuyendo el coste de su adquisición, registro, digitalización y análisis de los mismos.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES GENERALES

9.1. CONCLUSIONES.

El objetivo de esta tesis se ha centrado en el estudio de las condiciones de rotura y movilidad de los movimientos de masa de laderas naturales. Para su consecución, las investigaciones se han dirigido en tres líneas paralelas pero complementarias ya que conjuntamente analizan algunos de los aspectos que se involucran en los fenómenos de inestabilidad y que son de mayor interés a la hora de definir las áreas sujetas a riesgo en un mapa de peligrosidad. Son pues, el conocer dónde pueden tener lugar y cuál es el alcance que pueden llegar a tener los movimientos de masa de laderas, los aspectos que se han tratado en este estudio.

Aunque en cada uno de los capítulos de la tesis se incluye un apartado donde se destacan los aspectos fundamentales que se concluyen de la investigación, a continuación se realiza una recapitulación de éstos.

La primera línea de trabajo ha tratado de determinar la existencia de unas agrupaciones de características morfológicas semejantes que diferenciaran al conjunto de movimientos estudiados y que pudieran justificar el posterior análisis de movilidad separadamente para cada uno. A partir de la relación entre alguno de los parámetros morfológicos relativos a los mecanismos de rotura (rotacional, plana y desprendimiento) y mecanismos de progresión de la masa (traslacional, flujos -coladas y corrientes- y caída de bloques), y geométricos del movimiento (salto cicatriz, longitud cicatriz y depósito, profundidad máxima de la rotura, ancho del pie del depósito, superficie de la cicatriz y depósito, volumen de la masa desprendida, etc...), se han definido unos índices morfométricos que han permitido diferenciar cada una de las tipologías. El tratamiento estadístico, mediante análisis multivariante, de estos índices morfométricos ha puesto de manifiesto, al principio de la investigación y tal como refleja el análisis factorial (Fig. 5.9), la necesidad de separar las

relaciones entre parámetros que caracterizan la zona de rotura y los relativos a la propagación del movimiento. Consecuentemente, en el análisis morfológico se ha independizado la tipología de rotura de la tipología de progresión.

Del análisis de los factores discriminantes básicos, utilizados para diferenciar los mecanismos de formación del movimiento, se destaca:

- La importancia de la variable DDLL (la relación entre la profundidad y longitud de la zona de rotura), que expresa el grado de rotacionalidad del movimiento, así como LRDEP, LRSFE, LRLALT, LRLON, que reflejan la deformación que ha tenido lugar durante el proceso de progresión de la masa.
- La influencia de la litología (TSUB, LGRFS) en la formación de deslizamientos, favoreciendo el tipo de rotura plana o rotacional.

Algunos autores (*Skempton, 1953; Moser et al., 1983*) habían puesto ya de manifiesto la significación de relaciones geométricas similares a las establecidas en el estudio para definir el grado de rotacionalidad (ddll) de los movimientos y su destacado valor como índice de clasificación. En este trabajo se ha podido corroborar dichas observaciones, obteniendo valores significativamente menores de la relación DDLL en roturas planas respecto a la de los rotacionales, sin embargo tal como expusiera *Blong (1973)* en su estudio, aquí se concluye igualmente que un único atributo morfométrico del movimiento no es capaz, por si solo, de clasificar correctamente los deslizamientos. De este modo, se destaca la importancia añadida de otros factores tales como la litología (tsub) y el grosor de la formación superficial (grfs) necesarios para diferenciar las tipologías. La formación superficial parece intervenir para definir la forma de la rotura, por su relación estructural con el sustrato y que se deriva de la presencia de una discontinuidad sensiblemente paralela a la superficie y situada en el contacto entre ambas. Este hecho favorece la formación de roturas planas, siendo las de tipo rotacional características de zonas litológicamente más homogéneas y constituidas por materiales lutíticos, condicionando en parte el volumen de la masa movilizada, siendo generalmente las de tipo planar, movimientos más superficiales que los rotacionales.

El análisis realizado con el objeto de diferenciar tres de los mecanismos básicos de progresión del movimiento (caída de bloques, deslizamientos traslacionales y flujos), han reflejado la clara separación en el comportamiento de los desprendimientos respecto de los restantes mecanismos estudiados. Esto dificulta su estudio conjunto en posteriores análisis sobre las condiciones de rotura y movilidad, siendo el proceder más correcto, separar los desprendimientos de los movimientos que forman los deslizamientos traslacionales y flujos.

La separación entre los movimientos traslacionales y flujos no es tan clara. La clasificación coincide en un 75% y 69% para traslacionales y flujos respectivamente con la realizada sobre el terreno. Este solape refleja las continuas gradaciones existentes entre uno y otro tipo de movimiento, que evolucionan desde la progresión traslacional hasta convertirse en un flujo, a través de la progresiva fragmentación de la masa movilizada.

Aún dada la dificultad en la separación de ambas tipologías de progresión, el análisis ha evidenciado el diferente carácter de estos tipos de movimientos, mediante las variables morfométricas. Los índices $lrsfe$, $lrdep$, $lrlon$ y $lralt$ han indicado un comportamiento deformacional mayor para flujos que para traslacionales, siendo en ocasiones imperceptible en estos últimos. La variable que mejor define el diferente carácter del movimiento es $lrdep$, relación ancho del pie del depósito y longitud del mismo (W/L_d).

Si la litología (t_{sub}) ha marcado una notable diferencia entre los mecanismos de rotura plana y rotacional, en el análisis de progresión sólo ha contribuido en la separación de las caídas de bloques respecto de los restantes mecanismos, sin evidenciar diferencias entre los traslacionales y flujos.

Finalmente se puede destacar el carácter más móvil, expresado por $tana$, de las coladas respecto de las corrientes de derrubios, ambos movimientos clasificados como flujos en el primer análisis. La extensión y consecuente deformación del pie del depósito en ambos movimientos queda bien reflejado a través de la variable $lrdep$, cuyos resultados siguen indicando una mayor movilidad relativa de las coladas. La variable litología, no marca una notable diferencia entre ambos tipos de flujos, simplemente la matiza, reflejando un carácter más lutítico del material afectado por las coladas respecto de las corrientes.

Una vez analizadas mediante técnicas discriminantes las características morfométricas y litológicas que definen cada agrupación, la aplicación de métodos de clasificación automáticos a los movimientos inventariados ha corroborado con una buena correspondencia la clasificación de la tipología de rotura (77% planar-rotacional) y progresión de la masa (~83% caída bloques-flujos-traslacionales; ~89% coladas-corrientes) que se ha hecho en el campo siguiendo criterios morfológicos.

De esta manera, la segregación de los grupos obtenida del análisis morfométrico es un reflejo del diferente comportamiento que muestran los movimientos, siendo esta diferenciación atribuida a los mecanismos de formación de cada uno.

Las técnicas de clasificación, ha evidenciado con los resultados (en algunas de las tipologías) la complejidad de los mecanismos y diversidad de factores que rigen la formación de los diferentes movimientos, siendo necesario un análisis detallado de éstos en posteriores

estudios. No obstante, dichas técnicas han servido para hallar un grado de orden en el entorno que representan estos fenómenos de inestabilidad, pudiendo así contribuir a mejorar los conocimientos que actualmente se tiene sobre éstos.

El trabajo realizado es un intento, pués, de relacionar las diferentes tipologías morfológicas con los mecanismos de formación del movimiento, a partir de las definiciones de éstos en términos cuantitativos. Aunque las clasificaciones obtenidas muestran un buen grado de ajuste, es obvio que los índices morfométricos sólo son aplicables a un nivel general, en el que se consideren las tipologías básicas.

La segunda línea de trabajo, se ha dirigido a la identificación de grupos de parámetros que indican condiciones favorables a la formación de deslizamientos superficiales de laderas naturales. Mediante el análisis de parámetros geológico-geomorfológicos, de fácil obtención en el terreno, que reflejaran significativamente las características de la ladera, se ha desarrollado una metodología que ha permitido conocer la relación entre éstos y la estabilidad. El análisis se ha realizado no sólo considerando su influencia individualizada, sino el efecto simultáneo como causante de la inestabilidad.

La influencia y contribución relativa de las diversas variables analizadas ($\tan\alpha$, $\tan\beta$, I_{disc} , I_{con} , I_{grfs} , I_{nsoq} , t_{rel} , t_{car} , t_{usr} y t_{sub}) ha quedado patente a través de la definición de una serie de funciones que se obtienen del proceso discriminante sobre un conjunto de muestras que forman la población de laderas estables e inestables cuyas características se reflejan mediante los datos tomados de campo. La función discriminante, obtenida del análisis, que mejor describe el comportamiento inestable de la ladera es:

$$F_{disc} = 1.169711\lg(ccon+15) - 0.405911\lg(nsoq+0.08) - 0.32553t_{rel} + 1.494751\lg(grfs+1) + 0.12428\tan\alpha - 0.0251\tan\beta - 7.25848$$

con centroides

-0.9982 (población estable)

1.0053 (deslizamientos)

La distribución de las muestras sobre la función discriminante permite observar la filiación de éstas a uno u otro grupo (estable/inestable). La correspondencia entre las agrupaciones establecidas en campo y los resultados de la aplicación de la función ha sido de un 88.8%, con un error de clasificación de la población inestable inferior al 5% (para un índice discriminante de $F=-0.4$). Los resultados de clasificación junto con el valor de la correlación canónica (0.709) y valor propio (1.011) expresan la significación de la función para

analizar el comportamiento de la ladera y su fiabilidad como elemento de predicción de la susceptibilidad de deslizamiento.

En el histograma de frecuencias de la función (Fig. 6.23) se aprecia una zona que corresponde a un rango de valores que integran muestras de ambas poblaciones (estables/inestables) y que son asociadas a una de las agrupaciones por su proximidad a uno de los centroides que las caracteriza. Las muestras que corresponden a la población estable que se encuentra en esta zona, son laderas con elevada susceptibilidad que pueden inestabilizarse en un futuro, siendo su detección, mediante la aplicación de estas técnicas, uno de los aspectos de mayor interés para las cartografías de peligrosidad.

Los aspectos más destacados que se extraen del resultado de este análisis y los obtenidos en el Capítulo 6 para evaluar las condiciones de rotura son los siguientes:

- Elevada contribución de la pendiente natural en zona de rotura (**tanig**), cuenca vertiente (**lcon**) y la cobertera vegetal (**Insoq**, **tusr**) en la evaluación de las condiciones de rotura, siendo menor, aunque estadísticamente significativo, el peso del perfil transversal de la ladera (**trel**), el grosor de la formación superficial (**lgrfs**) y la pendiente hacia la cresta (**tancg**).
 - Incremento de la estabilidad que ejerce: la presencia de vegetación (**Insoq/tusr**), disminuyendo la susceptibilidad de deslizamiento superficial; las morfologías transversales del terreno de tipo convexo (**trel**) provocando un efecto divergente sobre las aguas superficiales y subterráneas.
 - Incremento de la inestabilidad, aumentando la susceptibilidad de deslizamiento a: mayor pendiente en la zona potencial de rotura (**tanig**); mayor cuenca y consecuente aporte de agua (**lcon**) cuya infiltración sea favorecida por una baja pendiente en la cabecera de la zona de inestabilidad potencial (**tancg**) y mayor grosor de la formación superficial (**lgrfs**).
- Contribución e influencia semejante de la variable cuantitativa **Insoq** y cualitativa **tusr** representando la densidad de árboles y el tipo de cobertera vegetal respectivamente, indicando su utilidad indistinta en la evaluación de la susceptibilidad.
- Contribución destacada del factor topográfico de altitud (**alca**) en la localización de deslizamientos superficiales.
 - Su aparente influencia y efectos sobre la inestabilidad se atribuyen en esencia a la distribución de las precipitaciones del 7-8 de Noviembre de 1982,

cuya relación en el área de estudio se establece mediante la función ($r=0.81$):

$$y = 0.311x - 48.73$$

siendo

y : altitud (m)

x : precipitación (mm).

- Nula significación estadística de la variable orientación (orie) expresada a través de la radiación solar, en la determinación de las condiciones de rotura de la zona de estudio.
- Marcada influencia indirecta en la distribución de los deslizamientos, causada principalmente por la dirección S-SE del temporal de lluvias que dió lugar a las roturas y la baja presencia de vegetación en las vertientes de solana.
- Baja significación estadística del factor litológico (t_{sub}) en la zona de estudio, que se atribuye al hecho de no haber seleccionado movimientos producidos en niveles rocosos (desprendimientos), analizando la susceptibilidad únicamente de deslizamientos superficiales, los cuales han afectado a un espectro de materiales con características geotécnicas muy semejantes (ver anejo II), condicionando de este modo su bajo valor discriminante.

Realizando una valoración global de los resultados obtenidos de la influencia y contribución, se concluye que los deslizamientos superficiales no se distribuyen aleatoriamente, sino que su aparición en determinadas zonas de la ladera está controlada por las condiciones locales de la topografía, geometría y vegetación de la misma.

Los deslizamientos tienen lugar cuando hay una convergencia favorable de los factores de mayor contribución, pudiendo no haber inestabilidad, aún por ejemplo teniendo la zona de rotura una pendiente elevada, si las restantes condiciones geológico-geomorfológicas (cuenca, vegetación, morfología, etc..) compensan los efectos de aquella, propiciando la estabilidad.

Globalizando, se puede indicar que las zonas con mayor ocurrencia de deslizamientos, dadas unas condiciones geológicas y climatológicas determinadas, son aquellas que presentan elevadas pendientes en zona de rotura, cuyo efecto en la inestabilidad deriva del incremento de las tensiones tangenciales y su importante papel en la distribución e infiltración del agua; grandes superficies de cuenca que tengan capacidad de recoger y drenar gran cantidad de agua hacia la zona potencial de rotura; ausencia de bosque que actúe de refuerzo del suelo

a través de las raíces y al mismo tiempo como protector frente la acción de agentes meteóricos; morfologías cóncavas de la ladera, que controlan parcialmente la distribución del agua superficial, favoreciendo su concentración e infiltración. Estas zonas topográficamente deprimidas inducen a su vez la acumulación de depósitos coluviales, cuyas características geotécnicas hacen que sean fácilmente movilizables; importantes grosores de formación superficial que con una permeabilidad superior a la del sustrato fundamentalmente limo-arcilloso, facilitan la infiltración y aumentan las tensiones de corte cuando se saturan y bajas pendientes hacia la cresta, favoreciendo la infiltración del agua superficial.

Evidentemente, la altura topográfica no ejerce por si misma, un control de la estabilidad. Como ya se ha comentado, las zonas topográficamente más elevadas han presentado mayor ocurrencia de deslizamientos como consecuencia de la distribución espacial de la precipitación acaecida el 7-8 de Noviembre de 1982 en el Pirineo Oriental.

Muchos de los factores analizados tienen una interpretación física ligada a los efectos del agua sobre la ladera, que se traduce así en uno de los elementos que mayor control ejercen sobre las condiciones de estabilidad.

Las zonas con baja susceptibilidad de deslizamientos muestran naturalmente unas condiciones geológico-geomorfológicas inversas.

Debe destacarse que los mismos resultados de los análisis concluyen que:

- Un factor no es capaz, por sí solo, de reflejar el comportamiento de la ladera y explicar así el grado de estabilidad de la misma, obteniendo sin embargo, una buena caracterización de este comportamiento a través de un conjunto que actúa de forma integrada, dando como resultado una buena clasificación de las poblaciones estable e inestable.
- La definición del valor umbral para cada una de las variables que determinan el comportamiento de la ladera, es una tarea difícil y sin sentido, que se justifica en el hecho de que el límite de estabilidad es el resultado del efecto conjunto de todas ellas, de tal forma que las variaciones del valor de alguno de los factores del terreno analizados puede ser compensado por el incremento o decrecimiento del valor de cualquier otro.
- Las funciones discriminantes, al diferenciar satisfactoriamente las laderas estables e inestables mediante un conjunto de atributos del terreno, pueden ser utilizadas para identificar las zonas con mayor potencialidad de deslizamiento.

La evaluación de las condiciones de rotura, mediante la utilización conjunta de variables cuantitativas continuas (pendiente, cuenca, grosor formación superficial, densidad de árboles, etc...) y cualitativas con valoración numérica discreta (litología, morfología del relieve, tipo de cresta, tipo de cobertera vegetal), han asegurado una descripción más completa de las características geológico-geomorfológicas para estudiar el fenómeno de deslizamiento superficial, consiguiendo un máximo rendimiento de estos datos a partir de las técnicas multivariantes aplicadas. Muchos de los trabajos llevados a cabo en la misma línea, realizados en las últimas décadas, han utilizado exclusivamente datos categorizados (*Jones et al., 1961; Kawakami et al., 1984; Yin & Yan, 1988; Mora et al., 1994, etc.*) implicando una pérdida de información que puede condicionar los resultados de los análisis. Esto se traduce en una disminución del porcentaje de clasificación de las laderas, que mayoritariamente se encuentra, en los trabajos mencionados, por debajo del 80%, reflejándose de este modo una peor caracterización de las condiciones de estabilidad de la zona.

Dada la importancia que las propiedades del material (grado de saturación, consistencia, textura, humedad, etc...) tienen en la estabilidad, algunos autores como *Reger (1979)* llevaron a cabo análisis discriminantes para evaluar el comportamiento estable/inestable de la ladera, tomando datos únicamente de estas características. Los resultados de ajuste del análisis, con un valor del 74%, evidenciaron la pobreza de la información utilizada. Sin embargo, el análisis conjunto de este tipo de datos con las características geomorfológicas de la ladera (*Neuland, 1976*) aporta al estudio una valoración más global de las condiciones que influyen en la generación de deslizamientos. Neuland alcanzó, con la función discriminante (ver Cap. 1) que forman las variables de pendiente, cuenca y densidad del material, un 87% de clasificación correcta de las laderas, comprobándose así su fiabilidad.

Los parámetros del terreno que la función discriminante ha seleccionado en el estudio que aquí se ha presentado, habían sido ya aplicados en anteriores trabajos (*Carrara, 1983a,b; Mulder, 1991*) demostrando su utilidad a la hora de describir, de una forma sencilla, las condiciones del terreno que principalmente controlan la rotura. Sin embargo, uno de los requisitos que debe satisfacer cualquier función de predicción es que esté constituida por un número reducido de variables que puedan garantizar una predicción practicable. *Carrara (1983a)* analizó la potencialidad de deslizamiento mediante varias funciones que combinaban, cada una de ellas, 9 factores (litología, vegetación, altitud, pendiente, orientación, convexidad vertical y horizontal, rugosidad de la ladera y 2 variables referidas a la red de drenaje), con los que obtuvo una clasificación de entre el 72% y el 83%. Con tan solo 6 factores, las funciones obtenidas en el estudio que aquí se ha presentado, ha mejorado sustancialmente la clasificación (89%), haciendo más fácil su aplicación al mismo tiempo que garantiza una predicción más fiable. Las variables relativas al grosor de la formación superficial (grfs) y la pendiente hacia la cresta (tancg), no habían sido analizadas, conjuntamente con los restantes factores del terreno, en anteriores trabajos, destacándose en éste su relevancia como variables

de control de deslizamiento. Ambas condicionan el modo de infiltración del agua en el terreno, siendo sus efectos determinantes en la estabilidad y generación de deslizamientos.

La introducción al análisis descriptivo de las condiciones geológico-geomorfológicas del terreno como posibles factores de control de la tipología de rotura y progresión del movimiento, cuando hay inestabilidad, ha destacado los siguientes aspectos:

- La pendiente natural (**tanig**) muestra una cierta relevancia en el control de la tipología del movimiento, afectando a las características de la rotura. Se observa que a mayores pendientes naturales las roturas tienden a ser más planas.
- Pendientes más suaves hacia la cresta (**tancg**) están asociadas preferentemente roturas rotacionales.
- Mayores superficies de cuenca (**Icon**) caracterizan las tipologías de rotura rotacional.
- Morfologías de relieve transversal (**trel**) preferentemente cóncavos, muestran una cierta tendencia a aparecer junto a las roturas rotacionales.
- Los deslizamientos traslacionales tienden a generarse en pendientes naturales (**tanig**) de la zona de rotura, mayores que las de los flujos, siendo las de las corrientes mayores que las de las coladas.
- Las superficies de cuenca (**Icon**) menores tienden a generar tipos de progresión de movimiento traslacionales. Superficies de cuenca mayores están asociadas a las corrientes de derrubios.

Para confirmar las tendencias de los resultados obtenidos, sería necesario realizar en posteriores estudios, un análisis más profundo y con técnicas estadísticas que permitan evaluar cuantitativamente el control que ejercen los parámetros del terreno en las características del movimiento en caso de inestabilidad, introduciendo nuevos parámetros como la litología, el grosor de la formación superficial o el posible volumen afectado, que claramente pueden influir en la generación de uno u otro tipo de movimiento. No obstante, los resultados parecen ya marcar unas ciertas diferencias en las condiciones geológico-geomorfológicas de la ladera, que determinan la forma del tipo de rotura y progresión que pueden tener una incidencia notable en la movilidad y alcance del movimiento, y que sería interesante analizar.

El aspecto predictivo de las funciones discriminantes, ha sido evaluado en el Capítulo 8, en el que se describe la metodología desarrollada que ha permitido analizar la estabilidad y estimar la susceptibilidad de deslizamiento de la zona piloto. En éste *se ha puesto de manifiesto la eficacia del método de predicción del comportamiento de la ladera, basado en la definición de la potencialidad de rotura a partir de las funciones discriminantes.*

El método utilizado para evaluar la susceptibilidad combina la técnica discriminante como herramienta predictiva, con la técnica de reconocimiento tradicional, puesto que es necesario previamente a la aplicación de la función, conocer las características geológico-geomorfológicas de la zona. Para facilitar la representación posterior de los resultados mediante un mapa de susceptibilidad, se ha generado una malla cuadrada, de cuyas celdas (50mx50m) se toman los valores de los parámetros cuantitativos y cualitativos considerados en la función. La ponderación de la influencia de las diferentes variables que se representan a través de la función:

$$F_{disc} = 1.36496 \lg(ccon+15) + 0.12545 \tan ig - 0.09752 tusr - 0.02462 \tan cg - 0.30808 trel - 6.55537$$

con centroides

-0.97395 (estables)

0.98095 (deslizamientos)

da, como resultado de su aplicación, un valor discriminante para cada unidad del terreno en que se ha dividido el mapa. La definición de unos niveles de susceptibilidad a partir de la distribución de frecuencias relativas del conjunto de valores discriminantes obtenidos, permite comprobar la eficacia de ésta en la predicción. Contrastando la distribución de los deslizamientos observados y los señalados por la función, se ha determinado una correspondencia inferior a la establecida por la función original (95.0% para $F=-0.3$).

El proceso que se sigue más comunmente para mejorar la predicción y conseguir mayor fiabilidad de la función es la de modificar ésta mediante la transformación de una o más de sus variables, de forma que se refleje mejor el comportamiento de la ladera. La aplicación y contraste de diversas transformaciones de la variable $\tan ig$ (pendiente natural), ha indicado la función denominada senoidal:

$$F_{disc} = 1.3311 \lg(ccon+15) + 7.4691 \tan ig - 0.120 tusr - 0.030 \tan cg - 0.324 trel - 8.499$$

siendo $l \tan ig = \text{sen } 2 \tan ig$

como la que mejor describe las condiciones de estabilidad de la zona con un error de predicción de la población inestable inferior al 5% ($F=0.3$).

La función quiere reflejar, con la transformación de la variable $\tan \alpha$, las condiciones de mayor estabilidad que muestran los niveles calizos de la Facies Garumniense que coronan la Cuenca de Vallcebre (zona piloto), con pendientes superiores a los 45° - 50° , así como las zonas que forman los niveles lutíticos de la misma facies, cuando dan lugar a pendientes inferiores a los 20° - 30° . La inestabilidad aparece concentrada en los niveles lutíticos con pendientes intermedias (30° - 40°).

Con esta función se ha confeccionado posteriormente el mapa de susceptibilidad de la zona. Los niveles que determinan la susceptibilidad se han definido a partir de unos intervalos de la función discriminante y que corresponden, según el porcentaje de deslizamientos que integran ese intervalo, a una potencialidad de rotura nula, baja, moderada, alta y muy alta. El posterior tratamiento estadístico del conjunto de celdas que integran cada uno de los cinco niveles, permite conocer sus características de pendiente, cuenca, vegetación, etc..., que determinan las variables de la función, corroborando el modo en que actúan éstas en la estabilidad y cuyos resultados ya habían sido ampliamente destacados en los análisis llevados a cabo en el Capítulo 6.

En consecuencia de lo expuesto anteriormente, las principales conclusiones a las que se llega de los resultados obtenidos de la aplicación son:

- Las variables que están representadas en la función muestran un buen comportamiento como factores que contribuyen en la formación de deslizamientos superficiales.
- El valor de la función discriminante que mejor explica las condiciones de estabilidad de una zona es de difícil aplicación a cualquier otra zona, pues al cambiar las condiciones geológico-geomorfológicas (litología, geometría de las cuencas, pendientes, etc.) su extrapolación es poco fiable. No obstante, es posible que las variables más significativas sean similares a las escogidas en el presente estudio.
- La validez de la metodología empleada para la predicción del comportamiento de las laderas, siendo generalizable su aplicación a cualquier zona.

La aplicación del método aporta:

- Una valoración cuantitativa de la influencia de los distintos factores que

contribuyen en la inestabilidad.

- Una estimación más realista del comportamiento de la ladera, al considerar un conjunto de factores simultáneamente.
- Mayor objetividad en la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos superficiales e identificación de zonas con elevada potencialidad de rotura que facilitan los criterios necesarios para la confección posterior de cartografías de riesgos.

Se puede destacar finalmente que la metodología desarrollada queda abierta a la incorporación de otros factores que contribuyan a mejorar la evaluación de las zonas más susceptibles y a la asociación de técnicas que permitan una más clara y eficaz representación cartográfica de las zonas expuestas a deslizamientos.

La tercera y última línea de investigación se ha centrado en el análisis de los factores que controlan la movilidad expresada como el alcance de los movimientos de masa. En este estudio se ha tratado de obtener una función que estime la distancia que puede llegar a recorrer el deslizamiento dadas unas condiciones determinadas del terreno y características del movimiento.

Previamente al análisis del alcance, se ha llevado a cabo un estudio de las relaciones existentes entre los diversos factores que condicionan el recorrido de la masa, destacándose los siguientes aspectos:

- Las tipologías morfológicas del movimiento, analizadas según el mecanismo de progresión de la masa, muestran diferente movilidad, siendo ésta creciente desde la caída de bloques, corrientes de derrubios a los deslizamientos traslacionales.
- Los obstáculos locales debidos a la presencia de vegetación en la ladera controlan, en parte, la progresión del material movilizado cuando se trata de deslizamientos superficiales. La propagación del movimiento es mayor en zonas de praderas y bosque bajo, que en zonas boscosas muy pobladas.
- La altura de caída de la masa movilizada influye en la distancia horizontal recorrida, pero no en el ángulo α del recorrido, expresado por $\tan \alpha$.

Dichas relaciones ponen de manifiesto la dificultad de establecer una función sencilla con la que evaluar la movilidad y alcance del deslizamiento.

El rango de valores del volumen movilizado que ha sido analizado en este estudio, ha impedido establecer la relación entre éste y el ángulo α del recorrido (tana) que hasta el momento se ha utilizado comúnmente en la bibliografía como medida de estimación de la movilidad. Las limitaciones que esto ha impuesto, ha determinado la selección de l_{dish} como variable explicativa del alcance. La aplicación de técnicas de regresión múltiple sobre un conjunto de muestras previamente depuradas, es decir, eliminadas aquellas cuya movilidad hubiera podido ser afectada por el efecto de retención de obstáculos locales y analizando separadamente las corrientes de derrubios de los movimientos traslacionales (como las poblaciones con mayor representación de muestras), ha dado como resultado una función para cada tipología, que es combinación lineal de varios factores y de cuya relación se destacan los siguientes aspectos:

- Influencia del volumen movilizado en la distancia recorrida por el deslizamiento, experimentando ambos mecanismos (corrientes y traslacionales), un mayor alcance cuanto mayor es la masa desprendida. Menor contribución muestra la variable l_{rdep} , condicionando a través de la movilidad, como respuesta a la energía disipada por deformación y fragmentación durante el desplazamiento, la distancia horizontal del movimiento.
- Definición de dos funciones de estimación del alcance de pequeños deslizamientos que combina dos variables l_{vol} y l_{rdep} de forma ponderada, considerando separadamente los mecanismos del movimiento:

- deslizamientos traslacionales:

$$l_{dish} = 0.452539l_{vol} - 0.295715l_{rdep} + 0.453831 \quad (r=0.89)$$

- corrientes de derrubios:

$$l_{dish} = 0.358151l_{vol} - 0.377182l_{rdep} + 0.701970 \quad (r=0.94)$$

Las funciones de regresión han evidenciado el control que el volumen ejerce sobre el alcance del movimiento, como bien ya habían indicado algunos autores (*Scheidegger, 1973; Hsü, 1975; David, 1982; Li, 1983*) mediante otros modelos estadísticos, si bien todos ellos expresaban la movilidad a través de la tangente del ángulo α del recorrido (H/L) que incluye la influencia de la altura de caída (H) en la distancia recorrida por el movimiento.

La interpretación que uno puede extraer de las funciones de regresión obtenidas en este estudio, puede ser equívoca al observar que el alcance es explicado únicamente mediante el volumen y la extensión que el movimiento sufre durante el desplazamiento (l_{rdep}) y asumir una total independencia de otros factores que pueden representar las condiciones topográficas del terreno, la presencia de obstáculos, etc.. El control que ejercen los obstáculos locales debidos a la presencia de vegetación en la movilidad de deslizamientos superficiales, ha sido comprobado en el análisis gráfico previo al de regresión. Ésto, junto con la constancia de la distinta movilidad de las tipologías morfológicas según el mecanismo de progresión, ha motivado un análisis del alcance para cada tipo por separado y con la exclusión de posibles obstáculos. No obstante, estos factores deben tenerse en cuenta cuando se realice un análisis conjunto de toda la muestra.

De igual modo, el alcance no se independiza de la altura de caída, aunque este factor no esté presente en la función, pues se ha observado en el análisis preliminar la total dependencia de la variable l_{dish} con este factor topográfico, lo que significa que la altura sí está reflejada en los resultados obtenidos por la regresión.

Finalmente hay que destacar, tal como indicó *Hsü (1975)*, que el procedimiento más correcto para una evaluación fiable del alcance es analizar independientemente los movimientos agrupados según los mecanismos de progresión, dada la distinta movilidad que muestran como consecuencia de la energía disipada por rozamiento y deformación durante el desplazamiento. Los resultados del estudio confirman también las explicaciones que hiciera *Heim (1932)* cuando expresaba la influencia de la irregularidad del recorrido, la altura de caída de la masa y el volumen desprendido, en la distancia recorrida por el deslizamiento.

Los elevados coeficientes de correlación y la validación de las funciones de regresión, mediante su aplicación sobre un número de muestras seleccionadas aleatoriamente, han confirmado la significación de éstas y consecuentemente su utilidad en la estimación del alcance, conociendo y asumiendo las limitaciones debidas a la dependencia de la variable explicada con la altura de caída y su consiguiente control sobre la distancia recorrida.

A pesar de estas limitaciones, las funciones pueden ser bastante útiles a la hora de delimitar de manera aproximada las áreas que se encuentran bajo riesgo.

Las futuras líneas de investigación deben estar dirigidas a mejorar la predicción de deslizamientos, cuyo conocimiento permite la adopción de medidas preventivas que eviten posibles daños o mitiguen sus efectos. Para ello es necesario mejorar los conocimientos que

actualmente se tienen sobre los factores que condicionan la rotura, así como los mecanismos que rigen el movimiento. Uno de los pasos a seguir en futuros trabajos, sería la utilización de sistemas de información geográficos (GIS) que permita un análisis potente en tiempos relativamente cortos y a la escala requerida por los objetivos del estudio (*Carrara et al., 1991; Chacón & Irigaray, 1992*).

La posibilidad de programar el GIS para el análisis multivariante hace que éste se muestre como una herramienta extremadamente útil con la que avanzar en el conocimiento del comportamiento de la ladera.

La metodología desarrollada en la Tesis para la evaluación de las condiciones de rotura e identificación de áreas potencialmente inestables, así como las condiciones de movilidad del deslizamiento, pueden ser aplicadas mediante un GIS, facilitando el análisis de estabilidad. La posibilidad de combinar información cualitativa, representada cartográficamente y cuantitativa mediante la conexión a una base de datos, permitiría un tratamiento multivariante mucho más eficaz.

Independientemente de la utilización de tecnologías más avanzadas representadas por los sistemas de información geográficos, uno de los aspectos en los que se debe profundizar para mejorar la predicción, es la definición de las variables utilizadas en el tratamiento de datos, así como la incorporación de otras nuevas con las que se pueda conseguir reflejar todo el conjunto de factores que condicionan la rotura y la movilidad del deslizamiento.

La buena caracterización de las condiciones de rotura y movilidad, ya es por si sola un aspecto en el que todavía resta mucho trabajo por realizar, sin embargo sería especialmente interesante dirigir esta línea de investigación hacia la identificación de las características que puede tener el movimiento en caso de inestabilidad, a partir únicamente de los atributos geológico-geomorfológicos o incluso geotécnicos del terreno. Es decir, se trataría de englobar todos los aspectos que separadamente se han tratado en la tesis y analizarlos conjuntamente, con el objeto de poder llegar a representar en un mismo mapa las zonas de mayor susceptibilidad, las probables tipologías del movimiento, dadas unas características del terreno y su alcance, que permitan obtener una valoración más completa de la peligrosidad y riesgo.

REFERENCIAS

- AGNESI, V.; CARRARA, A.; MACALUSO, S.; PIPITONE, G. & SORRISO-VALVO, M. (1983). "Elementi tipologici e morfologici dei fenomeni di instabilità dei versanti indotti dal sisma del 1980 (Alta Valle del Sele)". *Geologia applicata e idrogeologia* vol. XVIII parte I : 309-341.
- ALFORS, I.; BURNETT, J.L. & GAY, T.E. (1973). "Urban geology: Master plan for California. The nature, magnitude and cost of geology hazards in California and recommendations for their mitigation". *Bull. of Calif. Div. of Mines and Geology* 198, 112p. California Division of Mines and Geology, California.
- ALONSO, E. (1987). "Riesgos geológicos asociados a las avenidas y su previsión". En *Avenidas. Sistemas de previsión y alarma*. Berga & Dolz (Ed.): 37-58. Colegio de Ingenieros de Caminos. Madrid.
- ALONSO, E. (1989). "Análisis de la estabilidad de taludes. Casos simples". En: *Estabilidad de taludes y laderas naturales* (Corominas ed.). Monografía SEG 3 : 97-118.
- ALONSO, E. & GILI, J.A. (1988). "Integración de ensayos de laboratorio y del análisis retrospectivo en el proyecto de taludes en roca. Aplicación a las formaciones sedimentarias de la Sierra del Moixeró." En: *II Simposio sobre taludes y laderas naturales*. pp. 311-330. Andorra.
- ANAYI, J.T.; BOYCE, J.R. & ROGERS, C.D.F. (1989). "Modified Bromhead Ring Shear Apparatus". *Geotechnique Testing Journal, GTJODJ* vol. 12, 2 : 171-173.
- ANBALAGAN, R. (1992). "Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain". *Eng. Geology*, 32 : 269-277. Amsterdam.
- AUER, K. & SHAKOOR, A. (1993). "A statistical approach to evaluate debris avalanche activity in central Virginia". *Engineering Geology* 33 : 305-321.
- AYALA, F.; ELIZAGA, E. & GONZALEZ DE VALLEJO, L.I. (1987). "Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España". Serie geología ambiental I.G.M.E. Madrid 91 pp. + mapas.
- BALASCH, J.C. (1986). "La conca de Vallcebre (Alt Llobregat): Anàlisi de la dinàmica geomorfològica contemporània i balanç previ de sediments. Tesina de Llicenciatura. Facultat de Geologia (Universitat de Barcelona).
- BERCHTEN, I.D.; ANATRA, S. & ACKERMANN, T. (1988). "Protection measures against rock falls". In *Procced. 5th Int. Sys. on Landslides*. 1 : 1103-1106. Laussane.
- BISHOP, A.W.; GRENN, G.E.; GARGA, V.K.; ANDRESEN, A. & BROWN, J.D. (1971). "A new ring

REFERENCIAS

- shear apparatus and its applications to the measurement of residual strength". *Géotechnique* 21 (4) : 273-328.
- BJERRUM, L. (1967). "Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clays and clay shales". *Amer. Soc. Civil Eng. Proceed.* vol.93 paper 5456.
- BLONG, R.J. (1973). "Relationships between morphometric attributes of landslides". *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd. 18* : 66-77. Berlin.
- BOIS, P.; OBLED, C.; GOOD, W. (1975). "Multivariate data analysis as a tool for day-by-day avalanche forecast". *IAHS publication n° 114* : 391-403.
- BONNARD, Ch. & NOVERRAG, F. (1984) "Inestability risk maps: from the detection to the administration of landslides prone areas". In *IV Int. Symp. on Landslides v.2* : 511-516 Toronto.
- BOVIS, M.J. (1977). "Statistical forecasting of snow avalanches, San Juan Mountains, Southern Colorado, U.S.A.". *Journal of Glaciology* vol. 18 (78) : 87-99.
- BRABB, E.E. (1991). "The world landslide problem". *Episodes* v.14 (1) : 52-61.
- BRABB, E.E. & HARROD, B. (1989). "Landslide - extent and economic significance". Rotterdam, Netherlands A.A. Balkema, 385pp.
- BRABB, E.E.; PAMPEYAN, E.H. & BONILLA, M.G. (1972). "Landslide susceptibility in San Mateo Country, California". *US. Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF 360* scale 1:62.500.
- BRAND, E.W. (1985). "Predicting the performance of residual soil slopes". *Procc 11th Int. Conf. on Soil Mech and Found. Eng.* Ed. Balkema. 5 : 2541-2578.
- BRAND, E.W. & HUDSON, R.R. (1982). "CHASE - An emperical approach to the design of cut slopes in Hong-Kong soils". *Proc. 7th Southeast asian geotech. Conf.* 1: 1-16. Hong-Kong.
- BUCHANAN, P. & SAVIGNY, K.W. (1990). "Factors controlling debris avalanche initiation". *Canad. Geotechg. Journal* 27 : 659-675.
- BUSQUETS, P. (1981). "Estratigrafia i sedimentologia del terciari prepirinenc entre els rius Llobregat i Freser-Ter". Tesi doctoral. Fac. Geol. Univ. Barcelona (inédit).
- CAINE, N. (1980). "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flow". *Geografiska Ann* 62 : 23-27, Stockholm.
- CAMPBELL, R. H. (1980). "Landslide Map showing Field Classification, Point Dume Quadrangle, California". *US Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF 1167*, scale 1: 24.000.
- CANNON, S.H. (1986). "The lag rate and the travel-distance potencial of debris flows". *Geol. Soc. Amer. Abs. with prog.* vol.18 p.93.
- CANNON, S.H. (1989). "An evaluation of the travel-distance potencial of debris flows". *Utah Geol. and Mineral Survey Miscellaneous. Pub.* 89:2 35 p.
- CANNON, S. (1993). "An empirical model for the volume change behavior of debris flows". *Hydraulic Engineering '93 Proc. 1993 Conference San Francisco, CA ASCE* vol 2: 1768-1772.
- CANNON, S. & SAVAGE, W. (1988). "A mass-change model for the estimation of debris-flow runout".

Journal of Geology v.96 : 221-227.

CARRARA, A. (1983a). "Multivariate models for landslide hazard evaluation". *Mathematical Geology* V.15 : 403-426.

CARRARA, A. (1983b). "Geomathematical assessment of regional landslide hazard". In *4th Int.Conf. on the applications of statistics and probability in soil and structural engineering*. pp. 9-20.

CARRARA, A. (1984). "Landslide hazard mapping: aims and methods". *BRGM* 83 : 141-151

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; DETTI, R.; GUZZETTI, F.; PASQUI, V. & REICHENBACH, P. (1991). "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazards. *Earth Surf. Proc. and Landforms* 16 : 427-445.

CARRARA, A.; CATALANO, E.; SORRISO-VALVO, M.; REALLI, C. & OSSI, I. (1978). "Digital terrain analysis for land evaluation". *Geol. App. e Idrogeol.* 13 : 69-127.

CARRARA, A. & MERENDA, L. (1976). "Landslide inventory in Northern Calabria, Southern Italy". *Geological Society of American Bulletin* v.88 : 1153-1162.

CARRARA, A.; PUGLIESE, E. & MERENDA, L. (1977). "Computer-based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena". *Z. Geomorph. N.F.* 21(2) : 187-222. Berlin-Stuttgart.

CEDEX (1992). "Normas NLT". Ed. Cedex.

CHACON, J. & IRIGARAY, C. (1992). "Metodología para la elaboración de mapas de riesgos de movimientos de ladera. En *III Congreso Geológico de España*. v.2 : 620-627.

CHACON, J.; IRIGARAY, C.; FERNANDEZ, T. (1992). "Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un sistema de información geográfica". En *III Simp.Nac. sobre Taludes y Laderas inestables*. v.1 : 121-133. La Coruña.

CHACON, J.; NENEROUD, J-P; IRIGARAY, C.; BOUSSOUF, S.; CALVINO, A. (1992). "Análisis comparativo de metodologías para la elaboración de cartografías de exposición a los movimientos de ladera: aplicación al sector de Menton (Alpes Marítimos, Francia)". En *Prc. III Simp. Nac. sobre Taludes y Laderas Inestables*, v.1 : 95-106. La Coruña.

CHADULE, GRUPO (1980). "Iniciación a los métodos estadísticos en geografía". Ed. Ariel Barcelona. 275 p.

CLOTET, N. (1984). "La dinàmica geomorfològica actual responsable del subministrament de cabdals sòlids en una conca muntanyosa: La conca de La Baells (Alt Llobregat). Tesis doctoral. Facultat de geologia (Universitat de Barcelona).

CLOTET, N. & GALLART, F. (1983) "Fenómenos de deslizamiento producidos durante las lluvias torrenciales de Noviembre de 1982 en el Solsonès y Alt Berguedà: La Coma y Maçaners". Generalitat de Catalunya (inédito).

CLOTET, N. & GALLART, F. (1984) "Inventari de degradacions de vessants originades pels aiguats de Novembre de 1982, a les altes conques del Llobregat i Cardener". *Serv.Geol. Generalitat de Catalunya-Inst. Jaume almera CSIC* (inédito).

COATES, D.R. (1977). "Landslides perspectives". In: *Landslides*. D.R. Coates (Ed.) Geological Society of America. pp. 3-28.

REFERENCIAS

- COROMINAS, J. (1985). "Els riscos geològics". En: *Historia natural dels Països Catalans. Recursos geològics i sòls*. v.3 : 225-270.
- COROMINAS, J. (coordinador) (1985-1986). "Cartografía de riesgos geológicos de las comarcas de montaña del Pirineo Catalán. Escala 1:50.000 (Convenio con el Servei d'Acció Comarcal de Dpt. de Política territorial i Obres Públiques. Generalitat de Catalunya) (inédito).
- COROMINAS, J. (1986). "Identificación de taludes inestables". En *Jornadas de investigación aplicada en ingeniería geológica*. Universidad de Santander pp. 90-116.
- COROMINAS, J. (coordinador) (1989). "Cartografía de riesgos geológicos de los Valles del Gran Valira y Valira d'Orient, Principado de Andorra. Escala 1:25.000" (inédito) .
- COROMINAS, J. (coordinador) (1991). "Cartografía de riesgos geológicos de la cuenca del valle del Valira del Nord, Principado de Andorra. Escala 1:25.000" (inédito).
- COROMINAS, J. (coordinador) (1993). "General review on the landslide activity in the Eastern-Central Pyrenees Region". In *Rainfall induced landslides in selected mediterranean mountainous zones of Italy, Spain and Greece: the application of Geographic Information Systems to hazard mapping*. Programa EPOCH.
- COROMINAS, J. (1994). "The fahrboschung angle as a mobility index for small and large landslides". (in press).
- COROMINAS, J. & ALONSO, E. (1984). "Inestabilidad de laderas en el Pirineo catalán. Tipología y causas." En: *Actas jornadas de trabajo sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo*. pp.C.1-C.53 Barcelona.
- COROMINAS, J. & ALONSO, E. (1990). "Geomorphological effects of extrem floods (November 1982) in the Southern Pyrenees". *Hydrology in Mountainous Regions Artificial Reservoirs: water and slopes (Proceedings of two Lausanne Symposio)* pp.295-302.
- COROMINAS, J. & BAEZA, C. (1991). "Landslide occurrence in eastern Pyrenees". En: *Seminari su movimenti franosi e metodi di stabilizzazione*. Del Prette (Dir.). pp 25-42. Potenza .
- COROMINAS, J.; BAEZA, C. & SALUEÑA, I. (1991). "The influence of geometrical slope characteristics and land use on the development of shallow landslides". In *Landslides-Glissements de terrain*. New Zealand.
- COROMINAS, J.; ESGLEAS, J. & BAEZA, C. (1990). "Risk mapping in the Pyrennes area. A case study". *Hidrology in mountainous regions*. 194 : 425-428 IAHS.
- COROMINAS, J.; PEÑARANDA, R. & BAEZA, C. (1988). "Identificación de factores que condicionan la formación de movimientos superficiales en los valles del Llobregat y del Cardener". En *II Simposio de taludes y laderas inestables*. Corominas, J. & Alonso, E. (ed.) : 195-207. Andorra.
- CROZIER, M.J. (1973). "Techniques for the morphometric analysis of landslips". *Z. Geomorph.* 17 (1) : 78-101. Berlin.
- CROZIER, M.J. (1984). "Field assessment of slope stability". In *Slope stability* Brunsdén, D. & Prior, D.B. Ed. pp.103-142. New York.
- CROZIER, M.J. (1986). "Landslides. Causes, consequences & environment". Ed. Routledge. London & New York. 252 p.
- CUADRAS, C.M. (1991). "Métodos de análisis multivariante". Colección estadística y análisis de datos.

Ed. Eunibar. 644p.

DAVID, M.; DAGBRT, M.; BEAUCHEIMIN, Y. (1977). "Correspondence analysis". *Quarterly of the Colorado School of Mines*. v.72 : 1-45.

DAVIES, T.R.H. (1982). "Spreading of rock avalanches debris by mechanical fluidization". *Rock Mechanics* 15 : 9-24.

DILLON, W.R. & GOLDSTEIN, M. (1986). "Multivariate analysis. Methods and applications". Ed. John Wiley and Sons Ltd. 565p.

DRAPER, S.H. & SMITH, H. (1981). "Applied regression analysis" 2n ed. John Wiley and Sons, New York.

EISBACHER, G.H. (1979). "Cliff collapse and rock avalanches (sturzstroms) in the Mackenzie Mountains, northwestern Canada". *Canadian Geotech. Journal* 16 : 309-334.

FAKETTA, J.L. (1985). "Un nouveau modele de calcul des trajectoires de blocs rocheux". *Revue françoise de geotechnique* 30 : 11-17.

FOHN, P.; GOOD, W.; BOID, B.P. & OBLED, C. (1977). "Evaluation and comparison of statistical and convetional methods of forecasting avalanche hazard". *Jour. Glaciology* 19 : 375-387.

FOLCH, R. & FARRAS, A. (1984). "El mantell vegetal". En: *El patrimoni natural d'Andorra*. R.Folch (ed.) pp.77-110. Editorial Ketres. Barcelona.

FUKUZONO, M.J. & TERASHIMA, H. (1985). "Experimental study of slope failure in cohesive soils caused by rainfall". *Proc. Int. Sym. Erosion, Debris Flows and Disaster Prevention*, pp.347-350, Tsukuba.

GALLART, F. & CLOTET, N. (1983). "Dinámica a la conca de l'Alt Llobregat ". En *Efectes geomorfològics dels aiguats del Novembre de 1982*. Informes Publ.Serv.Geol. de Catalunya (Puigdefàbregas coord.). pp.47-114.

GALLART, F. & CLOTET, N. (1988). "Some aspects of the geomorphic processes triggered by an extreme rainfall event: The November 1982 flood in the Eastern Pyrenees". *Catena suppl. Bond* 13 : 79-95.

GAO, J. (1993). "Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEN (digital elevation model) in Nelson County, Virginia (USA)". *Earth Surface Processes and landforms* 8 : 579-591.

GILI, J.A. & GUTIERREZ, J.J. (1992). "Aplicación de un modelo de simulación de caída de bloques rocosos a casos reales". En *Proc. III Simp. Nac. sobre Taludes y Laderas naturales*, La Coruña. 1 : 15-26.

GILI, J.A.; HUERTA, A. & COROMINAS, J. (1993). "Contribution to the study of mass movements mudflows slide and block fall simulations". In *Proc. of Int. Workshop on rapid gravitational mass movements*. Grenoble.

GÖTZ, A. & ZIMMERMANN, M. (1993). "The 1991 rock slides in Randa: Causes and consequences". *Lanslide news* 7 : 22-25.

GRAY, D.H.; ASCE & SOTIR, R.B. (1992). "Biotechnical stabilization of Highway cut slope". *Journal of geotechnical Engineering* v.118 (9) : 1395-1409.

- GREENWAY, D.R. (1987). "Vegetation and slope stability". In *Slope Stability* ed Anderson & Richards. John Wiley and Sons Ltd pp.187-231.
- HAIGH, M.J.; RAWAT, J.S. & BARTARYA, S. (1988). "Environmental correlations of landslides frequency along new highways in the Himalaya: Preliminary results. *Catena* v.15 : 539-553.
- HANSEN, M.J. (1984). "Strategies for classification of landslides". In *Slope instability* by D. Brunsten : 1-25.
- HARTEVELT, J.A. (1970). "Geology of the Upper Segre and Valira Valleys, Central Pyrennes, Andorra/Spain". *Leidse Geol. Med.* 45 : 167-236.
- HARTLEN, J. & VIBERG, L. (1988). "Evaluation of landslide hazard". En Ch. Bonnard (ed.). *5th Int. Congr. on Landslides 2* : 1037-1057. Lausanne.
- HATANO, S. (1976). "A method of hazard classification for survival slides caused by heavy rainfall". *Proc. 13th Nat. Dis. Sci. Symp.* (13) : 3-4.
- HATANO, S. & OYAGI, N. (1977). "Landslides and their survey methods. *Chiri (Geography)* 22 (5): 56-71.
- HEAD, K.H. (1982). "Manual of soil laboratory testing". Pentech Press Ltd. Vol 2. 339 pp.
- HEIM, A. (1932). "Bergsturg und Menschenleben". Fretz und Wasmuth, Zürich. 218p. (Traducción inglesa por Skermer "Landslides and human lives". Vancouver, British Columbia, Bitech Publ.).
- HSÜ, K.J. (1975). "Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls". *Geol. Soc. Am. Bull.* v.86 : 129-140.
- HUTCHINSON, J.N. (1968). "Mass movements". In: *Encyclopaedia of Earth Sciences*. Fairbridge (Ed.). pp.688-695. Reinhold, New York.
- HUTCHINSON, J.N. (1988). "Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology". En *5th Int. Congr. on Landslides*. 1 : 3-35. Lausanne.
- JOHNSON, A.M. (1970). "Physical processes in geology". Freeman, Cooper & Co. San Francisco. 577p.
- JONES, F.O.; EMBODY, D.R. & PETERSON, W.L. (1961) "Landslides along the Columbia River Valley, Northeastern Washington". *Geolo. Surv. Prof. Paper* 367 : 1-94.
- KAWAKAMI, H. & SAITO, Y. (1984). "Landslide risk mapping by a quantification method". In *IV Int.Symp. on landslides v.2* : 535-540 Toronto.
- KENNEY, T.C. (1984). "Properties and behavior of soils relevant to slope instability". In: *Slope stability*. Brunsten & Prior (Ed.). Wiley, Chichester.
- KIM, J. (1975). "Factor analysis". In *Statistical package for the social sciences*. pp.468-513
- KINLONG, L & TONGZHEN, Z. (1988). "Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks". In *5th Int.Sym. on Landslide* Bonnard (ed.) : 1269-1272.
- KOJAN, E.; FOGGIN, G.T. & RICE, R.M. (1972). "Prediction and analysis of debris slide incidence by photogrammetry, Santa Ynez-San Rafael Mountains, California". In *Proc. 24th Int. Geol. Cong.* 13 : 124-131.

- LACHAPPELLE, E.R. (1977). "Snow avalanches: a review of current research and applications". *Journal of Glaciology* v.19 (81) : 313-324.
- LEBART, L.; MORINEAU, A. & FENELAN, J.P. (1982). "Traitement des données statistiques". Dunad Ed. Paris.
- LEIGHTON, F.B. (1976). "Urban landslides: targets for land-use planning in California". *Geological Society of America Special Paper* 173 : 89-96.
- LI, T. (1983). "A mathematical model for predicting the extent of a major rainfall". *Zeits. Geomorphol.* NF 27 : 473-482.
- LOPEZ, C. (1982). "Dinámica de los deslizamientos de materiales sobre pendientes naturales". VII Simp. Nac. Obras Superf. en Mec. Rocas. 1.2.5.1-2.5.1.6. Madrid.
- LUCCHITA, B.K. (1978). "A large landslide on Mars". *Geol. Soc. Am. Bull.* 89 : 1601-1609.
- LUMB, P. (1975). "Slope failures in Hong Kong". *Q. Journ. Eng. Geol.* 8 : 31-65, London.
- LUPINI, J.F.; SKINNER, A.E. & VAUGHAN, P.R. (1981). "The drained residual strength of cohesive soils". *Géotechnique* 31 (2) : 181-213.
- MACAU, F. (1963). "Previsión de los movimientos del terreno. Informaciones y estudios". *Boletín 16 Serv. Geol. MOP.* 83 pp.
- MARIE, R.F. (1988). "Les chutes de blocs dans le plan d'exposition aux risques de Gavarnie (Hautes Pyrénées, France)". *Proceed. of the fifth Inter. Symp. on Landslides* v.2 : 1197-1200.
- MARTIN VIDE, J. & RASO NADAL, J.M. (1983). "Marc atmosfèric". En: *Efectes geomorfològics dels aiguats de Novembre de 1982*. Publicacions del Servei Geològic de Catalunya, informe 1. pp.13-31.
- MASALLES, R. (1985). "Descripció de la vegetació i mesures de revegetació per a la fi de l'extracció de minerals a les parcel·les de Coll Paradell i torrent de les Llovateres (Serra d'Ensija)". Informe de F.E.C.S.A. (inèdit).
- MATTAUER, M. & SEURET, M. (1971). "Les relations entre la chaîne des Pyrénées et le galge de Gascogne". En: *Histoire structurale du golfe de Gascogne*. Debyser et al. (Ed.). IV.4 : 1-24. Technip, Paris.
- MORA, S. & VAHRSON, W.G. (1994). "Macrozonation methodology for landslide hazard determination". *Bull. of the Assoc. Eng. Geology* v.XXXI (1) : 49-58.
- MOSER, M. & HOHENSINN, F. (1983). "Geotechnical aspects of soils slips in Alpine Regions". *Engineering Geology* 19 : 185-211.
- MOYA, J.; COROMINAS, J.; GUTIERREZ, E. & VILAPLANA, J.M. (1992). "Datación de movimientos de ladera mediante la dendrocronología. Ejemplos de aplicación en el Pirineo oriental". 3er. Simp. Nac. Taludes y Laderas inestables. v.1 : 27-38. La Coruña.
- MULDER, H.F. (1991). "Assessment of landslide hazard" 150p. Ed. Faculty of Geographical Science. University of Utrecht.
- MULDER, H.F. & VAN ASCH T.W. (1987). "Quantitative approaches in landslide hazard zonation". In: *Geomorphologie et risques naturels. Travaux de l'Institut de Geographie de Reims* 69-72 : 43-53.

REFERENCIAS

- NADEN, P.S.; REED, D.W. & CALVER, A. (1991). "Rainfall analysis and hydrological hillslope modelling for slope stability in mountainous areas". En *Movimenti franosi e metodi di stabilizzazione. Progetto EPOCH*. Potenza 1991.
- NEULAND, H. (1976). "A prediction model of landslips" *Catena* v.3 : 215-230.
- NICOLETTI, P.G. (1989). "On the mobility of sturzstroms (rock avalanches): a comparison between probabilistic prediction models". *Bull. Soc. Geol. Int.* 108 : 419-429.
- NICOLETTI, P.G. (1991). "Rock avalanches risk of Plati, Southern Italy". In *Landslide*. Bell (Ed.) 2 : 1031-1036.
- NICOLETTI, P.G. & SORRISO-VALVO, M. (1991). "Geomorphic controls of the shape mobility of rock avalanches". *Geol.Soc. of American Bulletin* v.103 : 1365-1373.
- NIE, N.H.; HULL, C.H.; JENKENS, J.G.; STEINBRENNER, K. & BEND, O.M. (1981). *Statistical package for the social sciences. Supplement 2*. Ed. McGraw-Hill New York.
- NILSEN, T.H.; WRIGHT, R.N.; VLASIC, T.C. & SPANGLE, W.E. (1979). Relative slope stability on land-use planning in the San Francisco Bay Region, California". *US. Geol. Surv. Prof. Paper* 944, 96 pp.
- NORUSIS, M.J. (1985). "Advanced statistics guide SPSS-X". Ed. McGraw-Hill. New York.
- NOVOA, M. (1984). "Precipitaciones y avenidas extraordinarias en Catalunya". *Actas jornadas de trabajos sobre Inest. Laderas en el Pirineo*. pp. I 1.1-5.1 . Barcelona.
- OGAWA, S. & KAWAMURA, K. (1989). "Topographical consideration for landslide prediction". In *Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. and Found Eng.* 3 : 1587-1590. Rio de Janeiro.
- O'LOUGHLIN, E.M. (1986). "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis". *Water Resources Research* v.22 (5) : 794-804.
- ONODERA, T.; YOSHINAKA, R. & KAZAMA, H. (1974). "Slope failures caused by heavy rainfall in Japan". *Proc. 2nd Int. Congr. Int. Eng. Geol.* V.11.1-V.11.10, Sao Paulo.
- OKIMURA, T. (1983). "A prediction system for the site of probable surface failure of mountain-slope by topographical factors". *Proc. J.S.C.E.* 338 : 131-138.
- OYAGI, N. (1984). "Landslides in weathered rocks and residuals soils in Japan and surrounding areas: A state of the art report". In *IV Int.Congress Landslides* v.3 : 1-31. Toronto.
- PEÑA SANCHEZ de RIVERA, D. (1992). "Estadística, modelos y métodos" 1. Fundamentos y 2. Modelos lineales y series temporales. Ed. Alianza U.T.
- PERROT, A. (1988). "Cartographie des risques de glissements en Lorraine". In *Landslides Bonnord* (ed.) v.2 : 1217-1222.
- PETLEY, D.J. (1984). "Ground investigation, sampling and testing for studies of slope instability". In *Slope Instability*, 67-101.
- PRIOR, D.B. (1978). "Some recent progress and problems in the study of mass movement in Britain". In *Geomorphology present problems and future prospects*. (Embleton ed.) 84-106.
- PUIGDEFABREGAS, C.; SERRAT, D. & VILAPLANA, J.M. (1979). "El medi geològic". En: *Patrimoni*

natural d'Andorra. R.Folch (Ed.). pp.15-39. Editorial Ketres, Barcelona.

RADBRUCH-HALL, D.R.; COLTON, R.B.; DAVIS W.E.; SKIPP, B.A.; LUCCHITTA, I. & VARNES, D.J. (1976). "Preliminary Landslide Overview Map of the Conterminous United States". *US Geol. Surv. Misc. Field Studies Map*, MF. 771.

RAPP, A. (1960). "Recent developments of mountain slopes in Kärkevagge and surroundings". *Gefragiska Ann.* 42 : 65-200. Stockholm.

REGER, J.P. (1979). "Discriminant analysis as a possible tool in landslide investigations". *Earth Surface Processes* v.4 : 267-273.

RENAU, S.; DIETRICH, W.; DONAHUE, D.; JULI, A. & RUBIN, M. (1990). "Late Quaternary history of colluvial deposition and erosion in Hollows, Central California Coast Ranges". *Geol. Soc. of American Bull.* v.102 : 969-982.

RICE, R.M. & LEWIS, J. (1991). "Estimating erosion risks associated with logging and forest roads in Northwestern California". *Water Res. Bull (US)* 27(5) : 809-818.

RIEMER, W.; RUPPERT F.R.; LOCHER, T.C. & NUÑEZ, I. (1988). "Regional assessment of slide hazards". En *5th Int. Sym. on Landslides*. 1 : 1223-1226. Laussane.

ROCHET, L. (1987). "Application des modeles numeriques de propagation a l'etude des sbolements rocheaux". En *Risques Naturels. Bull. Liaison Ponts et Chaus.* 150-151 : 84-95. Paris.

RODRIGUEZ, J. (1987). "Corrección, instrumentación y control de movimientos del terreno". En *Cursos de Riesgos geológicos*. Madrid.

SASSA, K. (1988). "Geotechnical model for the motion of landslides". *Proc. 5th Int. Congr. on Landslides*. Laussane v.1: 37-55.

SCHEIDEGGER, A. (1973). "On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides". *Rock Mechanics* 5 : 231-236.

SEGURET, M. (1972). "Etude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées". *Pub. USTELA du Serv. Geol. Struct.* n°2. Montpellier.

SELBY, M.J. (1967). "Aspects of the geomorphology of the Greywacke Ranges bordering the lower and middle Waikato Basins". *Earth Science Journal* 1 : 37-58.

SERRAT, D. & VILAPLANA, J.M. (1979). "El relleu i la xarxa hidrogràfica". En: *El Patrimoni Natural d'Andorra*. R.Folch (Ed.) pp. 41-53. Ed. Ketres, Barcelona.

SHARPE, C.F.S. (1938). "Landslides and their control". Academia & Elsevier, Prague. 205 pp.

SHREVE, R.P. (1968). "Leakage and fluidization in air-layer lubricated avalanches". *Geol.Soc.America Bull.* v.79 : 653-658.

SKEMPTON, A.W. (1953). "Soil mechanics in relation to geology". *Proc. Yorkshire Geol. Soc.* 29 : 33-62.

SKEMPTON, A.W. (1985). "Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory". *Géotechnique* 35 (1) : 3-18.

SKEMPTON, A.W. & HUTCHINSON, J.N. (1969). "Stability of natural slopes and embankment

REFERENCIAS

- foundations". State-of-the-Art Report. *7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Mexico* 291-335.
- SKEMPTON, A.W. & NORTHEY, R.D. (1952). "The sensitivity of clays". *Geotechnique* 3(1) : 30-53.
- SKERMER, N.A. (1985). "Discussion of paper Naure and mechanics of the Mount Saint Helens rockslide-avalanche of 18 May 1980". *Geotechnique* 35 : 357-362.
- SIEDLE, R.C.; PEARCE, A.J. & O'LAUGHIN, C.O. (1985). "Hillslope stability and land use". *Am. Geophys. Water Res. Man.* 11 : 1-140.
- SINCLAIR, T.J. (1991) "SCARR: A slope condition and risk rating". In: *Landslide*, Bell (ed.) 2 : 1057-1064.
- SMITH, T.C. (1988). "A method for mapping relative susceptibility to debris flows, with an example from San Mateo County". *USGS Profesional Paper* 1434 : 185-194.
- SOLÉ SUGRAÑÉS, L. (1970). "Estudio geológico del Prepirineo español entre los ríos Segre y Llobregat". Tesis doctoral. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona (inédita).
- SOLÉ SUGRAÑÉS, L. (1973). "Algunos aspectos de la tectónica del Prepirineo Oriental entre los ríos Segre y Llobregat". *Acta Geol. Hispánica* t.VIII (3) : 81-89.
- SPANG, R.M. (1988). "Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications". In *Proc. of the 5th Int. Symp on Landslides* 2 : 1237-1244. Lausanne.
- SPSS INC. (1988). "SPSS-X Users Guide". 3rd edition. Gorinchen. 1072 pp.
- STEVENSON, P.C. (1977). "An empirical method for the evaluation of relative landslide risk". *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 16 : 69-72.
- TAKESHITA, K. (1971). "Estimations of mountain disasters occurrence on their location analysis on the Kitakyushu". *Bull. Mountain Cosv. I Dep. Forestry, Fukuova Pref.* pp. 1-85.
- TOMASSONE, R.; LESQUOY, E. & MILLER, C. (1983). "La régression. Nouveaux regards sur une ancienne. Methode statistique". *Actualités scientifiques et agronomiques* n° 13. Ed. Masson. 177pp.
- VAN ASCH & VAN STEIJN (1991). "Temporal patterns of mass movements in the French Alps". *Catena* 18 : 515-527, Cremlingen.
- VAN GASSEN, W. & CRUDEN, D.M. (1989). "Momentum transfer and friction in the debris of rock avalanches". *Canadian Geotechnical journal* 26 : 623-628.
- VARNES, D.J. (1958). "Landslide types and processes". In: *Landslides and Engineering Practice*. B.Eckel (ed.) Highway Research Board Special Report 29 : 20-47. Washington.
- VARNES, D.J. (1978). "Slope movement types and processes". In: *Landslides analysis and control*. Special Report 176 : 11-33.
- VARNES, D.J. (1984). "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". *Natural Hazard Z.*, UNESCO, Paris, 63 pp.
- VOIGHT, B. (1989). "Material science law applied to time forecast of slope failure". *Landslide News*, 3 : 8-11, Tokyo.
- WIECZOREK, G.F.; SARMIENTO, J. (1988). "Landslides, floods and marine effects of the storm of Jan.

3-5 1982 in San Francisco Bar Region, California: rainfall, piezometric levels and debris flows near La Habana, California in storms between 1975 and 1983". *USGS Prop. pap.* 1434 : 43-63.

YAN, T.Z. (1988). "Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China". In *5th Int. Sym. on Landslides 1* : 1263-1268, Laussane.

YIN, K.L. & YAN, T.Z. (1988). "Statistical prediction models for slope inestability of metamorphosed rocks". In *5th Int.Symp. on Landslides Bonnard(ed.) v.2* : 1269-1272.

ZHONG, X.; LIU, T.; WANG, Y. & LUO, J. (1985). "The main features of debris flows and control structures in Hunshui Gully, Yuannan Province, China". In *Int. Sym. on Erosion, Debris flows and Disaster Prevention*. 181-186. Tsukuba.

ZIEMER, R.R. (1981). "Roots and the stability of forested slopes". En *Erosion and sediment transport in pacific Rim steeplands*, *Int. Assoc. Hydrolog. Sciences.* publication 132 : 343-361 London.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. (a) Mapa de pendientes, (b) mapa litológico y (c) mapa de susceptibilidad del sector de Periana, Málaga (Chacón et al., 1992).

FIGURA 1.2. Mapa de inestabilidad de laderas de Buonamico, Calabria, mediante análisis discriminante (Carra, 1983a).

FIGURA 1.3. Gráfica de aplicación de métodos numéricos para el cálculo de trayectorias de caída de bloques en San Carlos de la Rápita, Tarragona (Gili et al., 1993).

FIGURA 1.4. Gráficos de movilidad de deslizamientos. Representación del volumen de la masa movilizada respecto a la relación entre el desnivel y la distancia horizontal del recorrido.

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

FIGURA 3.1. Localización de las áreas de estudio.

FIGURA 3.2. Geología y estructura general de los Pirineos (Mattauer & Seguret, 1971).

FIGURA 3.3. Columna estratigráfica de los materiales de Andorra (Puigdefábregas, 1979).

FIGURA 3.4. Esquema estructural del Prepirineo entre los ríos Segre y Llobregat (Solé Sugrañés, 1973).

FIGURA 3.5. Distribución de las lluvias del 7 de Noviembre de 1982 (Corominas & Alonso, 1990).

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 Gòsol (Solsonès).

FIGURA 3.9. Movimiento de flujo próximo al Torrent de la Masella en Gosòl (Solsonès).

FIGURA 3.10. Desprendimientos en los bancos calizos garumnienses de Vallcebre, Berga.

FIGURA 3.11. Vista general de la colada de La Coma (Solsonès).

FIGURA 3.12. Deslizamiento traslacional y corrientes de derrubios en la zona próxima a La Pobla de Lillet (Berguedà).

FIGURA 3.13. Corrientes de derrubios de La Coma (Solsonès).

FIGURA 3.14. Movimiento planar-traslacional (Pedra, Berguedà).

FIGURA 3.15. Movimiento con rotura rotacional (Cercs, Berguedà).

FIGURA 3.16. Movimiento rotacional con flujo (La Pobla de Lillet).

FIGURA 3.17. Desprendimientos (Cercers, Andorra).

FIGURA 3.18. Movimiento con rotura plana y progresión de la masa como corriente de derrubios (Sant Llorenç de Morunys, Solsonès).

FIGURA 3.19. Corrientes de derrubios, próximos a las bordes de Montaup, Andorra.

FIGURA 3.20. Movimiento rotacional con flujo (Coll de Port, Solsonès).

FIGURA 3.21. Características del depósito de una colada (Berga).

FIGURA 3.22. Colada en las proximidades de Cercs (Berguedà).

FIGURA 3.23. Representación de las muestras de laboratorio en el gráfico de Casagrande.

FIGURA 4.1. Diagrama de flujo de la metodología de análisis general.

FIGURA 4.2. Parámetros morfométricos del inventario.

FIGURA 5.1. Histograma de frecuencias de las variables lespem y lddl.

FIGURA 5.2. Histograma de frecuencias de las variables phi y lamsu.

FIGURA 5.3. Histograma de frecuencias de las variables lamin y lvol.

FIGURA 5.4. Histograma de frecuencias de las variables delt y ldish.

FIGURA 5.5. Histograma de frecuencias de las variables tana y lramp.

FIGURA 5.6. Histograma de frecuencias de las variables lrsfe y lrlon.

FIGURA 5.7. Histograma de frecuencias de las variables lralt y lgrfs.

FIGURA 5.8. Histograma de frecuencias de las variables tsub y lrdep.

FIGURA 5.9. Resultados del análisis factorial del conjunto de variables que caracterizan el movimiento de masa.

FIGURA 5.10. Proyección de las variables que caracterizan el movimiento en un espacio tridimensional formado por tres factores.

FIGURA 5.11. Resultados del análisis discriminante -función 1 y 2- para los movimientos con rotura planar y rotacional.

FIGURA 5.12. Histograma de frecuencias de la función (1) (2) para la población planar y rotacional.

FIGURA 5.13. Histograma de frecuencias y clasificación de la función discriminante (1) (2) para la población planar y rotacional.

FIGURA 5.14. Resultados del análisis discriminante -función 3 y 4- para los movimientos con rotura planar y rotacional. Exclusión de la variable lgrfs.

FIGURA 5.15. Histograma de frecuencias y clasificación de la función discriminante (3) (4) para la población planar y rotacional.

FIGURA 5.16. Representación de tres grupos en un espacio factorial y esquema del proceso de discriminación.

FIGURA 5.17. Representación de los vectores de las variables que caracterizan el tipo de progresión del movimiento en un espacio tridimensional definido por F1 y F2.

FIGURA 5.18. Resultados del análisis discriminante -función F1 y F2- para las muestras según el tipo de progresión del movimiento.

FIGURA 5.19. Resultados del análisis discriminante para el tipo de progresión del movimiento , con la exclusión de las variables Irlon y Iralt.

FIGURA 5.20. Resultados del análisis discriminante -función 5 y 6- aplicado a coladas y corrientes de derrubios.

FIGURA 5.21. Hisyograma de frecuencias y clasificación de la función discriminante (5) (6) para los movimientos tipo flujo.

FIGURA 5.22. Resultados del análisis discriminante -función 7 y 8- aplicado a flujos con la exclusión de la variable tsub.

FIGURA 5.23. Histograma de frecuencias y clasificación de la función discriminante (7) (8) para flujos.

FIGURA 6.1. Histograma de frecuencias de las variables tanig y tancg para el conjunto de laderas estables e inestables.

FIGURA 6.2. Histograma de frecuencias de las variables ldisc y lcon para el conjunto de laderas estables e inestables.

FIGURA 6.3. Histograma de frecuencias de las variables lgrfs y lnoq para el conjunto de laderas estables e inestables.

FIGURA 6.4. Histograma de frecuencias de las variables trel, tcar, tusr y tsub para el conjunto de laderas estables e inestables.

FIGURA 6.5. Proyección de las variables que caracterizan las laderas estables e inestables, en un espacio tridimensional formado por los tres factores principales.

FIGURA 6.6. Resultados del análisis de componentes principales, de las variables de la ladera, con la extracción de los tres primeros factores.

FIGURA 6.7. Resultados del análisis de componentes principales, de las variables de la ladera, con la extracción de los siete primeros factores.

FIGURA 6.8. Resultados del análisis discriminante -función 5 y 6- de la población estable e inestable.

FIGURA 6.9. Histograma de frecuencias de la pendiente natural en la zona de rotura (tanig) para laderas estables e inestables.

FIGURA 6.10. Histograma de frecuencias de la pendiente natural en la zona de rotura (tanig) de las zonas inestables según la litología.

FIGURA 6.11. Histograma de frecuencias de la pendiente natural (tanig) para los movimientos planos y rotacionales.

FIGURA 6.12. Histograma de frecuencias de la pendiente natural (tanig) de los deslizamientos según el tipo de progresión.

FIGURA 6.13. Histograma de frecuencias de la cuenca vertiente (lcon) para laderas estables e

inestables.

FIGURA 6.14. Histograma de frecuencias de la cuenca vertiente (lcon) para movimientos planos y rotacionales.

FIGURA 6.15. Histograma de frecuencias de la cuenca vertiente (lcon) para deslizamientos traslacionales, coladas y corrientes de derrubios.

FIGURA 6.16. Histograma de frecuencias del perfil transversal (trel) en la zona de rotura para las laderas estables e inestables.

FIGURA 6.17. Histograma de frecuencias del grosor de la formación superficial (grfs) de las laderas inestables.

FIGURA 6.18. Relación entre el grosor de la formación superficial (grfs) y la pendiente natural en la zona de rotura (tanig) para las laderas estables y movimientos con rotura plana.

FIGURA 6.19. Histograma de frecuencias de la pendiente desde la zona de rotura a la cresta (tancg) para los movimientos planos y rotacionales.

FIGURA 6.20. Fotografía que ilustra el cambio de pendiente en el perfil longitudinal de la ladera.

FIGURA 6.21. Ilustración gráfica del proceso discriminante para dos grupos y dos variables.

FIGURA 6.22. Histograma de frecuencias de la función discriminante (5).

FIGURA 6.23. Histograma de frecuencias y clasificación de la función discriminante (5).

FIGURA 6.24. Histograma de frecuencias y clasificación ($F=-0.4$) de la función discriminante (5).

FIGURA 6.25. Resultados del análisis discriminante -función 7 y 8- en la separación de laderas estables e inestables con la incorporación de la variable tusr.

FIGURA 6.26. Histograma de frecuencias y clasificación ($F=0$) de la función discriminante (7).

FIGURA 6.27. Histograma de frecuencias y clasificación ($F=-0.4$) de la función discriminante (7).

FIGURA 6.28. Histograma de frecuencias de la orientación (orie) de las laderas estables e inestables.

FIGURA 6.29. Número de movimientos de masa respecto la precipitación total de cada estación de medida (Gallart & Clotet, 1988).

FIGURA 6.30. Histograma de frecuencias de la latitud (alca) de las laderas estables e inestables.

FIGURA 6.31. Tabla de datos de precipitación y altitud (a). Relación entre la precipitación y la altitud (b).

FIGURA 6.32. Matriz de correlaciones de las variables que caracterizan la ladera incluidas orie y alca. Estadísticos finales del análisis factorial.

FIGURA 6.33. Resultados del análisis discriminante -función 9 y 10- para las variables que caracterizan la ladera.

FIGURA 6.34. Histograma de frecuencias de la función (9) para las laderas estables e inestables.

FIGURA 6.35. Histograma de frecuencias y clasificación ($F=0$) de la función discriminante (9).

FIGURA 6.36. Resultados del análisis discriminante para las laderas estables e inestables, tras la exclusión de tcar.

FIGURA 6.37. Histograma de frecuencias y clasificación de la función discriminante con la exclusión de tcar.

FIGURA 7.1. Histograma de frecuencias de las variables lvol y ldish para caracterizar la movilidad y alcance.

FIGURA 7.2. Histograma de frecuencias de las variables tana y lrdep para caracterizar la movilidad y alcance.

FIGURA 7.3. Histograma de frecuencias de las variables delt para caracterizar la movilidad y alcance.

FIGURA 7.4. Resultados del análisis factorial de las variables de movilidad.

FIGURA 7.5. Relación entre el ángulo del recorrido (tana) y el volumen (lvol) del deslizamiento.

FIGURA 7.6. Relación entre el ángulo del recorrido (tana) y el volumen (lvol) para los movimientos traslacionales y caída de bloques.

FIGURA 7.7. Representación gráfica del ángulo del recorrido (tana) y el volumen, para las caídas de bloques diferenciando el tipo de recubrimiento vegetal.

FIGURA 7.8. Representación gráfica del ángulo del recorrido (tana) y el volumen, para las corrientes de derrubios diferenciando el tipo de recubrimiento vegetal.

FIGURA 7.9. Representación gráfica de tana respecto la pendiente δ , separando los deslizamientos según el tipo de recubrimiento de la ladera.

FIGURA 7.10. Representación gráfica de tana respecto la pendiente δ , diferenciando las muestras en función del valor de la variable lrdep.

FIGURA 7.11. Representación gráfica del desnivel y la variable tana según el tipo de progresión del movimiento.

FIGURA 7.12. Representación gráfica del desnivel y la variable tana para las corrientes de derrubios, diferenciando el tipo de recubrimiento de la ladera.

FIGURA 7.13. Representación gráfica del volumen y la distancia horizontal recorrida (ldish), diferenciando el tipo de progresión del movimiento.

FIGURA 7.14. Representación gráfica de la distancia horizontal recorrida (ldish) respecto el desnivel, diferenciandola muestra según el volumen movilizado.

FIGURA 7.15. Representación gráfica de la distancia horizontal recorrida (ldish) inferior a 350m, respecto el desnivel, diferenciandola muestra según el volumen movilizado.

FIGURA 7.16. Representación gráfica de la distancia horizontal recorrida (ldish) respecto del desnivel, diferenciando las muestras según el valor de la variable lrdep.

FIGURA 7.17. Representación gráfica del volumen y el índice de movilidad (*Hsü, 1975*), diferenciando los movimientos según el tipo de progresión.

FIGURA 7.18. Gráfico de los valores observados/esperados por la función de regresión 11 para los movimientos traslacionales.

FIGURA 7.19. Gráfico de los valores observados/esperados por la función de regresión 12 para las corrientes de derrubios.

FIGURA 7.20. Gráfico de los residuos respecto a los valores estimados por la función de regresión 11 (a) y 12 (b).

FIGURA 7.21. Gráfico de los residuos respecto las variables $lrdep$ y $lvol$ obtenidos por la función de regresión 11 (a) y 12 (b).

FIGURA 7.22. Gráficos parciales de los residuos obtenidos por la función de regresión 11 (a) y 12 (b).

FIGURA 7.23. Representación conjunta de las muestras originales y las cinco muestras de validación de la función de regresión 11.

FIGURA 7.24. Representación conjunta de las muestras originales y las cinco muestras de validación de la función de regresión 12.

FIGURA 8.1. Situación geográfica de la zona piloto.

FIGURA 8.2. Límites de la zona piloto en la Cuenca de Vallcebre (Berguedà).

FIGURA 8.3. Esquema geológico de la Cuenca de Vallcebre (*Balash, 1986*).

FIGURA 8.4. Resultados del análisis discriminante -función (11)- para la separación de laderas estables e inestables.

FIGURA 8.5. Histograma de frecuencias y clasificación ($F=0.3$) de la función 11 de la muestra original.

FIGURA 8.6. Histograma de frecuencias de los valores discriminantes obtenidos de la aplicación de la función 11 a cada celda de la malla del mapa.

FIGURA 8.7. Histograma de frecuencias de los valores discriminantes obtenidos de la aplicación de la función CU a la zona piloto.

FIGURA 8.8. Histograma de frecuencias de los valores discriminantes obtenidos de la aplicación de la función SN a la zona piloto.

FIGURA 8.9. Histograma de frecuencias que refleja el grado de ajuste de las funciones aplicadas a la zona piloto.

FIGURA 8.10. Distribución de los deslizamientos observados en los cinco niveles de susceptibilidad obtenidos de la función discriminante.

FIGURA 8.11. Mapa de clasificación de áreas estables e inestables.

FIGURA 8.12. Mapa con los cinco niveles de susceptibilidad.

FIGURA II.1a,b. Resultados de los ensayos de identificación de las muestras VAL-8180R, VAL-8182R y FUM-8184R (*Garumniense*).

FIGURA II.2. Distribución granulométrica de la muestra GOS-052R (*Keuper*).

FIGURA II.3. Distribución granulométrica de la muestra GOS-81101R (*Keuper*).

FIGURA II.4. Distribución granulométrica de la muestra L26(1)1 (*Garumniense*).

FIGURA II.5. Distribución granulométrica de la muestra VAL-8191R (*Garumniense*).

FIGURA II.6. Distribución granulométrica de la muestra COM-8195R (*Ilerdiense*).

FIGURA II.7. Distribución granulométrica de la muestra COM-8196R (*Ilerdiense*).

FIGURA II.8. Distribución granulométrica de la muestra L25(1)2 (*Cuaternario*).

FIGURA II.9. Distribución granulométrica de la muestra L81S (*Cuaternario*).

FIGURA II.10. Límites de Atterberg de la muestra GOS-052R (*Keuper*): Límite líquido (LL)=38.6; Límite plástico (LP)=26.5 y Índice de plasticidad (IP)=12.1.

FIGURA II.11. Límites de Atterberg de la muestra GOS-8194R (*Keuper*): LL=29.4; LP=17.2 y IP=12.3.

FIGURA II.12. Límites de Atterberg de la muestra VAL-8181R (*Garumniense*): LL=41.5; LP=20.5 y IP=21.0.

FIGURA II.13. Límites de Atterberg de la muestra CER-8192R (*Garumniense*): LL=36.5; LP=21.2 y IP=15.4.

FIGURA II.14. Límites de Atterberg de la muestra COM-8195R (*Ilerdiense*): LL=39.7; LP=21.1 y IP=18.6.

FIGURA II.15. Límites de Atterberg de la muestra COM-8196R (*Ilerdiense*): LL=44.4; LP=26.7 y IP=17.7.

FIGURA II.16. Límites de Atterberg de la muestra L25(2)2 (*Cuaternario*): LL=43.9; LP=30.0 y IP=13.9.

FIGURA II.17. Límites de Atterberg de la muestra POB-8190R (*Cuaternario*): LL=45.7; LP=27.7 y IP=17.9.

FIGURA II.18. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra GOS-81101R (*Keuper*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.19. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra FUM-8191R (*Garumniense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.20. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra GOS-0049R (*Garumniense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.21. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra VAL-81100R (*Garumniense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.22. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra COM-101R (*Ilerdiense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.23. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra COM-102R (*Ilerdiense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.24. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra COM-8196R (*Ilerdiense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.25. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra POB-081S (*Cuaternario*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.26. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra POB-079S (*Cuaternario*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.27. Resultados del ensayo de corte anular para la muestra GOS-052R (*Keuper*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.28. Resultados del ensayo de corte anular para la muestra FUM-8191R (*Garumniense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.29. Resultados del ensayo de corte anular para la muestra GOS-102R (*Garumniense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.30. Resultados del ensayo de corte anular para la muestra GOS-101R (*Garumniense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.31. Resultados del ensayo de corte anular para la muestra COM-8196R (*Ilerdiense*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.32. Resultados del ensayo de corte anular para la muestra POB-8189S (*Cuaternario*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.33. Resultados del ensayo de corte anular para la muestra POB-8197S (*Cuaternario*). Gráfica de tensión (τ)-desplazamiento horizontal(d_h).

FIGURA II.34. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra GOS-81101R (*Keuper*).

FIGURA II.35. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra GOS-052R (*Keuper*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte anular.

FIGURA II.36. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra FUM-8191R (*Garumniense*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte anular.

FIGURA II.37. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra GOS-049R (*Garumniense*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte directo.

FIGURA II.38. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra VAL-81100R (*Garumniense*).

FIGURA II.39. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra GOS-102R (*Garumniense*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte anular.

FIGURA II.40. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra GOS-101R (*Garumniense*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte anular.

FIGURA II.41. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra COM-101R (*Ilerdiense*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte directo.

FIGURA II.42. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra COM-102R (*Ilerdiense*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte directo.

FIGURA II.43. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra COM-8196R (*Ilerdiense*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte anular.

FIGURA II.44. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra POB-081S (*Cuaternario*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte directo.

FIGURA II.45. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra POB-079S (*Cuaternario*). Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte directo.

FIGURA II.46. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra POB-8189S (*Cuaternario*).

Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte anular.

FIGURA II.47. Gráfica de tensión de corte (τ)-tensión normal (σ), muestra POB-8197S (Cuaternario).
Valor de ϕ_r' obtenido del ensayo de corte anular.

LISTA DE TABLAS

- TABLA 1.1. Movimientos de ladera en el Pirineo Catalán en los últimos 10 años (Corominas, 1993).
- TABLA 3.1. Tabla granulométrica de las unidades litoestratigráficas estudiadas.
- TABLA 3.2. Tabla de coeficientes de permeabilidad de las unidades litoestratigráficas estudiadas.
- TABLA 3.3. Tabla de valores de humedad y densidades de las unidades litoestratigráficas estudiadas.
- TABLA 3.4. Tabla de valores de los límites de Atterberg de las unidades litoestratigráficas estudiadas.
- TABLA 3.5. Tabla de los valores del ángulo de rozamiento pico, residual y cohesión de las unidades litoestratigráficas estudiadas.
- TABLA 4.1. Tabla de las variables cuantitativas y cualitativas utilizadas en los análisis.
- TABLA 5.1. Resultados del test de normalidad de las variables que caracterizan los movimientos.
- TABLA 5.2. Matriz de correlaciones de las variables que caracterizan el movimiento de masa.
- TABLA 5.3. Resultados del test t de las variables que caracterizan el tipo de rotura del movimiento.
- TABLA 5.4. Resultados del test t de las variables que caracterizan el tipo de progresión del movimiento.
- TABLA 5.5. Resultados del análisis Oneway de las variables que caracterizan el tipo de rotura y progresión del movimiento.
- TABLA 5.6. Resumen de los análisis discriminantes para el tipo de rotura del movimiento.
- TABLA 5.7. Resumen de clasificación de las funciones discriminantes F1 y F2 para el tipo de progresión del movimiento.
- TABLA 5.8. Resumen de los análisis discriminantes realizados para caracterizar el tipo de progresión del movimiento.
- TABLA 5.9. Resumen de los análisis discriminantes realizados para caracterizar el tipo de flujo.
- TABLA 6.1. Resultados del test de normalidad de las variables que caracterizan el conjunto de muestras estables e inestables.
- TABLA 6.2. Resultados del test t para las variables que caracterizan la ladera según la litología.
- TABLA 6.3. Resultados del test t para las variables que caracterizan la ladera agrupadas según el tipo de ladera (estable/inestable).
- TABLA 6.4. Resultados del test Oneway para las variables que caracterizan la ladera, agrupadas según el tipo de ladera (estable/inestable).
- TABLA 6.5. Resumen de los análisis discriminantes en la separación de laderas estables e inestables.

TABLA 6.6. Frecuencia de deslizamientos en el área de estudio según el tipo de cobertera vegetal.

TABLA 6.7. Relación entre la orientación de la ladera y el tipo de cobertera vegetal.

TABLA 6.8. Resultados del test Oneway para las variables que caracterizan la ladera, incluida orie y alca.

TABLA 6.9. Resultados del test t para las variables que caracterizan la ladera, incluida orie y alca.

TABLA 7.1. Resultados del test de normalidad de las variables de movilidad.

TABLA 7.2. Valores medios y desviación estandar de las variables de movilidad.

TABLA 7.3. Resumen de los parámetros estadísticos de la función de regresión 11 (grupo de movimientos traslacionales).

TABLA 7.4. Resumen de los parámetros estadísticos de la función de regresión 12 (grupo de corrientes de derrubios).

TABLA 7.5. Valores observados, estimados y error de estimación de la distancia horizontal recorrida, para las cinco muestras de movimientos traslacionales con las que validar la función 11.

TABLA 7.6. Valores observados, estimados y error de estimación de la distancia horizontal recorrida, para las cinco muestras de corrientes de derrubios con las que validar la función 12.

TABLA 8.1. Funciones de transformación de la variable tanig.

TABLA 8.2. Coeficientes y clasificación discriminante obtenida de las funciones de transformación de la variable tanig.

TABLA 8.3. Resultados del test Oneway para las variables transformadas de tanig.

TABLA 8.4. Resultados de clasificación ($F=-0.3$) de las funciones de transformación (SN y CU) de la variable tanig.

TABLA 8.5. Datos relativos a los cinco niveles de susceptibilidad obtenidos de la aplicación de las funciones discriminantes aplicadas a la zona piloto.

TABLA 8.6. Valores medios y desviación estandar de las variables cuantitativas utilizadas en la función discriminante aplicada a la zona piloto.

TABLA 8.7. Valores medios, desviación estandar y valor mínimo de las variables cuantitativas de la función , para cada uno de los niveles de susceptibilidad de la zona.

TABLA 8.8. Valores medios y desviación estandar de las variables cuantitativas de la función según el tipo de recubrimiento de la ladera.

TABLA 8.9. Valores medios y desviación estandar de las variables cuantitativas de la función según el tipo de recubrimiento de la ladera y para cada nivel de susceptibilidad.

TABLA II.1. Resumen de los ensayos de laboratorio realizados.

TABLA II.2. Resumen de los valores de ϕ' , c' y ϕ_r' obtenidos de los ensayos de corte para las muestras de Keuper.

TABLA II.3. Resumen de los valores de ϕ' , c' y ϕ_r' obtenidos de los ensayos de corte para las muestras

de la F. Garumniense.

TABLA II.4. Resumen de los valores de ϕ' , c' y ϕ_r' obtenidos de los ensayos de corte para las muestras del Ilerdiense.

TABLA II.5. Resumen de los valores de ϕ' , c' y ϕ_r' obtenidos de los ensayos de corte para las muestras del Cuaternario.