

Universidad de Oviedo  
Departamento de Geología

# **Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial**

TESIS DOCTORAL  
**Juan Remondo Tejerina**

MEMORIA

Directores: Antonio Cendrero Uceda  
José Ramón Díaz de Terán Mira  
Tutor: Jorge Marquínez García

Oviedo, mayo de 2001





*Si hubiera una sola verdad, no se podrían hacer cien lienzos sobre el mismo tema.*

P. Picasso





## AGRADECIMIENTOS

El trabajo que ha servido de base a esta tesis se ha desarrollado en relación con o financiado por diversos proyectos europeos, nacionales y regionales:

- *New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe* (NEWTECH), CEC *Environment Programme Contract* ENV-CT96-0248.
- Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al Análisis de la Estabilidad y a la Cartografía de la Susceptibilidad de Movimientos de Ladera (GISLYT), CICYT, AMB97-1091-C06-04.
- *Geomorphology and ELA of transportation Systems* (GETS), *Training and Mobility of Researchers* (TMR), Contract FMRX-CT98-0162.
- Análisis, Evaluación y Zonificación de Riesgos Naturales en Municipios de Cantabria. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial, Gobierno de Cantabria.
- Caracterización de Movimientos de Ladera Mediante Cs-137. Comisión Mixta Caja Cantabria-Universidad de Cantabria.

Los esfuerzos realizados dentro de dichos proyectos por todas las personas implicadas han contribuido, de forma directa o indirecta, a los resultados que aquí se han obtenido.

Un agradecimiento muy especial a la Diputación Foral de Guipúzcoa, a través de su departamento de Obras Hidráulicas y Urbanismo y su Servicio de Información Territorial, y al personal de los mismos: José María Aramburu, Mikel Elorza, Julian Peña, Patxi Tamés y Andoni da Silva. Sin su apoyo y generosa ayuda, facilitando las fotografías aéreas, las bases de datos y otra información sobre la zona de estudio, este trabajo no habría sido posible

Igualmente, quiero agradecer la dirección de este trabajo a Antonio Cendrero y José Ramón Díaz de Terán, por su intensa dedicación durante estos años, por sus ideas,

sugerencias y correcciones, pero sobre todo por su apoyo y estímulo moral e intelectual continuos, y por su amistad.

Además, me gustaría expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han ayudado en esta tarea, a través de la aportación de datos, explicaciones, discusiones y sugerencias, siempre de manera desinteresada y amistosa.

A mi tutor, Jorge Marquínez, por haberme abierto las puertas en la Universidad de Oviedo y en el INDUROT, por su hospitalidad, ayuda y sugerencias para mejorar el trabajo.

Andrea Fabbri, por haberme iniciado en las técnicas de análisis de datos espaciales, por seguir muy de cerca este trabajo y por su magnífica acogida en el ITC (Enschede, Holanda); siempre estuvo pendiente de mis necesidades. Las discusiones mantenidas y sus sugerencias han contribuido de manera decisiva a mejorar el trabajo.

Chang-Jo Felix Chung (*Spatial Data Laboratory; Natural Resources of Canada*), por abrirme los ojos en muchos sentidos y por su intensa dedicación y amistad durante mi estancia en Ottawa (Canada). Durante esa estancia y en otros encuentros han surgido muchas de las contribuciones de esta memoria.

Jaime Gutierrez, del Departamento de Matemáticas, Estadística y Computación de la Universidad de Cantabria, por sus aclaraciones y explicaciones teóricas de algunos de los procedimientos matemáticos utilizados en el trabajo.

Jesús Soto y su grupo de trabajo de la Sección de Física Médica y Nuclear de la Universidad de Cantabria, por el análisis e interpretación de las muestras de Cesio.

Paola Napolitano (Acta, SL, Nápoles), por haberme iniciado en el uso de los Sistemas de Información Geográfica y de las Funciones de Favorabilidad.

Rosana Menéndez y Pilar García del INDUROT, por haberme iniciado en Arc/Info, por su hospitalidad durante mis estancias en Oviedo y por su ayuda en las llamadas de socorro.

Cristina y Nuria de la UPC, por sus enseñanzas en relación con el análisis multivariable en SIG.

Mis compañeros del DCITIMAC, en la Universidad de Cantabria:

Alberto González, por su amistad y aliento desde que llegue al departamento y por nuestras innumerables discusiones científicas.

Enrique Francés y Jesús Varas, por su colaboración en la definición del mapa de usos del suelo.

Viola María Bruschi, por sus dibujos, figuras y maquetación de la memoria; Jaime Bonachea, Nacho Olague, Jurjen Bertens, David Corral, Jesús Rodríguez, Rafa Valiente y José Ignacio Espeso por su colaboración en distintos ámbitos del trabajo, así como a los demás miembros del departamento porque trabajar con todos ellos ha sido y es muy estimulante. A todos ellos por su amistad.

A mis colegas europeos, y muy especialmente a Cecilia Giusti (Ceci) y Davide Geneletti, por su amistad, compañía y enseñanzas durante mi estancia en Holanda y por su aliento, desde la distancia, hasta el final.

Por último, pero no en menor grado, quiero agradecer a mi familia, la propia, la natural y la política, su inestimable ayuda, paciencia y ánimo en los momentos más duros, y especialmente a Sofía, quien además ha sido capaz de revisar toda la memoria.



*a mi padre*



# **Elaboration and validation of landslide susceptibility maps by means of Spatial Data Analysis techniques**

## **Summary:**

Mass movements are an important geomorphological process as well as a potential threat for human lives and property; it is thus important to design and implement measures to mitigate the hazard they represent. However, this is not simple, due to the complexity of these phenomena and the difficulty to properly assess their future behaviour.

An important tool for the design of mitigation strategies and plans are susceptibility, hazard or risk maps, that provide the basis for a better knowledge of natural processes as well as decision making.

Deterministic models for landslide hazard or susceptibility assessment have improved considerably in recent years; nevertheless, those models require an amount and degree of detail of data that makes their application to hazard zoning impossible, due to the high costs involved. The solution to this problem can be better approached through the use of probabilistic models.

In the last two or three decades, several methodological approaches based on geomorphological or probabilistic landslide hazard assessment have been developed. The final product of analyses carried out using such methods is normally a susceptibility map, often of a qualitative nature. Moreover, as the maps thus obtained are normally not independently validated, they must be considered, from the scientific point of view, as un-tested hypotheses (however reasonable they may be).

The considerable development experienced by Geographic Information Systems (GIS) in recent years has opened new possibilities in spatial data analysis, providing the basis

for the development, improvement and application of these techniques to landslide hazard analysis.

This work is a contribution to the development and validation of new methods and procedures for landslide susceptibility and hazard analysis, based on the knowledge of both spatial and temporal occurrence of former landslides, through the application of GIS and SDA techniques. The spatial and temporal analysis is also applied to gain a better understanding of direct and indirect causal factors, the relevance of landsliding for geomorphological evolution in the study area, and changes experienced by the process in recent decades that may reflect human influences or global change trends.

The approach is based on a two-way application of the uniformitarian principle; a better knowledge of the way a process operates at present can be used to both better understand past geomorphological evolution and its causal factors, and predict future behaviour, thus helping to design better preventive strategies. The working hypothesis is that the correlation between landslides occurred in the past and a series of spatial parameters provides the means to predict the future behaviour of this process and express it by means of maps that reflect the spatial and/or spatio-temporal probability of future occurrences. The hypothesis assumes that: all past landslides are known and have been included in the analysis; all conditioning factors are also known and included with an appropriate degree of detail; future terrain behaviour will occur in the future as it did in the past.

To develop the models and test the hypothesis, a detailed analysis of landslides occurred in a study area in northern Spain during a period of about forty years has been carried out, considering both spatial and temporal distribution. This analysis was based on field surveys and interpretation of air photographs from eight different flights, at scales between 12.000 and 20.000, obtained between 1954 and 1997.

The main objective of the work was to develop and apply a methodology of landslide susceptibility assessment, using statistical techniques in a GIS environment, based on



the study of terrain behaviour during the last 40-50 years. More specific objectives included to:

- determine the main factors conditioning slope instability and their relative importance;
- define the combination of factors that provide the most favourable balance between effort and precision of the assessment;
- compare different mathematical procedures to identify the most suitable ones;
- validate the maps obtained, to establish their predictive capability;
- assess errors in input data and their influence on the validity of final results.
- develop procedures for the application of susceptibility maps to hazard, risk and impact assessment;
- determine the evolution of landslide processes in the study area in recent decades and identify change trends occurred, if any;
- quantify the contribution of landslides to landscape evolution and determine the significance of human influence on the process.

The work carried out included data gathering on nineteen parameters, selected on the basis of a given rupture model, and the formation of a digital database. The database included rupture zones of past landslides and a series of geometrical, geomorphological, geological, hydrological and land-use data. The landslide database includes a series of attributes referring to data obtained during field and air photo surveys (age, cinematic type, deposit thickness, etc.).

Statistical susceptibility analyses were carried out using two types of mathematical procedures: multivariate analysis (discriminant function) and favorability functions based on both probability and fuzzy set theory.

The results obtained have been independently validated, using different samples for model development and model validation. Three different validation strategies have been applied, using spatial, temporal and random splits of landslide populations studied. This validation has been used to establish the predictive capability of the

method, identify suitable procedures, determine the most appropriate combination of variables and assess the relevance of data errors for susceptibility assessments.

The combination of parameters that represents the best “effort/quality ratio” in the study area includes: DEM, lithology and vegetation; additional parameters improve the results only marginally but increase efforts very considerably. All mathematical methods used provide good, similar results, but favorability functions based on the certainty factor are somewhat better. Normal errors in input data have a limited effect on the quality of final results as they tend to be random or are diluted through the statistical treatment.

The temporal analysis has been used to establish the frequency of landslide occurrence during the period studied and the change in landslide mobilisation rates. The frequency and rates thus obtained have been compared with potential causal or triggering factors. The evidence obtained shows that intense rainfall events are, by far, the main direct triggering factor for landslides in the study area. However, there is general trend towards the increase in time of landslide frequency and mobilisation rates, which can be approximately expressed by means of an exponential function and does not show correlation with rainfall distribution or other triggering factors. This trend shows a good correlation with indicators of the intensity of human intervention on the territory and is interpreted as a consequence of the “preparatory”, indirect influence of such activities on landslide processes.

The results obtained show that the approach proposed and the hypothesis formulated are essentially correct and that quantitative susceptibility and hazard maps, with known predictive capability, can be prepared using the methods developed. Nevertheless, the precision of those maps is not completely satisfactory; possible means to improve the quality of the output are proposed.



3.2.3.3. Visualización de los modelos de susceptibilidad	146
3.2.3.4. Recapitulación	149
3.2.4. Validación	153
3.2.4.1. Curvas de validación: acierto y predicción	158
3.2.5. Herramientas	162
<b>4. Área de estudio</b>	<b>167</b>
4.1. Selección de las zonas de trabajo	167
4.2. Descripción general de las zonas	171
4.2.1. Bajo Deva	171
Situación geográfica	171
Encuadre climático	172
Geología	173
Hidrología	176
Suelos	177
Vegetación y usos del suelo	178
Características geomorfológicas	179
4.2.2. La Pobla de Lillet	182
4.2.3. Municipios de Cantabria	184
<b>5. Datos; selección e inventario</b>	<b>187</b>
5.1. Consideraciones previas	187
5.2. Causas de los deslizamientos	189
5.2.1. Condiciones basicas que afectan a la estabilidad	195
Geología	195
Morfología	196
Condiciones hidrológicas y climáticas	197
Vegetación	198
5.2.2. Factores que producen cambios desfavorables en las condiciones	201
Estado de esfuerzos	201
Resistencia de los materiales	201
5.3. Modelo de rotura	205
5.4. Parámetros a considerar	207
5.5. Preparación del banco de datos cartográficos	208
5.5.1. Estructura del banco de datos	208
5.5.2. Captura de datos y digitalización	210
5.5.3. Corrección de errores	211
5.5.4. Establecimiento de la topología	211
5.5.5. Creación de mapas derivados	213
5.5.6. Validación del banco de datos	217
5.5.7. Preparación del banco de datos para el análisis	218
5.6. Descripción del banco de datos	218

<b>6. Resultados y discusión</b>	<b>223</b>
6.1. Análisis de la susceptibilidad	229
6.1.1. Análisis discriminante	234
6.1.2. Funciones de favorabilidad	243
6.1.3. Variables	246
6.1.4. Técnicas de análisis	254
6.1.5. Valor predictivo de los modelos; probabilidad espacio-temporal	265
6.1.6. Errores	272
6.1.7. Aplicaciones de los mapas de susceptibilidad	285
6.1.7.1. Análisis de la susceptibilidad en varios municipios de Cantabria	286
6.1.7.2. Mapas de amenaza/riesgo	288
6.1.7.3. Evaluación de Impacto Ambiental	293
6.1.8. Recapitulación	301
6.2. Características geomorfológicas de los movimientos y evolución del relieve	304
6.2.1. Factores condicionantes	304
6.2.2. Tipología y dinámica de los movimientos en masa	306
6.2.3. Distribución espacial y temporal de los movimientos en masa	310
6.2.4. Factores desencadenantes	314
6.2.5. Contribución de los movimientos en masa a la evolución del relieve	335
6.2.6. Aplicación del Cs-137 al análisis de los deslizamientos superficiales	345
<b>7. Conclusiones, recapitulación general y propuestas</b>	<b>353</b>
<b>8. Referencias bibliográficas</b>	<b>365</b>

## **Anexos**

ANEXO I: Metadatos sobre las variables del Bajo Deva.	1
ANEXO II: Metadatos sobre las variables de la Pobla de Lillet.	69
ANEXO III: Programas AML (Arc/Info) para elaborar modelos digitales a partir del MDE.	79
ANEXO IV: Tablas de validación de los mapas heurísticos de peligrosidad del Bajo Deva.	85
ANEXO V: Caracterización temporal de los deslizamientos mediante técnicas de Cs-137. Tablas de datos.	91
ANEXO VI: CD que incluye el Banco de Datos digital.	95





## Cap. 1 Introducción





# 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se pretende profundizar en el desarrollo de métodos cuantitativos de cartografía de amenazas debidas a movimientos en masa, así como en el conocimiento del proceso y de su evolución en el tiempo, en relación con los factores que lo determinan.

La memoria que aquí se presenta se ha estructurado en 7 capítulos, que representan distintas etapas del estudio, por lo que en conjunto son un reflejo de la metodología utilizada.

En el capítulo 1 se introduce la problemática general, se establecen los conceptos y términos empleados y se revisan los trabajos realizados hasta la fecha en relación con el tema de este trabajo. Esta revisión sirve de base para identificar los problemas a abordar y los objetivos del estudio, que se relacionan en el capítulo 2.

En el capítulo 3, se expone la metodología, técnicas y herramientas utilizadas para la consecución de los objetivos planteados. Puesto que el trabajo es de índole cartográfica, se han aplicado técnicas de análisis de datos espaciales por medio de herramientas SIG.

En el capítulo 4, se selecciona y justifica el ámbito geográfico del estudio. Asimismo, se describen las principales características de las distintas zonas.

La estructura y contenidos del banco de datos cartográfico elaborado se presentan en el capítulo 5. Igualmente se proporcionan detalles sobre el proceso de adquisición de datos y de elaboración de mapas derivados, que han de servir de base para el análisis posterior.



El capítulo 6 está dedicado a presentar los análisis llevados a cabo, los resultados obtenidos por medio de los mismos y su discusión. También se adelantan algunas conclusiones relacionadas con los distintos problemas abordados.

Finalmente, en el capítulo 7 se hace una recapitulación de las conclusiones obtenidas y se presentan una serie de sugerencias para mejorar las prácticas y profundizar en este tipo de trabajos.

La memoria se completa con una serie de Anexos, que contienen básicamente información de tipo descriptivo, cuya inclusión en el cuerpo principal del trabajo no se ha considerado conveniente.

## 1.1. Movimientos en masa, riesgos y evolución del relieve

Un proceso geodinámico, es “el sistema de relaciones que se establecen entre las acciones desarrolladas por agentes de la dinámica terrestre y sus productos o resultados” (Pedraza, 1996). Por procesos geodinámicos externos, se entiende cualquier fenómeno natural que ocasiona cambios en los materiales y en las formas de la parte externa de la corteza terrestre (Trilla, 1988).

Los procesos externos en general, cuyos mecanismos de ocurrencia suelen resultar complejos y cuya intensidad y campo de actuación pueden variar entre amplios niveles escalares, van modelando las formas del relieve terrestre, condicionados esencialmente por las características climáticas y por los factores de relieve inicial, litología y estructura sobre los que actúan. Las formas resultantes tienden al equilibrio, entendiendo por tal una progresiva atenuación de la intensidad de los procesos, de no producirse eventos que den lugar a un rejuvenecimiento.

Los movimientos en masa, también denominados procesos gravitacionales, de ladera o de gravedad asistida (llamados así porque además de la gravedad, en el movimiento intervienen otros factores como el agua, etc.), son procesos en los que la gravedad impulsa directamente a los materiales propiciando fenómenos de autotraslación, dando lugar a un conjunto diverso de fenómenos cuyo nexo común está en la necesidad de una inclinación del terreno para su desarrollo. Estas masas movidas y su velocidad, a partir de ciertos umbrales, son las que entrañan peligro y causan destrozos de vidas y bienes humanos. La amplia distribución actual de las actividades humanas, unida a la gran extensión de las zonas sujetas a movimientos de ladera, dan lugar a que éste sea uno de los riesgos naturales que afectan a todo tipo de regiones. La influencia humana en este riesgo se debe tanto a la presencia de elementos vulnerables como a la influencia humana directa o indirecta en el proceso natural (UNDRO, 1991).



Los riesgos naturales resultan, como es bien sabido, del conflicto entre los procesos geodinámicos y la sociedad humana, y se sitúan en la interfase entre lo que se ha denominado sistema de eventos naturales y el sistema de usos del hombre (Burton et al., 1978). La interpretación es, lógicamente, antropocéntrica ya que no hay riesgo si el sistema humano no está presente y sólo se consideran amenazas los eventos extremos, puesto que la dinámica normal de los procesos puede constituir incluso un recurso. En efecto, la mayoría de las actividades socioeconómicas están relacionadas con las condiciones medias de funcionamiento de los sistemas naturales; si el comportamiento de los procesos se ajusta al régimen promedio, no hay daños y el proceso es percibido como beneficioso. Por el contrario, cuando la variabilidad del proceso excede de un cierto límite dentro de una banda de tolerancia, supone una amenaza (Hewitt y Burton, 1971; en Smith, 1992). El hecho de que la mayor parte de las amenazas geológicas parezcan ocurrir de forma infrecuente refleja las limitaciones de nuestra memoria colectiva, que tiende a retener aquellos hechos que han ocurrido en los últimos tiempos. Un evento que ocurra cada 200-300 años es muy frecuente en términos geológicos, pero no es percibido como tal por la sociedad.

A lo largo de la historia de las Ciencias de la Tierra, se han sucedido dos modelos principales para explicar la aparición y dinámica de los fenómenos naturales: el catastrofismo y el gradualismo (uniformitarismo y/o actualismo). Las ideas catastrofistas de Cuvier (1817) se contraponían a las de Hutton (1788), padre del actualismo, y Lyell (1830), que consideraban los fenómenos catastróficos como parte del ciclo geológico; la catástrofe sería así un fenómeno natural rápido y violento, asumible en un modelo evolutivo uniformitarista. Por consiguiente, expresiones como “son fenómenos imprevisibles”, “la naturaleza se rebela contra el hombre”, “actos de Dios”, etc. no están justificadas.

Estas ideas son claramente aplicables al caso de los movimientos de ladera. Es habitual que transcurran periodos de años, e incluso décadas casi sin deslizamientos que afecten a una zona, pero la actuación de algún agente desencadenante (habitualmente lluvias intensas) puede dar lugar, en horas o días, a la aparición de mayor número de

movimientos que en las décadas anteriores. Un buen ejemplo de esto fueron las intensas lluvias que en 1983 afectaron a la Cornisa Cantábrica. Son precisamente estos episodios de tipo paroxístico los que dan lugar a las situaciones de riesgo.

Un esquema conceptual que ilustra las relaciones existentes entre el ambiente geomorfológico en el que actúan los procesos de ladera y el hombre, es el propuesto por Panizza (1992).

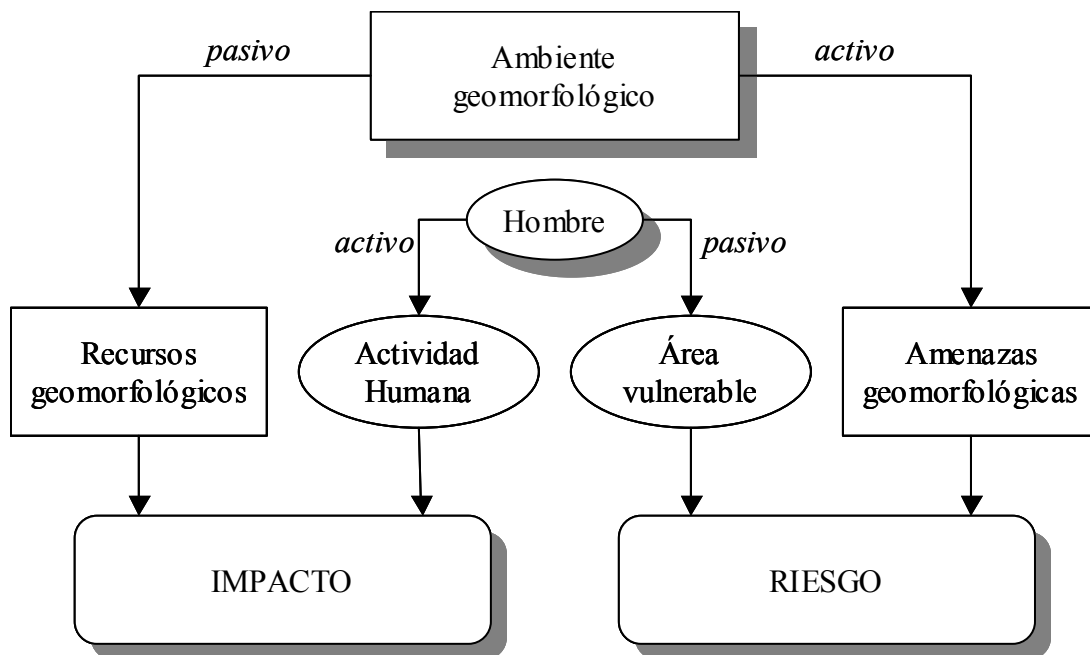


Figura 1.1. Relaciones entre ambiente geomorfológico y hombre (a partir de Panizza, 1992).

En la figura anterior, se recogen los dos grupos de factores fundamentales para el análisis de los riesgos naturales en general y geológicos en particular (UNDRO, 1991; Ayala, 1991): el proceso natural (amenazas, peligrosidad) y la presencia humana (exposición, vulnerabilidad, impacto). La capacidad de predicción y de actuación en relación con cualquier riesgo está, lógicamente, determinada por nuestro conocimiento del proceso y nuestra capacidad de intervención tecnológica sobre el mismo o sobre



los elementos vulnerables. La situación en cuanto a esas capacidades varía mucho según el tipo de proceso, tal y como se refleja de manera simplificada en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Riesgos geológicos: características, capacidad de predicción y de mitigación (A partir de Costa y Baker, 1981, Ayala y Durán, 1988 y Cendrero, 1997).

Tipo de proceso	Superficie afectada	Dinámica	Víctimas	Peligrosidad		Cap. predicción		Mitigación
				Frecuencia	Magnitud	Espacial	Temporal	
Volcánico	L-R	r-mr	Sí	Baja	Mod.-Cat.	Sí	(S) (M)	OT-PC
Terremotos	R	mr	Sí	Baja	Mod.-Cat.	Regional	Limit. (B)	E-OT-PC
Tsunamis	R-C	r-mr	Sí	Baja-Mod.	Mod.-Cat.	Sí	Sí (Red alerta) (A)	OT-PC
Inundaciones	L-R	r-mr	Sí	Baja-Alta	Baja-Serv.	Sí	(*) (A)	E-OT-PC
Movimientos de ladera	L	l-mr	Raras	Baja-Mod.	Baja-Serv.	Sí	(**) (M)	E-OT-PC
Hundimientos kársticos	L	l-mr	Raras	Baja-Mod.	Baja-Mod.	Regional	No en la práctica Sí (A)	OT-PC
Subsidencia	L-R	l	No	Mod.-Alta	Baja-Mod.	Sí	Sí (A)	E-OT
Erosión Dinámica	R-C	l	No	Variable	Baja-Serv.	Sí		E-OT
litoral	L-R	l	No	Variable	Baja-Serv.	Sí	Dt. Meteor.	E-OT
Radiactividad natural	L-R	l	Sí (ind.)	Continuo	Baja-Mod.	Sí	Sí (A)	E-OT

L: local. R: regional. C: continental. l: lento. r: rápido. mr: muy rápido. (A): alta. (M): media. (B): baja. E: medidas estructurales. OT: ordenación territorial. PC: protección civil. (S): en volcanes bien vigilados. (\*): datos meteorológicos y red de alerta. (\*\*): en movimientos bien vigilados.

Los movimientos en masa están íntimamente ligados al ciclo geológico. La orogénesis, epirogénesis, meteorización, erosión, etc. son procesos de larga duración que preparan las condiciones para que los movimientos en masa se desencadenen.

En función de la intensidad de actuación de los procesos dinámicos y estáticos, y de acuerdo con Selby (1982), existen dos tipos de laderas: a) “*weathering-controlled slopes*” en

las que la tasa de meteorización es menor que la tasa potencial de remoción del regolito; b) “*transport-limited slopes*”, en las cuales la tasa de transporte no puede eliminar todo el regolito que se forma, por lo que éste se acumula sobre la ladera. Las “*transportational slopes*” representan un tipo intermedio, en el que ambos procesos están aproximadamente equilibrados. En conjunto y a largo plazo, los procesos citados están determinados por la incisión fluvial; la ampliación de los valles se debe principalmente a procesos de ladera, mientras que la corriente del fondo del valle incide verticalmente y transporta los materiales aguas abajo (Cotton et al., 1996). Este es un proceso de larga duración, responsable de muchos de los relieves que actualmente observamos.

Hay otros procesos de duración más corta y de carácter más local que son los responsables del desencadenamiento de las roturas. Estos procesos y condiciones han sido revisados por numerosos autores (Terzaghi, 1950; Pasek et al., 1977; Carrara y Merenda, 1976; Cotecchia, 1978; Kienholz, 1978; Varnes, 1984; Hansen, 1984a; Brabb, 1984; Brunsten, 1985; Sidle et al., 1985; Crozier, 1986; Cooke y Doornkamp, 1990; Mulder, 1991, etc.). Los principales factores desencadenantes de los movimientos en masa son la erosión basal, el clima, los sismos y la acción humana. Todos ellos actúan dependiendo de su propia dinámica, pero condicionados por factores “estáticos” o condicionantes, que caracterizan cada punto del terreno y determinan la mayor o menor intensidad de los efectos de aquéllos.

Un aspecto bien conocido es la tendencia de los deslizamientos a concentrarse en las áreas de erosión fluvial lateral, como es el caso de los meandros. Así, los movimientos en masa tienden a migrar aguas arriba a medida que progresa la incisión fluvial. De hecho, es posible establecer la potencialidad de inestabilidad teniendo en cuenta el estado del perfil de una corriente, por encima de su punto de inflexión, en relación con el perfil teórico de equilibrio, tal y como describen Bjerrum et al. (1969). Por otro lado, y aunque no se ha estudiado en detalle, parece que en algunos contextos de valles fluviales recientemente rejuvenecidos, muchos de los deslizamientos no se producen en los valles principales sino en los tributarios, ya que éstos últimos, por sus características hidrodinámicas, no han alcanzado todavía el equilibrio teórico con respecto a los



principales, cuyo caudal, y por lo tanto su capacidad erosiva, es mayor (Hutchinson, 1995). En el caso de los movimientos de tipo flujo, los materiales tienden a fluir por surcos determinados por la topografía, donde previamente habían ocurrido eventos del mismo tipo, tal y como observaron Plafker et al. (1971) en el Valle de Huascarán, Perú.

En algunos lugares como Japón y Hong Kong (Hutchinson, 1995) en los que existen grandes series de datos de movimientos en masa, se han establecido correlaciones con las precipitaciones. Éstas suponen el principal factor desencadenante de movimientos de ladera, a partir de una cierta intensidad de precipitación, aunque la lluvia antecedente reduce el límite de intensidad de lluvia necesaria para que el movimiento se produzca.

Se han descrito también relaciones entre la actividad sísmica y los movimientos en masa, que muestran que los picos de mayor frecuencia de distribución temporal de movimientos se relacionan con periodos de mayor actividad sísmica. La distribución espacial de tales movimientos describe una elipse cuyo eje mayor se sitúa en las fracturas que han generado el temblor (Wilson y Keefer, 1985). Esta relación entre sismicidad y deslizamientos también ha sido establecida en algunos casos para eventos anteriores a los registros históricos (González-Díez et al., 1999).

Los factores desencadenantes están asociados en muchas ocasiones a acciones antrópicas, siendo las más frecuentes los cambios en la geometría y en las condiciones hidrológicas de las laderas, así como la aplicación de cargas estáticas o dinámicas sobre el terreno. Estas actuaciones dan lugar a la modificación de las fuerzas actuantes sobre las laderas y a su pérdida de equilibrio y, como consecuencia, a movimientos de terreno tendentes a adoptar las nuevas condiciones de equilibrio.

Los movimientos en masa contribuyen de manera apreciable a la evolución del paisaje; la principal expresión geomorfológica de esta evolución es la transferencia de masa desde las zonas de denudación a las áreas de sedimentación. La denudación es la consecuencia de la actuación de los agentes erosivos, entre ellos los movimientos en



masa. Los procesos de ladera no sólo producen denudación y transporte, sino que modifican las condiciones de las laderas, facilitando la erosión por parte de otros agentes externos. Además, los movimientos en masa generan formas y depósitos que constituyen en sí mismos elementos significativos del paisaje.

A pesar de las complejas relaciones existentes entre la distribución temporal y espacial de los deslizamientos y de la influencia a lo largo del tiempo de los factores desencadenantes, junto con los rasgos geológico-geomorfológicos de contexto, se han descrito algunos modelos de ocurrencia y comportamiento. Tales aspectos y su modelado son cruciales para el análisis de la amenaza. Según Cendrero y Dramis (1996), el estudio de las implicaciones de los movimientos en masa en la evolución del paisaje se ha abordado de dos maneras: a) en un ámbito local, a través de los mecanismos y procesos que actúan en elementos concretos del paisaje (generalmente, perfiles de laderas); y b) en un ámbito areal, determinando de forma cuantitativa la contribución de los procesos a la transferencia de masa en una región amplia, dentro de la evolución general del relieve de la misma.

La manera más frecuente de analizar la evolución de laderas específicas es mediante el uso de perfiles interfluvio-fondo de valle que describan la geometría, litología y procesos a lo largo de la ladera (Carson y Kirkby, 1972; Carson, 1976; Luke, 1976; Aronson y Linde, 1982; Selby, 1982; Freeze, 1987; Kirkby, 1987; Richards y Lorrimer, 1987), o mediante modelos tridimensionales (Dalrymple et al., 1968; Ahnert, 1976; Conacher y Dalrymple, 1977). Los modelos de distribución espacial y temporal de los movimientos de ladera pueden ser más útiles para explicar la contribución de estos procesos a la evolución del relieve. En una región determinada se pueden identificar los diferentes estados de evolución de las laderas en diversos lugares del área estudiada, con lo que es posible construir modelos acerca de los cambios temporales que describan la evolución de las laderas en una región (Selby, 1982). Ejemplos de tales modelos pueden verse en Hutchinson (1973), Brunsden (1973, 1987), Cotecchia y Melidoro (1974), Palmquist y Bible (1980), Cendrero y Dramis (1996), González-Díez (1995), González-Díez et al. (1996, 1999).



La característica que mejor puede servir para resumir la evolución del relieve es la tasa de denudación, o bien la tasa de transferencia de masa desde las áreas de erosión a las zonas de sedimentación. Los movimientos en masa, especialmente en regiones húmedas y subhúmedas, contribuyen de manera importante a esa transferencia, bien de manera directa, bien de manera indirecta, dando lugar a depósitos incoherentes fácilmente erosionables. Por ello, resulta de interés tratar de establecer de forma cuantitativa el papel de los movimientos de ladera en ese proceso, lo que ayudaría a obtener una mejor comprensión del mismo, así como de las modificaciones que, por causas naturales o humanas, haya podido experimentar a lo largo del tiempo. Esto permitirá, entre otras cosas, un mejor conocimiento de las dimensiones geomorfológicas del cambio global.

## 1.2. Consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos

A lo largo de la historia, las mayores catástrofes de origen natural han estado asociadas a fenómenos geodinámicos, cuyas principales consecuencias han sido grandes pérdidas de bienes y de vidas humanas (Tabla 1.2). Estas consecuencias se deben en gran parte al carácter muchas veces impredecible y a la dificultad de control de dichos fenómenos. Las pérdidas producidas por los riesgos naturales son tan elevadas que en los últimos años han constituido un motivo de preocupación creciente en todo el mundo, cuya manifestación más evidente es la declaración, por parte de Naciones Unidas, de la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales (DIRDN) para los años noventa. El objetivo de la DIRDN fue promover estudios y acciones internacionales concertadas para reducir las pérdidas de vidas, los daños materiales y los costes económicos y sociales que se producen como consecuencia de los desastres naturales. Asimismo, la Comisión Europea ha financiado en los años noventa numerosos proyectos de investigación encaminados al estudio de los procesos involucrados, a la evaluación del riesgo y a la predicción, mitigación y gestión de riesgos. A modo de ejemplo cabe citar que en 1997 financió 35 proyectos de investigación relacionados con los riesgos naturales con un costo de 40 millones de ECU (Ghazi et al, 1997). Entre dichos proyectos se encuentran varios relativos a los movimientos en masa, como por ejemplo TOFLEC (Casale et al., 1994), TESLEC (Dikau et al., 1996b) y NEWTEC (Corominas et al., 1998).

Los movimientos en masa generalmente no son tan espectaculares ni causan tantos daños como las inundaciones, los terremotos, los huracanes u otras catástrofes naturales, pero están muy extendidos por todo el mundo y, a lo largo de los años, pueden causar más pérdidas que otras amenazas geológicas. Según Varnes (1984), en Estados Unidos las pérdidas producidas por movimientos en masa son superiores a las causadas por el resto de riesgos geológicos. En España (Ayala et al., 1987), los deslizamientos son el tercer riesgo geológico en cuanto a los daños producidos.



En muchas ocasiones, los movimientos en masa ocurren asociados a otros riesgos naturales que actúan como desencadenantes, como por ejemplo las inundaciones y los sismos, a los que se les atribuyen los daños. Por ello, es difícil obtener datos que reflejen las pérdidas ocasionadas exclusivamente por deslizamientos. Según indica Varnes (1984), la mayoría de los daños durante los terremotos e inundaciones en Estados Unidos se producen en realidad por los deslizamientos asociados.

Hay que señalar, además, que las pérdidas indirectas debidas a amenazas naturales, medidas de forma convencional usando muestreos de daños económicos, ignoran el impacto en sentido amplio y las pérdidas intangibles (Smith, 1992). En efecto, muchas veces los procesos suponen un serio impacto en la estructura económica y social que no es fácil de medir en unidades monetarias, pero que dificulta la actividad humana.

Durante el periodo 1971 a 1975 la comisión sobre deslizamientos de la International Association of Engineering Geology (IAEG) recogió información de eventos en todo el mundo. Aunque se señala que el trabajo es incompleto, el 14% de los muertos causados por fenómenos naturales fueron debidos a deslizamientos (UNESCO, 1973-79; en Varnes, 1984). Hay que decir que los riesgos naturales (excluyendo las hambrunas) suman aproximadamente el 4% del total de muertes violentas en el mundo (Mitchell, 1974), y que los deslizamientos supusieron el 3% del conjunto de desastres globales en el periodo 1947-1981 (Thompson, 1982).

La importancia de los deslizamientos en el contexto de los desastres naturales se refleja en la Tabla 1.2. Según se aprecia en los datos, aunque estos procesos no son los más destructivos, su trascendencia es considerable.

Tabla 1.2. Algunos de los peores desastres naturales en el mundo, a consecuencia de riesgos naturales (con datos de Costa y Baker, 1981, de la Office for U.S. Foreign Disaster Assistance, y Cendrero, 1997).

<i>FECHA</i>	<i>EVENTO</i>	<i>VÍCTIMAS</i>
1939	Inundaciones en Hunan (China)	1.000.000
1887	Inundaciones del río Huang Ho (China)	900.000
1556	Terremoto en Shensi (China)	830.000
1976	Terremoto de Tangsan, Pequín y Tientsin (China)	655.237
1970	Ciclón en Bangla Desh	300.000
1737	Terremoto en Calcuta (India)	300.000
1939	Inundaciones en el norte de China	200.000
1920	Terremoto en Kansu (China)	180.000
1923	Terremoto en Tokio (Japón)	143.000
1290	Terremoto en Chingli (China)	100.000
1731	Terremoto en Pekín (China)	100.000
1893	Terremoto en Arbadil (Irán)	100.000
1948	Terremoto en Ashkabad (URSS)	100.000
1815	Erupción del volcán tambora (Indonesia)	92.000
1908	Terremoto en Messina (Italia)	75.000
1970	Terremoto y deslizamientos en el norte de Perú	67.000
1935	Terremoto en Quetta, Baluchistán (Pakistán)	60.000
1935	Terremoto de Baluchistán (India)	50.000
1999	Inundaciones y deslizamientos en Venezuela	30.000-50.000
1883	Erupción volcán Krakatoa (Indonesia)	36.000
1979	Terremoto en Nicaragua	30.000
1939	Terremoto en Concepción (Chile)	30.000
1915	Terremoto de Avezano (Italia)	30.000
1902	Erupción del Mont Peleé (Martinica)	30.000
1974	Inundaciones en Bangla Desh	28.700
1985	Erupción (fluj. fango) Nevado del Ruiz (Colomb.)	23.000
1976	Terremoto de Guatemala	23.000
1939	Terremoto en Erzincan (Turquía)	23.000
1669	Erupción del Etna (Sicilia, Italia)	20.000
1999	Terremoto en Turquía	17.000
1978	Terremoto en el NE de Irán	15.000
1977	Ciclones en India	14.204
1960	Terremoto en Agadir (Marruecos)	12.000
1949	Deslizamientos en Khait (Tadzhikistán, URSS)	12.000
1998	Huracán Mitch en Centroamérica	11.000
1916	Deslizamientos en los Alpes (Italia y Austria)	10.000
1906	Tifón en Hong Kong	10.000
1985	Terremoto en el centro de México	9.500
1974	Huracán en Honduras	8.000
1964	Tifón en Vietnam	7.000
1949	Terremoto en Pelileo (Ecuador)	6.000
1976	Terremoto y tsunami en Moro y Sulu (Filipinas)	6.000
1963	Terremoto en Haití	5.000
1944	Terremoto en San Juan (Argentina)	5.000
1919	Erupción del Monte Kelud (Java, Indonesia)	5.000
1974	Terremoto en el valle del Indo (Pakistán)	4.700
1980	Terremoto en el S de Italia	4.689
1959	Tifón en Honsu (Japón)	4.580
1976	Terremoto en el NE de Turquía	3.921
1963	Deslizamiento del embalse del Vaiont (Italia)	3.000
1951	Erupción Monte Lamington (Papua N. Guinea)	3.000

<i>FECHA</i>	<i>EVENTO</i>	<i>VÍCTIMAS</i>
1980	Terremoto en El Asnam (Argelia)	2.633
1932	Huracán en Santa Cruz del Sur (Cuba)	2.500
1959	Inundaciones en el O de México	2.000
1954	Terremoto en el N de Afganistán	2.000
1930	Huracán en Santo Domingo (Rep. Dominicana)	2.000
1953	Inundaciones en las costas de Holanda	1.900
1963	Huracán en Cuba	1.750
1986	Erupción gases tóxicos en Lago Nyos (Camerún)	1.734
1955	Inundaciones en Pakistán e India	1.700
1931	Huracán de Belize	1.600
1954	Terremoto en Orleansville (Argelia)	1.600
1980	Inundaciones en el N de India	1.600
1963	Erupción del Monte Agung (Bali, Indonesia)	1.584
1977	Terremoto en Bucarest (Rumanía)	1.570
1902	Erupción del Mont Soufrière (St. Vicente)	1.565
1982	Terremoto de Dhamar (Yemen)	1.507
1979	Huracán en la República Dominicana	1.400
1914	Erupción del monte Taal (Filipinas)	1.400
1983	Terremoto en Erzurum/kars (Turquía)	1.346
1981	Terremoto en el NE de Irán	1.200
1986	Terremoto en San Salvador (El Salvador)	1.100
1963	Terremoto en Skopje (Yugoslavia)	1.100
1984	Tifón en Filipinas	1.062
1987	Deslizamientos en Aragua/Maracay (Venezuela)	900
1985	Tifón en Vietnam	800
1967	Inundaciones en Brasil	785
1978	Ciclón en Sri Lanka	740
1972	Inundaciones en Korea	672
1987	Tifón en Filipinas	660
1969	Inundaciones en Túnez	540
1987	Inundaciones y deslizamient. en Natal (S. Africa)	518
1984	Inundaciones y deslizamientos en Recife (Brasil)	508
1987	Deslizamiento en Medellín (Colombia)	500
1981	Inund. y desliz. En Monte Semeru (Indonesia)	500
1951	Tornado en Islas Comoros	500
1967	Inundaciones en Portugal	462
1967	Deslizamiento en Río de Janeiro (Brasil)	436
1982	Inundaciones en Nagasaki (Japón)	332
1974	Deslizamientos en el valle del Mantaro (Perú)	310
1974	Deslizamiento en Quebrada Blanca (Colombia)	300
1973	Inundaciones en el SE de España	300
1983	Deslizamiento en el Monte Sale (China)	277
1988	Deslizamientos en Jammu y Kashmir (India)	250
1983	Inundaciones en Santa Cruz (Bolivia)	250
1972	Inundación en Rapid City (Dakota del Sur, USA)	238
1954	Deslizamiento en Blons (Austria)	200
1968	Deslizamiento en Mandwe (Kivu, Zaire)	154
1966	Deslizamiento escombr. Carbón (Aberfan, R.U.)	144
1893	Deslizamiento en arcillas tixotrópicas (Noruega)	120
1987	Deslizamiento en Cochancay (Ecuador)	100
1972	Deslizamiento en Hong Kong	100
1971	Deslizamiento en Khinjan Pass (Afganistán)	100
1971	Deslizamiento en Telefumin (Nueva Guinea)	100
1874	Deslizamiento en Azagra (Navarra, España)	91
1965	Deslizamiento en Saas-Fee (Suiza)	90
1996	Desbordam. torrente en Biescas (Huesca, España)	87
1958	Rotura de macizo rocoso (N. Escocia, Canadá)	75
1903	Deslizamiento en Alberta (Canadá)	38

La media mundial de muertos debidos a movimientos en masa ha sido estimada en 600 víctimas/año por Schuster y Fleming (1988). Es probable, de todas formas, que esta media infravalore ampliamente los hechos, dado que muchas de las víctimas causadas por estos movimientos son sistemáticamente incluidas, tal y como se ha dicho, en las debidas a inundaciones y terremotos.

En EEUU se ha estimado que los costes directos e indirectos ocasionados por los movimientos de terreno son superiores a 1000 millones de dólares anuales (Schuster y Krizek, 1978). En Italia, la media anual de pérdidas se ha estimado en 140 millones de dólares (Arnould y Frey, 1977). Un análisis de las consecuencias económicas producidas por los movimientos en masa en diversos países del mundo puede verse en el trabajo editado por Brabb y Harrod (1989).

Para España, García Yagüe (1984) evaluó los daños anuales debidos a deslizamientos en 1.000-2.000 millones de pesetas. Un estudio realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), sobre la incidencia económica y social de los riesgos naturales en España (Ayala et al., 1987; González de Vallejo, 1988) estima, para un lapso de tiempo comprendido entre el año 1986 y el año 2016, unas pérdidas totales debidas a riesgos naturales del orden de 8,1 a 4,9 billones de pesetas, dependiendo de que se adopte una hipótesis de riesgo máximo o medio. Según el mismo estudio, los movimientos en masa producirían unas pérdidas para el mismo periodo, entre 0,9 y 0,8 billones de pesetas (del 11% al 15% del total; detrás de las inundaciones y de la erosión hídrica), dependiendo de la hipótesis adoptada (hipótesis de riesgo medio: deslizamientos máximos producidos según los datos de los 30 últimos años; hipótesis de riesgo máximo: deslizamientos máximos, suponiendo un periodo de retorno de 500 años). Según Ayala y Ferrer (1989), la mayor parte de las pérdidas producidas por movimientos en masa derivan de los daños ocasionados en vías de ferrocarril y carreteras y de los costes de las obras de reparación. Así, RENFE ha calculado un coste producido por movimientos de terreno superior a 6.000 Ptas/km/año, y aunque las pérdidas unitarias en carreteras son aproximadamente un tercio, su costo total es muy



superior, debido al mayor kilometraje. No obstante, según dichos estudios, las pérdidas económicas debidas a deslizamientos se podrían reducir en un 90%, con un gasto equivalente al 10% de las pérdidas esperables.

En España no son frecuentes las víctimas causadas por movimientos en masa, salvo en contadas ocasiones (Azagra, Navarra, 1874: 91 muertos). Según Ayala y Ferrer (1989), en España habrían muerto como consecuencia de estos procesos, hasta la fecha del estudio, al menos 117 personas. Por otra parte, el ITGE contabilizó 17 personas muertas debidas a movimientos en masa en el periodo 1991-93, lo que equivale a 5,7 víctimas/año (Ayala, 1995). En el citado estudio del IGME (Ayala et al., 1987), el número de muertos potenciales, para el periodo de 30 años, sería de 70, es decir, aproximadamente la mitad de la cifra anterior.

Los datos sobre desastres producidos por movimientos de ladera en España son por el momento insuficientes para elaborar a partir de ellos análisis precisos, pero, en todo caso, indican que no han sucedido desastres comparables a los de países como Suiza (Pleurs con 2430 muertos en 1916), Italia (Vaiont, 3000 víctimas en 1963) o Colombia (Medellín, 500 muertos en 1987), por citar algunos ejemplos, (Ayala, 1995). Díaz de Terán et al. (1997) presentan una relación de algunos de los deslizamientos más catastróficos ocurridos en España y sus consecuencias.

Según Ayala et al. (1987) y dependiendo de que se considere la hipótesis de riesgo máximo o medio, en el País Vasco las pérdidas esperables debidas a deslizamientos para el periodo 1986-2016 estarían entre los 36.000 y 22.000 millones de pesetas (0,2-0,6 billones de pesetas para el total de los riesgos geológicos, una de las zonas más afectadas de España). Asimismo, se han calculado para la misma región unas pérdidas potenciales de vidas humanas entre 50 y 10, según la hipótesis planteada. Sin embargo, las estimaciones de pérdidas causadas por las inundaciones de agosto de 1983, arrojan: 200.000 millones de pesetas para toda la Comunidad Autónoma Vasca (Ayala, 1988); 150.000 millones y 40 víctimas para el País Vasco y Cantabria (González de Vallejo, 1988); 140.000 millones sólo para Vizcaya (Diputación Foral de Vizcaya, 1984). Estas



cifras aunque evidentemente aproximadas, son equivalentes a las pérdidas totales esperables para el total de los riesgos geológicos en el periodo de 30 años indicado en el trabajo anterior; tales pérdidas son, en buena parte, debidas a movimientos en masa.

La Dirección de Atención de Emergencias del Gobierno Vasco, reunió en un conjunto documental un inventario de las áreas sometidas a posibles inestabilidades de laderas (del Val et al., 1996). En este trabajo se evaluaron las pérdidas debidas a movimientos de terreno en 25.000 millones de pesetas, para el periodo 1980-1995, lo que duplica lo estimado por el IGME. En el citado estudio y para el mismo periodo se hace referencia a 12 víctimas y otras pérdidas no contabilizadas. A pesar de que todas estas cifras deben ser analizadas con precaución, permiten vislumbrar la magnitud del problema en esta comunidad.

Como los deslizamientos producen en general escasas pérdidas de vidas humanas y sólo altas pérdidas económicas, el impacto psíquico y social sobre la población es transitorio, a diferencia de otros riesgos cuyo recuerdo permanece en la memoria durante más tiempo. Esa menor percepción del impacto de los deslizamientos individuales, puede ser otra causa por la que estadísticamente los daños están muy fragmentados (UNDRO, 1991). Así, a pesar de que la mayor parte de las víctimas causadas por grandes desastres, como por ejemplo el Mitch (1998) o el desastre de Venezuela de 1999, hayan sido debidas a movimientos en masa, en la memoria colectiva se recuerdan como víctimas debidas a huracanes e inundaciones.

Los sociólogos han tratado de determinar por qué la gente vive en zonas amenazadas y, más sorprendentemente aún, por qué vuelven a sus hogares y sus trabajos y reconstruyen allí su vida habitual (Burton et al., 1968). Sus resultados indican, entre otras causas, que la mayoría de la gente que vive en estas zonas no tiene una percepción precisa del riesgo. El carácter “imprevisible”, súbito y violento de muchos de estos eventos determina una actitud de impotencia de la sociedad ante los mismos (González de Vallejo, 1988). Esta inadecuada percepción del riesgo probablemente se debe, en gran parte, a que los instrumentos de evaluación y predicción existentes



raramente permiten hacer estimaciones de probabilidad en términos cuantitativos. Esa cuantificación es la que puede permitir incorporar estos procesos a sistemas de tratamiento del riesgo similares a los existentes en otros ámbitos, como por ejemplo en los accidentes de carretera. La probabilidad de éstos se puede determinar para distintas regiones, en los términos que se reflejan en las correspondientes primas de los seguros, cosa difícil de hacer actualmente con los deslizamientos.

La ONU (1992) señala el rápido aumento en todo el mundo de las pérdidas económicas y de vidas humanas debidas a desastres naturales, existiendo una estrecha relación entre estas pérdidas y la degradación del medio ambiente. Asimismo, Wold y Jochim (1989) indican que, a pesar de la disponibilidad de técnicas para la gestión y control de los movimientos en masa, las pérdidas debidas a éstos están incrementándose. En una primera aproximación, esto parece debido al incremento de la presión humana en áreas peligrosas y al no reconocimiento, por parte de administraciones públicas y de particulares, de las amenazas existentes y, por tanto la no aplicación de medidas apropiadas para su mitigación.

Parte de las dificultades mencionadas se podrían reducir si se dispusiera de herramientas con validez cuantitativa, debidamente contrastada y demostrable, para evaluar y predecir las amenazas y/o los riesgos.

### **1.3. Percepción, prevención y predicción; mapas de amenazas**

Las primeras medidas conocidas para proteger los edificios de los efectos de los riesgos naturales, concretamente de los terremotos, se aplicaron hace más de 2000 años. Pero las primeras políticas de investigación orientadas a la evaluación de la peligrosidad y a su reducción, realmente empiezan con el trabajo de White (1936; 1945; en Smith, 1992), quien, por primera vez y para inundaciones, reconoció que los esquemas de ingeniería no eran la única forma de atajar el problema.

A finales de los años sesenta comenzó en Estados Unidos un programa para aplicar los nuevos descubrimientos a otras amenazas geológicas y a extender las investigaciones a otros lugares del mundo (White, 1974). En esa época la investigación relacionada con las amenazas se había difundido ya a una amplia variedad de disciplinas académicas, desde la geología hasta la sociología. En los años setenta se intensificó notablemente la investigación en este tema debido a: las fluctuaciones climáticas de la década; la moda del neocatastrofismo; la creencia generalizada en la necesidad de enfocar la ciencia hacia los asuntos humanos, basada en la visión de que las amenazas ocurren en la interfase entre los sistemas natural y humano; y a una creciente creencia de que la dificultad de enfrentarse a las amenazas reside en la diferencia entre el mundo real y la visión de los gestores (Smith, 1992). Por ello, en esa década se dio un empuje importante al análisis de este problema.

Los años ochenta suponen una reorientación del enfoque, poniendo énfasis en los problemas del tercer mundo y en los riesgos tecnológicos, a la vez que los estudios se hicieron más interdisciplinarios, teniendo en cuenta la estrecha frontera existente entre lo natural y lo humano.



En los noventa, como se ha comentado, lo más significativo ha sido la declaración de la IDNDR. Dentro de los esfuerzos desarrollados durante esa década, se encuentran toda una serie de actuaciones encaminadas a lograr una mejor percepción del riesgo.

La percepción del riesgo desencadena la adopción de medidas tendentes a reducir sus consecuencias. Sin embargo, en el caso de los movimientos en masa esto no es sencillo, debido a la complejidad del fenómeno, cuyos mecanismos de funcionamiento no se conocen en general de manera detallada. La mitigación de los efectos sólo puede ser exitosa si existe un buen conocimiento de la frecuencia, carácter y magnitud del proceso en un área; incluso si el riesgo no puede evaluarse con suficiente precisión, siempre es más eficaz tratar de prevenir que no simplemente responder ante la crisis.

Existen dos tipos de medidas para la reducción del riesgo (UNDRO, 1991): las estructurales (intervención física) y las no estructurales (planeamiento, legislación, sistemas de alarma, planes de evacuación, etc.). Dentro de las medidas no estructurales, los mapas de peligrosidad o amenaza y riesgo, constituyen una herramienta de gran utilidad para mitigar las consecuencias de los procesos potencialmente peligrosos, puesto que proporcionan información adecuada para una mejor ordenación y gestión del territorio y para el desarrollo de planes de emergencia y de protección civil. Naturalmente, si todas las áreas expuestas a riesgo se identificaran con precisión, se podrían evitar o aminorar las pérdidas de forma simple y eficaz. Además, una vez identificada la amenaza es posible adoptar estrategias de respuesta que pueden variar desde no hacer nada hasta controlar completamente el proceso que amenaza. Por ello, la UNDRO (1991) recomienda regular el uso del suelo como mejor sistema para la reducción del riesgo, para lo que se necesitan mapas que muestren los diferentes grados de exposición al mismo. Las medidas estructurales para actuar sobre el proceso o para reducir la vulnerabilidad son posibles, pero requieren normalmente actuaciones de ingeniería muy costosas y, de cualquier forma, se deberían hacer en combinación con la regulación del uso del suelo. La cartografía de zonas amenazadas es beneficiosa fundamentalmente cuando se contemplan áreas para desarrollar en el futuro. En estos casos las autoridades pueden requerir medidas de precaución adicionales, necesarias

para la coexistencia con el riesgo; es, por ejemplo, el caso de los PER (Plan de exposición al riesgo) en Francia (Flageollet, 1989). Como señala Bjerrum (1967), la identificación de las áreas inestables y la zonificación de una región en grados de diferente potencialidad de deslizamientos, debe constituir un paso previo a cualquier análisis de estabilidad basado en investigaciones geotécnicas detalladas, que solamente son viables en lugares concretos y no para áreas extensas.

Dado que los deslizamientos generalmente implican pequeñas pérdidas distribuidas en grandes áreas, hasta hace pocas décadas no se han dedicado grandes esfuerzos a mejorar su conocimiento y control. Las principales actuaciones consistían en estabilizar grandes movimientos ya iniciados y claramente identificados.

De todas las amenazas naturales, los deslizamientos son uno de los procesos que ofrecen más posibilidades de control (Tabla 1.1). Pero la delimitación de áreas susceptibles de experimentar rotura no puede hacerse con la misma precisión que, por ejemplo, la de áreas sujetas a inundaciones, aunque pueden ser localizadas mejor que otras amenazas, como los tornados. Las causas que generan inestabilidad en el terreno se conocen relativamente bien, por lo que es posible hacer una cartografía de las zonas con probables problemas futuros y, ya que la estabilidad está afectada por determinados eventos (como los meteorológicos), se pueden hacer predicciones aproximadas en el tiempo (Varnes, 1984).

El desarrollo de técnicas de cartografía de peligrosidad y riesgo ha estado dificultado, en gran parte, por la complejidad y diversidad de los movimientos en masa. A pesar de que las técnicas de cálculo de estabilidad de taludes (perspectiva de la ingeniería) han evolucionado notablemente, con lo que es posible determinar la estabilidad de una ladera, su aplicación al estudio de un área es totalmente inviable, por coste y tiempo, dada la intensidad y detalle de las observaciones que requieren este tipo de estudios. Así, según Hutchinson (1995) el coste de los estudios geotécnicos de detalle en Gran Bretaña oscila entre 0,5 y 5 Libras/m<sup>2</sup>, por lo que no es posible aplicar este tipo de métodos para evaluar la amenaza, ni siquiera en áreas reducidas como un municipio.



Por ello, el análisis cartográfico regional debe abordarse con otros enfoques. Otra aproximación al problema consiste en determinar la estabilidad futura a partir del análisis de las condiciones identificadas en movimientos en masa relictos, antiguos, activos, futuribles, etc., basándose en criterios geomorfológicos y geológicos (Bell et al., 1987). El problema de este enfoque es plasmar de forma objetiva y cuantitativa lo que un geomorfólogo experimentado observa subjetivamente; para ello el investigador debe interpretar, entre otras cosas, si las condiciones ambientales que causaron el movimiento todavía existen.

La cartografía de la amenaza debida a movimientos en masa empieza con el reconocimiento de la presencia de las masas deslizadas o potencialmente inestables. Ninguno de los pasos de la investigación (caracterización, análisis del riesgo, y diseño de mitigaciones), puede llevarse a cabo sin el reconocimiento previo de las zonas inestables. Las causas más importantes de los movimientos que afectan a los proyectos de ingeniería pueden relacionarse directamente con la omisión de esta etapa de reconocimiento (Cotton et al., 1996). A modo de ejemplo, se puede citar el deslizamiento ocurrido en Ampuero (Cantabria) en la primavera de 1999 como consecuencia de la reactivación de un antiguo deslizamiento no identificado, por las obras de una carretera de nuevo trazado que une dicha localidad con Colindres.

La amenaza siempre es incierta, como consecuencia de la incompleta comprensión de los mecanismos naturales que actúan y por la imposibilidad de obtener información suficiente con costos razonables. Las incertidumbres impiden tener predicciones exactas de la ocurrencia de la amenaza; no obstante, se puede hacer una evaluación objetiva a partir del análisis estadístico de los datos instrumentales y/o de los datos tomados de eventos pasados (Wu et al., 1996). Así, en el estado actual del conocimiento científico no es posible predecir cuándo y en qué lugar exacto va a suceder un fenómeno potencialmente dañino, pero se puede tener una idea de dónde y con qué frecuencia.

Los estudios de amenazas y/o riesgos se han llevado a cabo, casi sin excepción, de forma cualitativa, usando términos como alto, medio o bajo; o a, b, c, para definir las distintas clases. Sería deseable, a fin de avanzar en la comprensión de estos procesos y en su percepción por parte de autoridades y público, la utilización de un lenguaje cuantitativo. Eso, evidentemente, no eliminaría por sí solo la incertidumbre, pero serviría para cuantificarla en la predicción, expresándola como una probabilidad, tal y como sugieren Jefferies et al. (1996).

Cuanto menor sea la necesidad de interpretación de los resultados científicos, mayor será la eficacia y aplicabilidad de los mismos. La información aportada no puede ser aplicada por los potenciales usuarios si no está disponible, es insuficiente, o no es fácilmente entendible o utilizable (Costa y Baker, 1981). Por eso, la UNDRO (1991) recomienda la presentación de mapas analíticos que representen las características observables y mapas sintéticos que muestren la interpretación de forma simplificada. Igualmente indica que la evaluación del riesgo no debería hacerse independientemente de la planificación y de la toma de decisiones, que han de llevarse a cabo desde una perspectiva multidisciplinar, y que hay que reducir el tiempo y el costo de la evaluación geocientífica, minimizando el trabajo de campo y los muestreos. Por último, señala que cuando hay malas interpretaciones de las amenazas, se pone en entredicho la credibilidad de los investigadores y el uso de datos científicos como soporte para la toma de decisiones, lo que es y ha sido bastante frecuente.

Podríamos caricaturizar la situación existente en este ámbito por medio del siguiente trabalenguas: “como no se puede prever hay que proveer métodos para predecir y así prevenir”.

En el ámbito de la evaluación y predicción de riesgos geológicos existe una actitud generalizada, que afecta tanto a expertos como a usuarios potenciales, que contrasta curiosamente con la que se da en otros ámbitos más familiares para el público en general, como por ejemplo el de la predicción meteorológica. Una primera característica de este tipo de predicción que es preciso reconocer y aceptar es que,



como cualquier predicción o extrapolación relativa a acontecimientos futuros, no puede ser absolutamente precisa; es importante ser conscientes de que no se puede eliminar totalmente la incertidumbre, pero sí debería ser posible conocer cuál es el nivel de la misma. Todos, empezando por los propios especialistas, aceptamos que las predicciones meteorológicas no son infalibles, pero eso no elimina su utilidad. No estaría justificado que, ante la imposibilidad de lograr predicciones sin errores, se dejaran de hacer (¡y utilizar!) los pronósticos meteorológicos. Lo que se debe tratar de hacer es lograr predecir la ocurrencia de futuros eventos geológicos peligrosos con niveles de fiabilidad aceptables y, sobre todo, contrastados y conocidos. Para esto, es imprescindible aplicar procedimientos de validación independientes de los modelos y métodos aplicados. Se podría llegar así a formular predicciones sobre procesos geológicos en términos similares a los pronósticos meteorológicos que se realizan en muchos países, en los cuales se indica que “la probabilidad de lluvias para pasado mañana es de un 20%”. Naturalmente, no es razonable clamar contra dicha predicción si, de hecho, llueve, pues en este ámbito se acepta que una probabilidad baja no es lo mismo que una imposibilidad.



## 1.4. Aspectos conceptuales y terminología.

Sin la pretensión de hacer una revisión crítica completa de la terminología al uso relacionada con el tema, se ha considerado necesario definir los términos empleados en este trabajo, dada la diversidad terminológica y conceptual existente en relación con los movimientos en masa y sus tipos, la peligrosidad, el riesgo, la vulnerabilidad, actividad, etc. A pesar de la aparente confusión que generan tantos términos y clasificaciones, son absolutamente imprescindibles para la buena comunicación científica. Una clasificación es útil en la medida que “es un medio para descubrir un cierto grado de orden en una población de individuos y, fundamentalmente, para mejorar el conocimiento del fenómeno que se analiza”(Corominas, 1989). La diversidad de términos surge de los distintos aspectos y matices implícitos en los conceptos.

### 1.4.1. Movimientos en masa

Varnes (1978) definió deslizamiento (*landslide*) como “un movimiento, hacia abajo y hacia fuera, de los materiales que forman las laderas compuestas por rocas, suelos, derrubios o rellenos artificiales”. Cruden (1991), en un trabajo para el Working Party on World Landslide Inventory lo definió, de forma más simple pero a la vez más amplia, como “un movimiento de una masa de roca, tierra o derrubio ladera abajo”. Habitualmente se usa el término deslizamiento, entendido en sentido amplio, para designar casi todas las variedades de movimientos en masa producidos en laderas, incluyendo algunos procesos como caídas, vuelcos o flujos de derrubios, en los que no hay deslizamiento o este es muy pequeño (Varnes, 1984). El término deslizamiento, está legitimado por el uso común y habitualmente se emplea como sinónimo de movimiento en masa, pero no es el más preciso para definir el proceso en conjunto y su uso, estrictamente hablando, debería restringirse para un tipo específico de movimiento. Desde este punto de vista, los términos movimientos de ladera (Varnes, 1978) o procesos de ladera, o de pendiente/vertiente, o movimientos en masa son más



precisos. Brunsden (1984), se inclina por el término movimientos en masa, puesto que con el calificativo “en masa”, se establece la diferencia con otros procesos en los que el transporte no es masivo. Así, la UNDRO (1991) define movimientos en masa como “los procesos y formas que incluyen el transporte, ladera abajo, de suelos y rocas bajo la influencia de la gravedad”. En este trabajo se emplea fundamentalmente el término movimiento en masa; no obstante, en ocasiones y por razones de estilo literario, se utiliza el término deslizamiento, en sentido amplio, u otros sinónimos. Esto sirve simplemente para paliar una laguna del lenguaje común, que carece de un término simple y genérico como puede ser “frana” en italiano. Su equivalencia más próxima en español, “argayo” habitualmente se aplica más bien a movimientos de dimensiones no muy amplias; en muchos países de Iberoamérica se utilizan los términos genéricos como “deslave”, aplicado preferentemente a los flujos, o “derrumbe”, empleado más bien para deslizamientos y desprendimientos.

#### **1.4.2. Tipos de movimientos en masa**

En la literatura sobre este tema existen más de una treintena de clasificaciones de movimientos en masa (Cotton et al., 1996). El elevado número de clasificaciones existentes se justifica por la complejidad de estos procesos, que incluye una gran variedad de tipos (Hansen, 1984b). De hecho, una misma litología da lugar a movimientos morfológicamente muy distintos y bajo una misma forma aparente tienen cabida diversos mecanismos de rotura (Corominas, 1989). Como consecuencia, todas las clasificaciones tienen inconvenientes y, como señala Yatsu (1967), una clasificación completa de todo el conjunto de movimientos en masa ni existe ni tendría sentido, puesto que en la realidad muchos de los movimientos corresponden a transiciones entre las principales categorías normalmente definidas. Debido a que es difícil combinar todos los casos en una taxonomía estándar, más útil que una clasificación, siempre en cierto modo arbitraria, puede ser una descripción detallada de los procesos involucrados.

Una de las primeras clasificaciones fue la propuesta por Sharpe (1938), quien hizo una clasificación descriptiva, distinguiendo rasgos basados en la cantidad de agua o hielo intersticial, la naturaleza del movimiento (flujo o deslizamiento) y la velocidad del mismo. Carson y Kirkby (1972) proponen tres tipos de movimientos: deslizamiento, flujo y levantamiento (expansión y subsidencia). Otras clasificaciones más detalladas, han sido publicadas por Skempton y Hutchinson (1969), Nemcok et al. (1972), Blong (1973), Coates (1977), Varnes (1978), Nilsen et al. (1979), Hutchinson (1988), Brunsden (1985), Corominas (1989), Casale et al. (1994), Cruden y Varnes (1996), etc. En la mayoría de los casos, los criterios de clasificación son el tipo de movimiento (tipo cinemático) y el material involucrado. Así, por ejemplo, la propuesta por Varnes (1978) para la *Highway Research Board*, quizás la más extendida al menos en ámbitos de ingeniería, clasifica los movimientos en masa en: caídas, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos que afectan a roca, derrubios o tierras. Hutchinson (1988), quien propone el sistema quizás mas completo, clasifica los movimientos en masa en ocho categorías, con numerosas subdivisiones, basándose en la morfología, el mecanismo, el tipo de material y la tasa de movimiento. Revisiones de distintas clasificaciones propuestas y de los criterios utilizados en las mismas se presentan en Hansen (1984b), Carrara et al. (1985) y Flageollet (1989).

En este trabajo se adopta una clasificación basada en la propuesta por los proyectos europeos TOFLEC y TESLEC (Dikau et al., 1996a; Dikau et al., 1996b), porque resulta simple y apropiada para las condiciones europeas. Dicha clasificación (Casale et al., 1994; Dikau et al. 1996a y b), se resume en la Tabla 1.3. La Tabla 1.4 presenta los términos castellanos utilizados como equivalentes de los originales ingleses y en la Tabla 1.5 se muestra la equivalencia de algunos términos en vascuence. Esta clasificación es muy similar a la de Varnes (1978), aunque incorpora algunas observaciones aportadas por Hutchinson (1988). Asimismo, incorpora la clasificación propuesta por la International Geotechnical Society/UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI), (UNESCO, 1993), si bien los términos en español son los que aparecen en Dikau et al. (1996), los cuales derivan en su mayor parte de la clasificación de Corominas (1989). La clasificación TOFLEC/TESLEC se



fundamenta en la distinción de cinco tipos de movimientos elementales: desprendimientos, vuelcos, deslizamientos (rotacional y traslacional), expansión lateral, flujos y movimientos complejos, desarrollados sobre rocas derrubios y suelos.

Desprendimiento implica el movimiento de material en caída libre en acantilados o taludes con pendientes cercanas a la verticalidad. Vuelco, muy similar en muchos aspectos al desprendimiento, denota cierto grado de basculamiento. Deslizamientos son aquellos movimientos que se materializan sobre una superficie de cizalla. Los deslizamientos pueden subdividirse en rotacionales y traslacionales (o traslacionales), de acuerdo con la forma de la superficie de rotura, bien sea semicircular o generalmente planar, respectivamente. La extensión lateral produce movimientos muy lentos en pendientes de muy bajo ángulo. Los flujos son masas que, debido al agua o al aire, presentan un comportamiento fluido. Los movimientos complejos son movimientos en los que coexisten dos o más tipos cinemáticos descritos anteriormente. Normalmente, en los movimientos en masa están implicados más de un tipo de movimiento, bien desarrollándose en diferentes partes del área deslizada, como en el caso de los movimientos compuestos, bien por comenzar por un mecanismo y evolucionar a otro (movimientos complejos); es el caso de los flujos de derrubios que suelen comenzar con un deslizamiento de derrubios y terminan evolucionando a un flujo. Cuando se produce solamente un movimiento en masa aislado, se habla de movimiento singular. Por contraposición, un movimiento en masa múltiple es el resultado de repetidos movimientos del mismo tipo, que van involucrando sucesivamente las zonas de rotura o depósitos precedentes; cuando esto no sucede así, sino que por el contrario, se producen sucesivamente distintos movimientos singulares del mismo tipo, relacionados desde un punto de vista evolutivo, se habla de movimientos en masa sucesivos. Una buena revisión de los criterios aplicables para el reconocimiento de los tipos de movimientos descritos, a través de sus rasgos geomorfológicos, es la presentada por Rib y Liang (1978).

Los suelos, en el sentido geotécnico del término, se definen como “materiales no consolidados que cubren al substrato rocoso, y que incluyen los suelos, los coluviones,

regolitos y otros sedimentos ” (Cotton et al., 1996). Estos, a su vez, pueden dividirse en derrubios (contienen cantidades significativas de fragmentos de grano grueso, con al menos 20% de la masa con partículas superiores a 2 mm) y tierras (constituidas por materiales finos en los que > 80% de las partículas son menores de 2 mm). En la clasificación TOFLEC/TESLEC el termino suelo se restringe y se equipara al término tierras. Roca, por el contrario, “es una masa coherente y consolidada de proporciones y extensión significativa” (Dikau et al., 1996a).

Las referencias a las distintas partes de los movimientos en masa y a la geometría de los mismos se muestran en la Figura 1.2. Los términos están basados en los propuestos en *The Multilingual Landslide Glossary* (UNESCO, 1993).



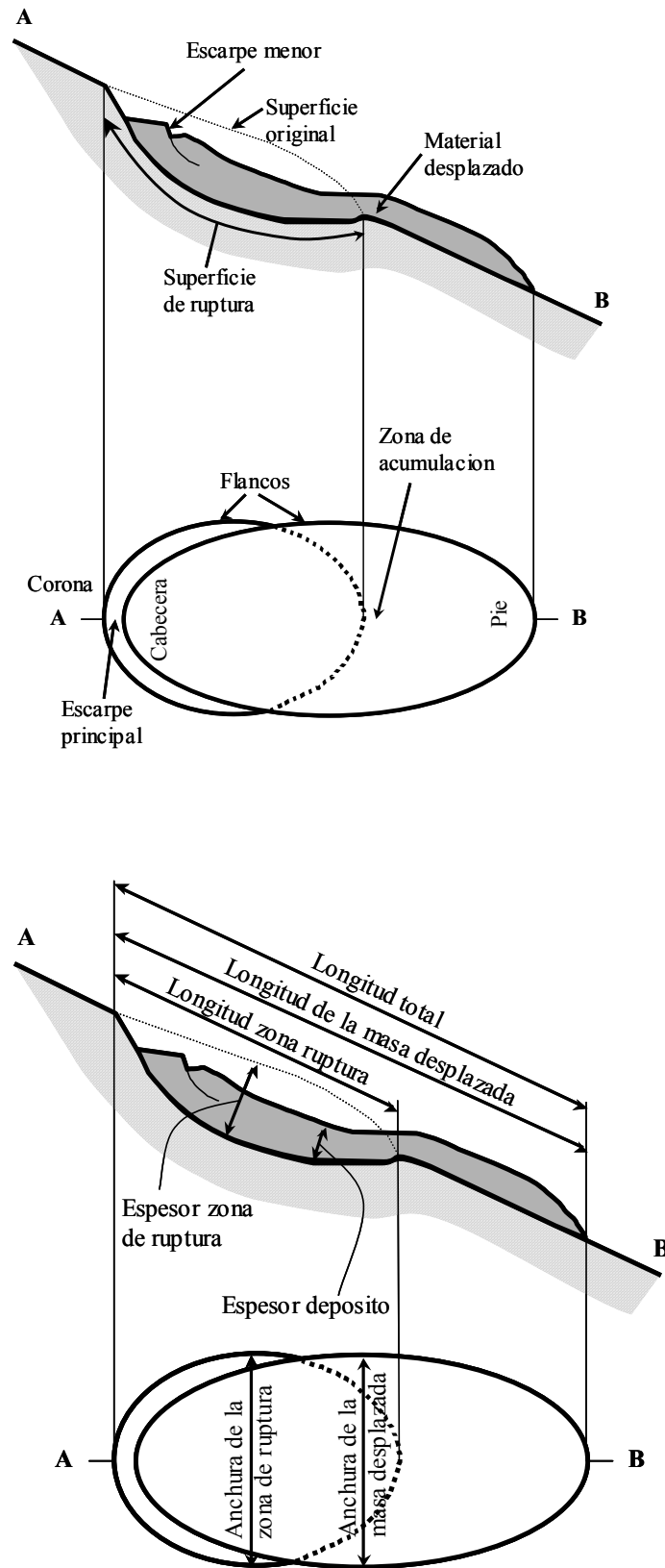


Figura 1.2. Terminología para la descripción de los movimientos en masa.

Tabla 1.3. Clasificación de movimientos en masa adoptada en este trabajo (modificada de Casale et al. 1994 y Dikau et al., 1996a).

<b>TYPE</b>	<b>Rock</b>	<b>Debris</b>	<b>Soil</b>
<b>Fall</b>	rock fall	debris fall	soil fall
<b>Topple</b>	rock topple	debris topple	soil topple
<b>Slide (rotational)</b>	single (slump) multiple successive	single multiple successive	single multiple successive
<b>Slide (translational)</b> <b>Non-rotational</b> <b>Planar</b>	block slide rock slide	block slide debris slide	slab slide mudslide
<b>Lateral spreading</b>	rock spreading	debris spread	soil (debris) spreading
<b>Flow</b>	rock flow (Sackung)	debris flow	soil flow
<b>Complex (with run-out or change of behaviour downslope; note that nearly all forms develop complex behaviour)</b>	rock avalanche	flow slide	slump- earthflow



Tabla 1.4. Equivalencia inglés/español de los términos relativos a los tipos de movimientos en masa (del proyecto TESLEC).

<b>Inglés</b>	<b>Español</b>
Rock fall	Desprendimiento de roca, o caída (referido a bloques individuales)
Debris fall	Desprendimiento de derrubios
Soil fall	Desprendimiento de suelos
Rock topple	Vuelco de rocas
Debris topple	Desplome de derrubios
Soil topples	Desplome de suelos
Single slide	Deslizamiento simple (rotacional)
Multiple slide	Deslizamiento múltiple (rotacional)
Sucessive slide	Deslizamiento sucesivo (rotacional)
Block slide	Deslizamiento en bloques (translacional)
Rock slide	Deslizamiento de roca (translacional)
Debris slide	Deslizamiento de derrubios (translacional)
Mudslide	Coladas de barro
Rock	Extensión lateral en rocas
Soil spreading	Extensión lateral en suelos (arcillas)
Rock flow	Flujos de rocas
Debris flow	Corriente o flujo de derrubios
Mud flow	Flujo de barro
Sand flow	Flujo de arena (seco)
R. fall	Alud o avalancha de rocas
Flow slide	Flujo deslizante
Slup-earthflow	Rotación con flujo de tierras



Tabla 1.5. Terminología en vascuence.

Higiduraren orbaina	Cicatriz de movimiento
Askatutako masa	Masa desprendida
Lurretena (lurretenak)	Término genérico para designar a los deslizamientos
Lurreten errotakorra	Deslizamiento rotacional
Lurreten launa	Deslizamiento planar
Lurhausia	Término usado por los lugareños de Deva para designar los desprendimientos de tierras (equivalente al término argayo).
Harrosko-jauzia	Caída de bloques

### 1.4.3. Actividad y frecuencia

Cuando se desestabiliza una ladera, el movimiento de la masa suele continuar, de manera más o menos intermitente, a lo largo de un determinado tiempo. Así, laderas que se han movido previamente pueden moverse otra vez, por lo que la identificación de movimientos en masa y de su estado de actividad constituye una parte fundamental de la predicción de eventos futuros. La Tabla 1.6 muestra los distintos tipos de actividad que propone la UNESCO (1993). Una relación de rasgos indicativos de actividad e inactividad de los procesos de ladera (Crozier, 1984), se presenta en la Tabla 1.7.



Tabla 1.6. Estados de actividad de movimientos en masa (a partir de UNESCO, 1993).

<b>Activo</b>	Actualmente se está moviendo
<b>Suspendido</b>	Se ha movido en los últimos 12 meses, pero no se está moviendo actualmente.
<b>Reactivado</b>	Actualmente activo, pero ha estado inactivo.
<b>Inactivos:</b>	No se ha movido en los últimos 12 meses.
<b>Durmiente</b>	Puede reactivarse
<b>Abandonado</b>	No puede reactivarse con las causas originales.
<b>Estabilizado</b>	Ha sido protegido contra las causas originales mediante actuaciones técnicas.
<b>Relicto</b>	Desarrollado bajo condiciones climáticas y/o geomorfológicas

Tabla. 1.7. Criterios indicativos de movimientos en masa activos (basado en Crozier, 1984).

<b>Signos de actividad</b>
Escarpes, terrazas y grietas con márgenes agudos.
Grietas y depresiones sin rellenos secundarios.
Movimientos secundarios en el eskarpe.
Las superficies de rotura presentan <i>slickensides</i> frescos y estrías.
Superficies de fractura frescas en bloques.
Sistema de drenaje perturbado; charcas y depresiones mal drenadas.
Crestas de presión en las márgenes.
Escarpe sin desarrollo de suelo.
Falta de vegetación o presencia de especies colonizadoras.
Diferencias de vegetación dentro y fuera del movimiento
Árboles inclinados sin crecimiento reciente.

A pesar de que algunas laderas sin deslizamientos previos pueden definirse como inestables, casi todas las evaluaciones de la estabilidad se basan en el reconocimiento de rasgos que indican movimientos pasados o activos (Bell, 1998). En este sentido, Crozier (1984) definió seis clases de estabilidad basadas en criterios de frecuencia o por su potencialidad de deslizamiento (Tabla 1.8).



Tabla 1.8. Clasificación de estabilidad de laderas: criterios de frecuencia y potencialidad (Crozier, 1984).

Clase I	Laderas con deslizamientos activos. Materiales en continuo movimiento; los rasgos están frescos y bien definidos. El movimiento puede ser continuo o estacional.
Clase II	Laderas sujetas a frecuentes movimientos, nuevos o reactivados. El movimiento no es regular. No es un fenómeno estacional. El desencadenamiento de los deslizamientos se produce por eventos cuyo periodo de recurrencia es de hasta 5 años.
Clase III	Las laderas están sujetas a actividad de forma esporádica. Está desencadenada por eventos de frecuencia superior a 5 años.
Clase IV	Laderas con evidencias de actividad previa, pero que no han sufrido reactivaciones en los últimos 100 años. La subclase IVa está caracterizada por presentar formas de erosión todavía evidentes. La subclase IVb se caracteriza por no presentar formas de erosión; la actividad viene indicada por los depósitos.
Clase V	Laderas que no muestran evidencias de actividad, pero que se consideran potencialmente inestables en un futuro. La potencialidad viene indicada por análisis del factor de seguridad o por analogía con laderas similares.
Clase VI	Laderas que no muestran evidencias de actividad y que son consideradas potencialmente estables.

Desde otro punto de vista, los movimientos en masa se van desencadenando a lo largo del tiempo, sin ser necesariamente reactivaciones de movimientos precedentes, dando lugar a una determinada distribución temporal. El tiempo medio entre movimientos en masa del mismo tipo y magnitud, en una zona dada, se denomina intervalo de recurrencia (Bell, 1998); este término también se aplica al intervalo medio entre movimientos en masa en general (González-Díez, 1995). El número de sucesos que

ocurren en cierto espacio de tiempo es lo que se conoce como frecuencia o probabilidad temporal. Si se representan en una gráfica los intervalos de recurrencia frente a la magnitud de los movimientos, se obtiene una curva de recurrencia (Figura 1.3). Por desgracia, la historia de la actividad de los deslizamientos rara vez está suficientemente documentada, con la consiguiente dificultad para evaluar los intervalos de recurrencia y, por tanto, la amenaza.

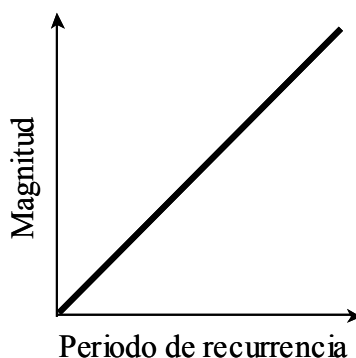


Figura 1.3. Curva de recurrencia.

Como se comenta más adelante, los deslizamientos superficiales generalmente movilizan toda la cobertera de materiales superficiales, por lo que en el lugar donde se produce la ruptura desaparece la cobertera superficial, quedando aflorante la roca del substrato. Por ello rara vez se reactivan, aunque sí progradan o retrogradan, dando lugar a movimientos múltiples o sucesivos, tal y como se ha descrito anteriormente.

#### 1.4.4. Magnitud

La magnitud de un movimiento en masa puede expresarse de manera sinóptica a través de su energía cinética, que es función de la masa movilizada y de la velocidad de desplazamiento, las cuales condicionan el potencial destructivo. El volumen, la velocidad (o tasa de movimiento), la profundidad del movimiento y cantidad de deformación de la masa desplazada, son responsables, y por lo tanto indicadores, de los posibles daños. En estudios de carácter regional, generalmente no es posible tener



un conocimiento detallado de todos los factores que definen la magnitud, si bien esta puede derivarse de las fotos aéreas y del reconocimiento de campo, aunque no es fácil establecer medidas exactas. Las clases de velocidad de desplazamiento propuestas por Varnes (1978) y WP/WLI (1994) se muestran en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9. Clases de velocidad para movimientos en masa (Varnes, 1978 y WP/WLI, 1994; en Dikau et al., 1996). Tasas superiores a 1,5 m/año, generalmente no son tolerables para edificios o vías de comunicación, siempre que las afecten en su totalidad.

	<b>Clases propuestas por WP/WLI (1994)</b>	<b>Clases propuestas por Varnes (1978)</b>
Extremadamente rápido	(hasta) 5 m/s	3 m /s
Muy rápido	3 m/min.	0-3 m /min.
Rápido	1-8 m/hora	1-5 m /día
Moderado	13 m/mes	1-5 m /mes
Lento	1,6 m/año	1-5 m /año
Muy lento	0,016 m/año	0-6 m /año
Extremadamente lento		

En el caso de la zona de estudio, la mayoría de los movimientos corresponden a las categorías de rápido o extremadamente rápido, si bien, dado que afectan a volúmenes generalmente limitados, la magnitud de los mismos no suele ser importante.

### 1.4.5. Amenaza o peligrosidad y riesgo

Para abordar la problemática de los mapas de amenaza y riesgo que se plantea en este trabajo, se han adoptado las definiciones que sobre el tema ha propuesto UNDRP (1991):

Peligrosidad o amenaza natural (*hazard; H*): probabilidad de que, dentro de un determinado periodo de tiempo y en un área determinada, ocurra un fenómeno potencialmente dañino. La amenaza, por tanto, incluye tanto la probabilidad espacial como la probabilidad temporal. La probabilidad se expresa en %, o como fracción de la unidad. De acuerdo con esta definición, el término amenaza, de uso frecuente en la literatura de muchos países iberoamericanos, se considera más acertado que el término peligrosidad, mucho más extendido en España.

Un concepto relacionado directamente con la peligrosidad, y en concreto con la probabilidad espacial de ocurrencia, es la susceptibilidad o propensión del terreno a deslizarse. Así, Brabb et al. (1972) utilizaron el % de superficie deslizada en el pasado en cada unidad litológica para calcular la susceptibilidad; tal y como había hecho Valentini (1967) con distintas clases de pendiente. Un término similar, aunque más sofisticado y muy poco usado, es la “deslizabilidad” (Ogata, 1974), calculada mediante la relación: incremento anual de movimientos/decremento anual de movimientos (estabilizados) / área de estudio.

Vulnerabilidad (*vulnerability; V*): grado de pérdida causado en un elemento o grupo de elementos expuestos, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada. Se expresa como fracción de la unidad o como %.

Riesgo específico (*specific risk; R<sub>f</sub>*): grado de pérdidas esperadas para cada categoría específica de elemento, debidas a un fenómeno natural.

$$R_f = H \times V$$



Elementos amenazados (*elements at risk; E*): población, propiedades, actividades económicas, incluidos los servicios públicos, etc. amenazados en una zona determinada. Estos elementos deben expresarse como número y valor total para cada tipo o categoría.

Riesgo total (*total risk; R<sub>t</sub>*): número de vidas pérdidas, personas perjudicadas, propiedades dañadas, o perturbación de la actividad económica, causados por un determinado fenómeno natural.

$$R_t = E \times R_s = E \times (H \times V)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, las dimensiones del  $R_t$  serían unidades monetarias, que necesariamente han de estar referidas a una unidad espacial y periodo temporal definidos.

De acuerdo con estas definiciones y en referencia a procesos de tipo geológico, el U.S. Geological Survey (1977) define la amenaza geológica (*geological hazard*) como la condición geológica, proceso, o suceso potencial que supone un peligro para la salud, seguridad o bienestar de un grupo de ciudadanos, o para las funciones o economía de una comunidad o entidad gubernamental mayor. Ayala (1990) define peligrosidad como “el conjunto de aspectos físicos que caracterizan a un fenómeno potencialmente dañino, especialmente su tipología, probabilidad de ocurrencia, dimensión espacial, duración y características dinámicas, que pueden definirse cualitativa o cuantitativamente”. Para el mismo autor, riesgo geológico es “todo proceso, situación o suceso en el medio geológico, natural, inducido o mixto, que puede generar un daño económico o social para alguna comunidad, y para cuya predicción, prevención o corrección han de emplearse criterios geológicos” (Ayala et al., 1988); riesgo también sería “el daño potencial anual producible por un fenómeno potencialmente dañino, que puede ser cuantificado en términos económicos o sociales o evaluado cualitativamente” (Ayala, 1990).



En la literatura se han propuesto muchas definiciones y conceptos acerca del riesgo. Así por ejemplo y sólo por citar unas pocas, Burton y Kates (1964), definen amenaza natural (*natural hazard*) como “aquellos elementos del medio físico perjudiciales para el hombre y causados por fuerzas ajenas a él”, mientras que Rahn (1986), resalta la potencialidad del peligro. Einstein (1988), diferencia entre *danger* (efectos de un determinado fenómeno, sin ningún tipo de previsión temporal), *hazard* (probabilidad en el tiempo) y *risk* (producto de las anteriores). De acuerdo con Smith (1992), peligro (*hazard*) sería una potencial amenaza a los humanos y a su bienestar, y riesgo sería la probabilidad de ocurrencia de la amenaza. Estas definiciones dan una idea de las diferencias conceptuales y terminológicas existentes. Debido a que los términos peligrosidad o amenaza y riesgo (*hazard* y *risk*) derivan de vocablos comunes, con acepciones prácticamente idénticas, carecen en español y en inglés de significados unívocos (Chacón et al., 1996a). Así, el término *hazard* puede traducirse con una doble acepción: por un lado quiere decir azar (que proviene del árabe y del que deriva *hazard*), suerte, casualidad; por otro lado, significa albur, peligrosidad, riesgo. El término *risk* se usa en inglés también con un doble sentido: para precisar el nivel de *hazard* en el sentido de malas consecuencias, pérdidas y daños; o para expresar el nivel de exposición a daños. Okrent (1980) emplea el siguiente ejemplo para ilustrar la diferencia entre ambos términos: dos personas cruzan el océano, uno en crucero regular y el otro en un bote de remos. La amenaza (*hazard*) es la misma en ambos casos, pero el riesgo (probabilidad de morir ahogado) será mucho mayor en el segundo caso que en el primero. Si, por el contrario, adoptamos la definición de la UNDRO (1991), la amenaza no será la misma porque la probabilidad de que el bote se hunda es mucho mayor; asimismo, y como consecuencia de ello, el riesgo tampoco será el mismo.

La vulnerabilidad, por el contrario, es un término generalmente aceptado, aunque la forma de expresarlo y, por lo tanto de evaluarlo, difiere enormemente dependiendo del autor.

Las definiciones de UNDRO (1991), que se adoptan en este trabajo, presentan una serie de ventajas con respecto a otras: a) proporcionan una estructura conceptual y



formal coherente; b) proporcionan una secuencia lógica de etapas metodológicas; c) son las definiciones más aceptadas, al menos en los estudios de ciencias de la tierra.

El término “zonificación de amenazas” (del inglés *hazard zoning*), se aplica a la división y clasificación de la superficie del terreno en áreas, de acuerdo con su grado de amenaza actual o potencial, sin implicar necesariamente restricciones o normas legales (Varnes, 1984). En español rara vez se utiliza; por el contrario, se emplean expresiones como “cartografía de peligrosidad”, “cartografía de amenazas”, “cartografía de susceptibilidad”, y quizás de forma más generalizada, “cartografía de riesgos” en sentido amplio. Recientemente, coincidiendo con el auge de los sistemas de cartografía numérica, se ha comenzado a utilizar el término “modelización” (de amenaza, susceptibilidad, etc.), en el sentido de representar de forma simplificada la realidad que describe el modelo o mapa.

## 1.5. Antecedentes en la cartografía de riesgo de deslizamientos

En el último par de décadas se han desarrollado toda una serie de esfuerzos encaminados a la obtención de mapas de amenazas y, en menor medida, riesgos de deslizamientos. A continuación se presenta una revisión de los principales trabajos en este campo.

### 1.5.1. Mapas de amenazas

La realización de mapas de susceptibilidad, amenaza o riesgo, implica la difícil tarea de evaluar la estabilidad de áreas en las que los deslizamientos todavía no han ocurrido, a partir de una información parcial y la mayor parte de las veces muy escasa, especialmente la del subsuelo. Deben seleccionar los criterios específicos sobre los que basar el estudio de la estabilidad, evaluar y clasificarse tales criterios en diferentes grados y, por último, se deben cartografiar las condiciones de estabilidad.

La cartografía de la amenaza debida a deslizamientos tiene escasamente cuarenta años de existencia y, a pesar de los avances, está todavía lejos de ser satisfactoria. Según Varnes (1984) hay varios principios básicos o fundamentales que han guiado todos los estudios de cartografía de amenazas de movimientos en masa:

- a) El pasado y el presente son claves para el futuro. Esta reformulación del principio del actualismo definido por Hutton (1788) y Lyell (1830), se ha convertido en las últimas décadas en un principio básico en geología. Las futuras roturas de laderas naturales se producirán en las mismas condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, etc. en las que se han producido en el pasado y se están produciendo en la actualidad. Por lo tanto, existe la posibilidad de estimar el estilo, la frecuencia



de ocurrencia, la extensión, y las consecuencias de las roturas del futuro. A pesar de que algunos autores han aportado evidencias de la validez de este postulado (Kojan et al., 1972), tanto la actividad humana como otros factores que controlan la actividad de los procesos naturales cambian, por lo que, de alguna forma, varían también los procesos.

- b) Se pueden identificar las principales condiciones en las que se producen deslizamientos. Este principio básico fue reformulado por Hutchinson (1995) de la siguiente forma: los principales condicionantes de la inestabilidad están controlados por factores físicos, por lo que son, en principio, identificables. Con los medios tecnológicos y con los recursos actuales se pueden identificar y evaluar algunos de estos factores condicionantes. Las causas básicas de inestabilidad se conocen bastante bien a partir de estudios realizados en roturas específicas. Algunas son estables, como las inherentes al tipo de material (composición, textura y estructura); otras, como la inclinación de las laderas no movidas, son relativamente constantes. Hay condiciones variables, como el contenido en agua; otras son transitorias, como las vibraciones sísmicas, y otras son impuestas, como la actividad humana que perturba la superficie del terreno. En un área determinada, la mayoría pueden ser reconocidas y sus efectos pueden ser ponderados y combinados. De todas las causas posibles, algunas pueden ser cartografiadas y relacionadas entre sí y con las roturas del pasado. Lo principal debería ser siempre el conocimiento del proceso involucrado; esto es: el por qué, cuándo, dónde y su mecanismo.
- c) Puede estimarse el grado de amenaza. Cuando se identifican las condiciones y procesos que producen inestabilidad, es posible estimar, cualitativa o semi-cuantitativamente, su contribución relativa, por lo que se puede abordar la cartografía en grados de amenaza. Ahora bien, la calidad del producto final dependerá de nuestra capacidad para identificar y evaluar los factores que condicionan y determinan la inestabilidad.

- d) Los movimientos en masa pueden caracterizarse. Hutchinson (1995) añade un cuarto principio fundamental según el cual los diferentes tipos de procesos en masa generalmente pueden reconocerse y clasificarse morfológicamente, geológicamente y geotécnicamente.

Estos principios son comunes a todos los trabajos cuyo objetivo sea la elaboración de mapas de amenaza; sin embargo, las metodologías empleadas en la práctica son muy variadas. Así, según Hansen (1984), el análisis de la estabilidad de las laderas se puede enfocar desde dos puntos de vista:

- a) Un punto de vista ingenieril, en el que el interés recae en la estabilidad de un lugar concreto, para satisfacer los requerimientos de ejecución y funcionamiento de un determinado proyecto. Para analizar esa estabilidad, es necesario determinar en detalle las propiedades físicas y químicas de los materiales mediante análisis de laboratorio y de campo. Tales datos se introducen en un modelo de estabilidad empírico y/o determinístico, y se calcula el factor de seguridad de la ladera. Ejemplos de cartografía automática utilizando este tipo de técnicas pueden verse en van Westen (1993), Terlien et al. (1995), Luzi y Pergalani (1996b), etc. Tal como se ha comentado anteriormente, estas técnicas, conocidas generalmente como métodos geotécnicos, sólo son aplicables a movimientos individuales o a áreas muy reducidas, puesto que los análisis de los materiales son muy costosos y llevan mucho tiempo (ver apartado 1.3), o bien se han de simplificar enormemente los parámetros utilizados, extrapolarlos espacialmente unos pocos datos puntuales. Para evitar este problema se han desarrollado paralelamente los métodos geomorfológicos.
- b) Un punto de vista geomorfológico, en el que se trata de determinar la variabilidad espacial de la estabilidad en grandes áreas. Dentro de los métodos geomorfológicos, Hansen (1984) diferencia entre métodos directos e indirectos. Los métodos directos son aquellos en los que la cartografía se realiza directamente, evaluando la amenaza, la susceptibilidad o el riesgo en el terreno, analizando las formas e



identificando los lugares deslizados para extrapolar los criterios de evaluación al resto del área. Los métodos indirectos consisten en la combinación de diversos factores relacionados con la inestabilidad/estabilidad, considerando la ocurrencia de deslizamientos en relación con los factores que controlan la inestabilidad. Por lo tanto, puede decirse que los métodos directos son métodos de cartografía sintética y los indirectos son métodos analíticos.

Tanto los métodos directos como los indirectos y geotécnicos en la práctica real se solapan, y en ocasiones las metodologías son combinaciones de los tres grupos citados. Hutchinson (1995) define una clase de métodos que denomina métodos combinados, caracterizados por la utilización de criterios geotécnicos y geomorfológicos. Ejemplos de este tipo de métodos son los descritos por Stevenson (1977), Hutchinson et al. (1981) y Bonard y Noverraz (1984); son aproximaciones multidisciplinarias en las que intervienen geotécnicos, geólogos y geomorfólogos.

#### ***1.5.1.1. Métodos cartográficos directos***

El método más simple y común lo constituyen los mapas de inventario cartográfico de deslizamientos, realizados normalmente a partir de la identificación de movimientos mediante fotointerpretación, campo y, en ocasiones, registrando las ocurrencias históricas. El producto final muestra la distribución espacial de los movimientos en masa, por lo que se pueden utilizar como formas elementales de cartografía de la amenaza, ya que muestran dónde han ocurrido deslizamientos que pueden volverse a mover; en la mayoría de los casos, sirven de base para ulteriores análisis con otros métodos.

La información registrada en un inventario cartográfico de movimientos depende del tamaño de los movimientos, de la escala de las fotos, del tiempo disponible, de la base topográfica a la que se pretendan restituir, de la intensidad y detalle del trabajo de campo y, por supuesto, de la naturaleza del trabajo. Los modelos más simples muestran

los límites de los cuerpos, o incluso quedan simplificados a un punto. Los modelos más complejos pueden mostrar las partes, la tipología, profundidad, estado de actividad, material involucrado, etc. (Wieczorek, 1984). Un modelo particular es el que utilizan Carrara et al. (1991), en el que clasifican todo el territorio en unidades de ladera estables e inestables, utilizando como criterio la presencia mayor o menor del 2% de área deslizada en la unidad, lo que equivale al error mínimo de cartografía.

Las dificultades en el desarrollo de un mapa de inventario de alta calidad están controladas por la escala y la exactitud de la base topográfica, la cobertura vegetal, la escala de las fotos, el estado de preservación de los movimientos y por la habilidad y experiencia del operador. En algunos casos, los deslizamientos se caracterizan con los calificativos de seguro, probable, o cuestionable, para reflejar el juicio de la persona que ha hecho el mapa (Cotton et al., 1996). Estudios de campo han mostrado que los mapas de inventario de movimientos tienen un gran error asociado (Varnes, 1978; van Westen, 1993; Carrara et al. 1995) que depende del operador. A pesar de esta incertidumbre en la identificación de movimientos, las personas que habitan el lugar detectan cualquier modificación por pequeña que ésta sea, por lo que su opinión siempre es muy valiosa. Si la rotura es grande, queda bien reflejada en la topografía y es fácil de identificar. Sin embargo, cuando supera una cierta magnitud no es detectable mediante reconocimiento local (Corominas, 1992). Con el paso del tiempo, los procesos superficiales tienden a destruir los rasgos, desdibujando el movimiento en masa. Así, tal y como describe González-Díez (1995), existe una relación estrecha entre el tamaño de un deslizamiento y su persistencia como rasgo identificable sobre el terreno.

Los mapas de inventario requieren la localización del mayor número de movimientos posible en el área de estudio, lo que restringe su aplicación a grandes extensiones de terreno. Aún así, se han utilizado en estudios de escala poco detallada, en los que es muy costoso obtener información. Un ejemplo de esta aplicación es la realizada por Radbruch-Hall et al. (1976) para todo Estados Unidos a escala 1:7.500.000, como base



para derivar un mapa de densidad de movimientos para las distintas unidades litoestratigráficas consideradas.

La utilidad directa de este tipo de métodos reside en que, en algunos casos, los movimientos futuros se producen en las mismas zonas en las que se han producido movimientos previamente, o bien son reactivaciones de los mismos. Así, Kojan et al. (1972) encontraron que cerca del 81% de los flujos de derrubios que ocurrieron en 1969 en un área de California, se identificaban también en 1968; Corominas (1986) encontró que algunas de las zonas afectadas por las lluvias de 1982 en el Pirineo catalán, eran reactivaciones de grandes movimientos antiguos. Por el contrario, en muchas ocasiones los futuros movimientos no se producen en los mismos lugares sino en lugares próximos, como sucede con frecuencia con los deslizamientos superficiales, por lo que es importante considerar que los mapas de inventario reflejan sólo las áreas ya movidas (Cotton et al., 1996).

Los mapas de deslizamientos pueden mostrarse también en forma de mapas de densidad, de los que pueden derivarse mapas de isolíneas. Así, Campbell (1973) realizó un mapa de isopleas (líneas de igual densidad) de depósitos a escala 1:24.000, metodología usada también por Wright y Nilsen (1974) a menor escala. En este método no se analizan las relaciones de los movimientos con los factores que controlan la inestabilidad, pero representan cuantitativamente la frecuencia.

Otra aplicación de los inventarios cartográficos son los mapas de actividad de deslizamientos, basados en la interpretación multitemporal de fotografías aéreas (Canutti et al., 1979). Este tipo de mapas es útil para analizar la evolución temporal de los movimientos en relación con determinados factores que controlan su actividad.

La cartografía detallada de los movimientos y de sus características y rasgos geomorfológicos, y de otros tipos de formas y procesos con los que están relacionados, sirve de base para otro tipo de métodos llamados de cartografía geomorfológica. En este tipo de métodos el grado de amenaza se evalúa en el terreno para cada unidad con



los criterios propios del investigador (Kienholz, 1978). El investigador localiza los deslizamientos e interpreta los procesos con los que están relacionados, a partir de lo cual extrae unos criterios que utiliza para determinar las áreas potencialmente inestables, que constituyen el mapa de peligrosidad. Puesto que los criterios de evaluación varían de un lugar a otro, son difíciles de formular, por lo que son métodos con un gran componente subjetivo.

El análisis geomorfológico ha servido de base para la confección de mapas de amenaza, a partir de criterios indicativos del tipo de movimiento, de las dimensiones, de su grado de actividad, de las características morfológicas circundantes, litología, estructura, actividad humana, etc. Las diferencias entre los distintos métodos estriban fundamentalmente en los criterios utilizados y en el grado de sistematización de los mismos. A su vez, los mapas resultantes son marcadamente distintos. En este sentido, se han propuesto numerosas aproximaciones para la cartografía de amenazas, derivada del análisis y cartografía geomorfológicos (Panizza, 1973, 1975; Carrara y Merenda, 1974; Brunsten et al., 1975; Humbert, 1977; Kienholz, 1978; Ives y Bovis, 1978; Malgot y Mahr, 1979; Corominas, 1986, 1991; Hutchinson y Chandler, 1991; Zêzere 1997).

La realización de mapas geomorfológicos de amenaza exige un conocimiento profundo de la morfología del paisaje y de los procesos, así como una correcta labor de interpretación, que sirvan de base para la confección de mapas. Ahora bien, los criterios utilizados y su aplicación pueden variar para cada autor, lo que introduce un grado de subjetividad que limita en la práctica la reproducibilidad. Actualmente, existe la voluntad de definir criterios de zonificación que sean claros e iguales para todos los investigadores, integrando ideas tanto cartográficas como conceptuales (Marker y Culshaw, 1993; Proske y Vlcko, 1994). Aún así, la utilidad de estos métodos, y de los directos en general, es menor que la de los indirectos, excepto en casos particulares en los que el conocimiento del área sea amplio y preciso.



### **1.5.1.2. Métodos cartográficos indirectos**

En este tipo de métodos, los más utilizados recientemente, la susceptibilidad, amenaza o riesgo se evalúa mediante la combinación espacial de parámetros. Los métodos indirectos pueden elaborarse mediante análisis estadísticos simples y complejos (Hansen, 1984b), o mediante valoraciones más subjetivas, y en general son de tipo cuantitativo. Cuando la contribución relativa de los factores condicionantes se cuantifica numéricamente se habla de métodos cartográficos numéricos (Varnes, 1984; Carrara, 1983); en caso contrario, se habla de métodos cualitativos. Si bien en los últimos años se han desarrollado mucho los procedimientos numéricos desde una aproximación geomorfológica, hasta hace poco tiempo el método numérico más usado ha sido el análisis geotécnico convencional; generalmente, se determinan los valores de las propiedades del suelo o roca e, integrando información hidrológica, se calcula el factor de seguridad, para lo que se generalizan algunas variables (Klugman y Chung, 1976).

De acuerdo con Carrara et al. (1995), los métodos indirectos pueden clasificarse en dos grandes grupos: heurísticos y estadísticos o probabilísticos.

- **Métodos heurísticos:** Los factores se pesan *a priori* de acuerdo con su importancia supuesta, por lo que están basados en un conocimiento previo de las causas que determinan la ocurrencia de movimientos en masa.

Uno de los procedimientos más sencillos, muy utilizado a escalas intermedias, consiste en la combinación de los factores litología y pendiente, teniendo en cuenta los movimientos ya ocurridos (Blanc y Cleveland, 1968: en Varnes, 1984; Obermeier, 1979: en Varnes, 1984). En este procedimiento se asignan valores de amenaza o riesgo, de forma predeterminada (apoyada en las ocurrencias pasadas), a cada una de las posibles combinaciones de pendiente y litología.

En la zona del Bajo Deva, Tamés et al. (1986) desarrollaron una metodología para elaborar una cartografía 1:5.000 por términos municipales. A partir de un inventario de movimientos en masa, se clasificaron en 5 clases las distintas litologías, de acuerdo con su inestabilidad potencial; para ello se tuvo en cuenta el número, tipo y tamaño de los movimientos que afectaban a cada clase litológica. Se consideraron por separado los movimientos “naturales” y los desencadenados por intervenciones humanas. Posteriormente, en una matriz litología-pendiente, se combinaron cualitativamente los cinco grupos litológicos con 6 clases de pendiente, con lo que se definieron 5 clases de peligrosidad. Los valores definidos en la matriz se corrigieron al alza de acuerdo con unos criterios específicos:

- Ángulo menor de 30° entre la estratificación y la superficie de la ladera.
- Presencia de zonas de erosión (litoral y fluvial).
- Presencia de laderas sobre-excavadas.
- Laderas no incluidas en las clases más peligrosas (3 y 4) que presentan frecuentes fenómenos de reptación o sifonamiento.

Algunos autores han ideado y aplicado sistemas numéricos para asignar valores a los factores condicionantes de cara a su posterior combinación (Stevenson, 1977; Meneroud, 1978; Vecchia, 1978; Anbalagan, 1992). Normalmente se basan en la obtención de parámetros de fácil y rápida determinación, que representen los diversos factores que condicionan la rotura. Tales indicadores (factores) se pesan y se agrupan en un índice. Los intervalos de valor del índice determinan las distintas clases de riesgo. Tanto la selección de los parámetros como la asignación de los pesos se realiza mediante criterio experto y *a priori*. Varnes (1984) ha denominado este tipo de métodos: “métodos de asignación numérica de los factores” que contribuyen a la inestabilidad.

- **Métodos estadísticos.** La contribución de cada factor se determina a partir de las relaciones estadísticas observadas entre los parámetros y los movimientos pasados o actuales. Las diferencias entre los métodos estriban fundamentalmente en la técnica matemática usada. Cuando las variables se analizan en conjunto, de forma cuantitativa,



se puede hablar de métodos multivariables *sensu lato*; por el contrario, los modelos en los que las variables, normalmente sólo unas pocas, se analizan estadísticamente por separado y posteriormente se integran de forma cualitativa, se pueden denominar métodos univariables o estadísticos simples. Estrictamente hablando, los modelos univariables analizan solamente una variable, y puesto que las relaciones estadísticas se determinan cruzando una determinada variable con los rasgos de inestabilidad, también se les denomina técnicas bivariables. Los métodos multivariables *sensu stricto* son aquellos en los que se aplican las técnicas estadísticas multivariables convencionales.

Los métodos heurísticos mejoraron mediante la determinación del porcentaje de cada unidad ocupada por movimientos en masa, tal y como hicieron Brabb et al. (1972), en lo que denominaron *mapa de susceptibilidad de movimientos en masa*. El método, uno de los más utilizados en Estados Unidos, consiste en superponer mediante mallas el inventario de deslizamientos y el mapa geológico, del que se deriva un mapa de densidades de deslizamientos por clases de litología. Posteriormente se combina con la malla de pendientes, para crear las clases de susceptibilidad. Valentini (1967) aplica una metodología similar, calculando la frecuencia en distintos intervalos de pendiente. Nilsen et al. (1979) realizaron un mapa de susceptibilidad utilizando el mismo procedimiento, pero introduciendo algunas modificaciones al superponer el mapa de pendientes con el inventario de depósitos deslizados, para crear un mapa de densidad de depósitos por clases de pendientes. Este mapa se combinó con el de densidad de depósitos por clase litológica para evaluar la susceptibilidad.

Irigaray (1990, 1995), que aplica también el método de porcentaje de zonas de ruptura por clases litológicas, propone el método de *la pendiente crítica*, con el que estima la susceptibilidad de la litología en cada intervalo de pendiente. La pendiente crítica se calcula mediante la siguiente relación para cada unidad litológica: incremento en el porcentaje ocupado por superficies de ruptura (%) con respecto a la clase inmediatamente inferior de pendiente / incremento de pendiente entre las clases. Cuando este valor es cercano a 1 se considera crítico y se le asigna un grado de susceptibilidad moderado. Chacón et al. (1992) combinaron, también de forma

semicuantitativa, el mapa de pendiente crítica con el denominado mapa de porcentaje de superficies de ruptura, generando un mapa de “*incidencia de movimientos de ladera*”.

Sarkar et al. (1995), calcularon la densidad de movimientos (frecuencia) para cada clase de cada variable con lo que obtuvieron el *landslide susceptibility index* (LSI). Para obtener el mapa de susceptibilidad se realiza, en cada celda, una suma ponderada de los LSI correspondientes a cada uno de los mapas temáticos considerados.

Van Westen (1992b, 1993) desarrolla un procedimiento parecido en el que calcula también la frecuencia (densidad), pero pesa las variables mediante la diferencia con respecto a la densidad total y, al final, suma las densidades ya pesadas. Otro aspecto de este trabajo es que los cálculos los hace para diferentes tipos de movimientos y estados de actividad, considerando las áreas deslizadas y los individuos.

Irigaray (1995) e Irigaray y Chacón (1996a y b) utilizan matrices, tal y como propusieron DeGraff y Romesburg (1980) en el denominado “*matrix method*”. El método consiste en la construcción de una matriz en la que cada celda representa cada una de las posibles combinaciones de clases de cada variable, el área afectada por movimientos, y el área de la clase. Dividiendo el área afectada por movimientos entre el área de la clase, se obtiene para cada celda un valor de susceptibilidad. Este método es similar a los utilizados por Boussouf et al. (1994) con lo que denominan “cálculo de la tasa de ruptura” y al propuesto por Carrara et al. (1995).

Cendrero et al. (1987a, b y c) desarrollan una metodología que aplican a varios municipios de Vizcaya y Guipúzcoa a escala 1:5.000. La zonificación se llevó a cabo realizando un inventario de los factores de la inestabilidad (tipo de roca subyacente, espesor de regolito, exposición, vegetación, pendiente, disposición y espaciamiento de las discontinuidades estructurales) y de los rasgos indicativos de inestabilidad. Posteriormente se realizó la superposición automática de los mapas que representan los factores, con el mapa de signos de inestabilidad, utilizando para ello una malla de 2.500 m<sup>2</sup> de celda. Combinando los diferentes factores de dos en dos, de tres en tres, y todos



juntos, se definieron por correlación niveles de amenaza, para cada factor y para sus diferentes combinaciones; es decir, se estableció una jerarquía de las condiciones que producen inestabilidades, representadas por un *Índice de Inestabilidad*:

$$I_i = (F_i/F)/(S_i/S)$$

Donde:

$F_i$  = Número de formas inestables sobre el clase  $i$  (o combinación de clases).

$F$  = Número total de rasgos de inestabilidad.

$S_i$  = Área ocupada por el rasgo  $i$  (o combinación de rasgos).

$S$  = Área total.

Los valores así obtenidos para los índices  $I_i$  se agruparon en tres categorías identificadas como de riesgo (en realidad susceptibilidad) alto, medio y bajo. Asimismo se representó, en otro mapa, la amenaza resultante de la hipotética desaparición de la cobertera vegetal.

Irigaray et al. (1994, 1996a) e Irigaray (1995) aplican un índice similar (*Standard Frequency Index*), definiendo la susceptibilidad mediante la integración ponderada de cada factor (definen tres categorías de factores), de forma semi-cuantitativa. Para asignar pesos a las variables utilizan varios coeficientes estadísticos de asociación.

Dhakai et al. (1999), utilizan un índice muy parecido que aplican a cada variable de una en una, o a combinaciones de variables. Los mapas resultantes de la aplicación se suman. Para clasificar la amenaza representan las frecuencias acumuladas de las celdas con deslizamientos y sin deslizamientos (del menor valor al mayor y del mayor al menor, respectivamente). El valor del punto de intersección de ambas curvas se toma como valor crítico, que separa las zonas estables de las inestables y, a partir de él, se establecen las distintas clases de peligrosidad.

Una ligera variación de los métodos anteriores, la constituye el denominado método del *valor de la información* (Yin y Yan, 1988), que es el logaritmo del *Standard Frequency Index*; el método ha sido aplicado también por van Westen (1993), Irigaray (1995) y Zêzere (1997).

Los últimos métodos descritos utilizan técnicas estadísticas sencillas para el cálculo de la susceptibilidad, por lo que son fácilmente abordables. Por el contrario, los métodos que se describen a continuación son más complejos en su concepción teórica, por lo que su utilización requiere un mayor conocimiento de técnicas matemáticas.

Los modelos desarrollados con técnicas multivariantes analizan, describen e interpretan cuantitativamente todas las variables de forma simultánea, siendo los más utilizados los basados en el análisis discriminante y en la regresión múltiple.

Uno de los trabajos pioneros en la aplicación de técnicas multivariantes en sentido estricto es el de Jones et al. (1961), en el que se definió una función discriminante que identificaba áreas potencialmente inestables y estables. Se analizaron más de 300 movimientos, tratados independientemente según su tipología, de los cuales se tomaron parámetros cuantitativos y cualitativos referentes a litología, condiciones hidrológicas, pendiente, porcentaje del talud sumergido, altura del talud y actuaciones antrópicas.

Neuland (1976), con una metodología similar aunque sin diferenciar entre diferentes tipos de movimientos, realizó un mapa de susceptibilidad mediante el análisis de 31 parámetros, en un formato matricial y utilizando ordenador. Para seleccionar las variables más significativas del conjunto, utilizó la técnica de análisis factorial por componentes principales.

Los trabajos de Carrara et al. (1977, 1978) marcan una inflexión en la concepción de los mapas de amenaza. La importancia de estos trabajos reside en que ilustra cómo recoger, codificar, guardar y procesar atributos del terreno de forma eficiente y flexible,



en el entorno de un ordenador y en formato matricial. Se recogieron 33 atributos básicos del terreno de los que se analizaron estadísticamente 25; se determinó su contribución relativa y de ello se derivó el mapa de inestabilidad. Carrara et al. (1991) aplica técnicas de análisis discriminante por primera vez en unidades de ladera (subcuencas hidrográficas).

Baeza (1994), mediante procedimientos manuales, aplica diferentes técnicas de análisis multivariable a la clasificación morfométrica de los movimientos de ladera, a las condiciones de rotura y a la movilidad de los deslizamientos, evaluando la susceptibilidad en un área del Pirineo Catalán. Es un trabajo minucioso en el que se muestra de forma clara la potencialidad del uso de técnicas estadísticas para los estudios de peligrosidad. En la actualidad, el grupo de trabajo al que pertenece está profundizando en la aplicación de esta metodología utilizando un SIG (Arc/Info), dentro del proyecto GISLYT (Corominas y Chacón, 2001).

Las técnicas de regresión múltiple también han sido frecuentemente utilizadas para determinar la contribución relativa de los parámetros y, mediante su correlación, establecer las áreas estables e inestables (a mayor coeficiente de regresión, mayor estabilidad). Entre los autores que han desarrollado modelos de regresión se encuentran Carrara (1983), Kawakami y Saito (1984), Kinlong y Tongzhen (1988), Yin y Yan (1988), van Westen (1993), Chung et al. (1995) e Irigaray et al. (1996a).

Otros trabajos en los que se han utilizado técnicas multivariadas son los de Lessing et al. (1976), Carrara et al. (1991, 1995), Newman et al. (1978), Haigh et al. (1988), Siddle et al. (1991), Mulder (1991), Corominas et al. (1988, 1995), Baeza y Corominas (1996), Dhakal et al. (1999), etc.

Por otra parte, Bonham-Carter (1991) exploró sistemáticamente las posibilidades de análisis de datos espaciales de ciencias de la tierra mediante SIG, aplicando la teoría de probabilidades y la lógica difusa a la combinación de múltiples variables. Katz (1991) aplicó previamente estas técnicas a la exploración de minerales. Considerando tales



modelos, Chung y Fabbri (1993) han desarrollado un marco estructural matemático de análisis espacial para modelos predictivos (como los mapas de susceptibilidad) que han llamado *Funciones de Favorabilidad* (FF). Las funciones de favorabilidad pueden basarse en distintas teorías matemáticas y permiten la integración múltiple de mapas de variables de distinta naturaleza. Es por lo tanto un método de análisis de datos espaciales. En sucesivos trabajos se han desarrollado y matizado algunos aspectos teóricos y prácticos del método (Chung y Leclerc, 1994; Chung et al. 1995; Fabbri y Chung, 1996; Chung y Fabbri, 1998, 1999a, b, 2000). Otros trabajos que han aplicado este método son los de Luzi y Fabbri (1995), Luzi y Pergalani (1996a y b), Kojima et al. (1998), Díaz de Terán et al. (1998), Remondo et al. (1998), etc.

Se han aplicado muchos otros métodos para análisis complejos de la amenaza debida a deslizamientos, tales como; el *modelo de mensaje lógico* (Runqiu y Yuanguo, 1995); la regresión logística (Carrara et al., 1991, con idénticos resultados que el discriminante), *pesos de evidencia* (van Westen, 1993), etc. Una revisión de los métodos utilizados en España se presenta en Díaz de Terán et al. (1997).

Los métodos multivariables, no solo se caracterizan por la técnica matemática empleada, sino que además hay otros aspectos a considerar, entre los que cabe citar: tipo de unidad de análisis considerada; número, tipo y pretratamiento de las variables; herramientas empleadas; utilización o no de datos puntuales para calcular los valores (Neuland, 1976; Carrara et al. 1977; Lessing et al., 1983; Corominas et al., 1995; Baeza, 1994, etc.); utilización de una muestra del banco de datos (Carrara et al., 1978, 1990; Carrara, 1983, 1992) o de todo el banco de datos (Chung y Fabbri, 1993): etc. Todo ello, en conjunto, determina la metodología, tanto desde un punto de vista conceptual como operativo (técnica).

Tal como se ha comentado anteriormente, numerosos estudios han puesto de manifiesto los factores o condiciones que determinan la inestabilidad de las laderas y han propuesto modelos físicos para interpretarlos, de manera que existe un conocimiento razonable de los parámetros que intervienen en la inestabilidad, que



puede ser utilizado para la construcción de mapas de amenazas. Ahora bien, no todos los estudios realizados consideran las mismas variables; algunos utilizan demasiada información para que sean aplicables de forma extensiva y otros carecen de parámetros quizás necesarios. Una característica común de todas las cartografías indirectas es el hecho de que solamente unos pocos factores son cartografiados a bajo coste, lo que implica que en la mayoría de los casos no se representan en sí los parámetros físicos sino estimadores de los mismos, tal y como sucede por ejemplo, con la información geológica (Nieto, 1989).

Brand y Hudson (1982), en un estudio detallado de laderas estables e inestables realizado en Hong Kong y considerando una gran variedad de factores como la geometría, litología, ensayos de laboratorio, vegetación y trabajos de prevención, concluyen que la estabilidad de las laderas no puede ser predicha basándose simplemente en unos pocos parámetros fácilmente medibles.

El principal problema de los métodos indirectos reside en la dificultad de construir un modelo que refleje la compleja realidad de las laderas objeto de estudio (Hansen, 1984a). De hecho, la relación de parámetros considerados es inevitablemente incompleta, por lo que hay factores físicos involucrados en el proceso, sobre todo los del subsuelo, que no se tienen en cuenta. En principio, se considera que los métodos de evaluación de la susceptibilidad son tanto más precisos (a la vez que más complejos) cuanto mayor sea el número de factores considerados para el análisis; pero a la vez, la adquisición de muchos datos es muy costosa. Aún así, cuando el conocimiento sobre los procesos del área de trabajo es pequeño, los métodos indirectos son claramente los más adecuados. Otro de los posibles problemas derivados del uso de estas técnicas matemáticamente sofisticadas, es que los especialistas puedan llegar a apartarse de los criterios de campo y olvidarse de que la incertidumbre inherente a la evaluación se deriva del desconocimiento del terreno (Hutchinson, 1995; Carrara et al., 1995).

Independientemente de las variables utilizadas, la mayor dificultad para su integración mediante modelos numéricos reside en que parte de la información a integrar es de

naturaleza cualitativa y no cuantitativa. Tradicionalmente este problema se ha tratado de resolver generando una serie de mapas de variables que representen la presencia o ausencia de las distintas unidades (*booleanas*) en las celdas (Chung y Agterberg, 1980; Chung, 1983; Carrara, 1983, 1988). DeGraff y Romesburg (1980), Irigaray (1995) e Irigaray et al. (1996a y b), mediante coeficientes de asociación, utilizando pruebas estadísticas como el test Chi-cuadrado, el coeficiente de contingencia (C y Cmax), el test de Kolmorov-Smirnov, etc., y de acuerdo con los niveles de confianza de los distintos coeficientes, determinan la importancia relativa de los distintos parámetros. Baeza (1994) asigna valores *a priori*, a partir de la experiencia y de criterios físicos. También es posible utilizar las Funciones de Favorabilidad propuestas por Chung y Fabbri (1993), transformando los valores de las variables originales, sea cual sea su naturaleza y distribución espacial, en valores de posibilidad (probabilidad, certidumbre, pertenencia difusa, etc.) Una explicación exhaustiva de su uso puede verse en Chung y Leclerc (1994).

### ***1.5.1.3. Unidades cartográficas de análisis***

Otro de los aspectos que condicionan la metodología de análisis y el producto resultante es el tipo de unidad cartográfica usada (unidad de terreno o unidad de territorio). En los estudios de amenazas, al igual que en otros trabajos de ciencias de la tierra se utilizan comúnmente los siguientes tipos de unidades: irregulares, regulares, de ladera, mixtas y de condición única.

Las unidades irregulares, también llamadas unidades de terreno (*land systems* o *land units*) se consideran de contenido homogéneo. Se basan en que el territorio puede subdividirse, mediante límites más o menos definibles, en áreas caracterizadas por presentar determinadas formas, suelos, vegetación, etc., que difieren de las adyacentes (Christian, 1957, 1968; Brown et al, 1971; Cendrero, 1975; Geological Society, 1983, en Hansen, 1984b). Cada unidad es el resultado de un conjunto de condiciones ambientales, asociadas a unos determinados procesos que actúan sobre un conjunto de



materiales, que como resultado definen una unidad que es diferenciable de las unidades adyacentes y homogénea en las cualidades consideradas. La homogeneidad es relativa y está condicionada por la escala de trabajo y por el grado de detalle pretendido. Por definición, las unidades de terreno deben poderse cartografiar para un área, a un costo razonable y con criterios tan objetivos como sea posible (Hansen, 1984b). Ejemplos de este tipo de unidades son las basadas en parámetros simples como la litología, o combinación de varios de ellos; unidades basadas en las formas y procesos (unidades geomorfológicas); unidades basadas en la densidad de determinados rasgos; unidades morfodinámicas (*integrated environmental units*) basadas en la litología, procesos, pendiente, exposición y vegetación (Cendrero et al., 1992).

La interrelación entre materiales, formas y procesos para definir *land systems* (Christian, 1957, 1968) ha sido utilizada por Verstappen (1983), van Westen (1993) y Hansen et al. (1995) para evaluar amenazas debidas a movimientos en masa. Estas unidades son útiles en zonas con relieve marcado, pero cuando los límites son equívocos, como en el caso de valles curvos, es necesario apoyarse en rasgos menores. Otra posible crítica para el empleo de estas unidades es que están basadas en una situación presente del paisaje y, por su naturaleza, difícilmente pueden modificarse para reflejar el carácter dinámico del mismo. No obstante, las unidades geomorfológicas han sido utilizadas con éxito en análisis de amenazas por Kienholz (1978), Ives y Bovis (1978), etc.

Un tipo particular de unidad irregular lo constituyen las denominadas *unidades de ladera*, definidas por Carrara et al (1992) como “la parte derecha o izquierda de una subcuenca de cualquiera de los órdenes en los que se puede dividir una cuenca hidrográfica”. Actualmente es posible generar estas unidades de forma automática, por lo que pueden ser muy objetivas (Carrara et al., 1991). Estas unidades se utilizaron originalmente para evitar el problema de los errores en la cartografía de movimientos en masa, que pueden alcanzar hasta el 70% (Carrara, 1990), y para adecuar mejor la información espacial de cara a calcular la función discriminante. Con su utilización, el error de la cartografía de los movimientos en masa se reduce enormemente. Así, Carrara et al. (1992) calcularon en la zona de Tescio (Apeninos, Italia) que el error en la cartografía de movimientos

era del 62% utilizando unidades regulares y sólo del 21% cuando utilizaban unidades de ladera. Por otro lado, en comparación con otros modelos, como los matriciales, el número de unidades generadas es mucho menor, por lo que es más sencillo calcular la función discriminante, si bien es cierto que a la postre limita también el resultado (Carrara et al, 1995). Otra de las ventajas de las unidades de ladera es que son muy fácilmente reconocibles en el campo por cualquier tipo de usuario. Su principal inconveniente reside en cómo asignarles un valor homogéneo a cada uno de los parámetros utilizados (Chung et al., 1995). Otro problema consiste en la dificultad de elección de su tamaño (orden de la subcuenca), que debe depender de la dimensión media de los movimientos en masa de la zona de estudio.

Otro tipo de unidades irregulares son las *facetas* (Anbalagan, 1992), que son unidades de terreno basadas en la subdivisión de las laderas de acuerdo con características homogéneas de pendiente y orientación. En un SIG es posible generar este tipo de unidades de forma automática; sin embargo, los criterios para establecer la homogeneidad de las unidades son subjetivos.

Las unidades regulares constituyen en conjunto una malla de celdas de forma cuadrada, rectangular o hexagonal, si bien sólo las dos primeras, y sobre todo la cuadrada, son comunes en los sistemas informáticos. Las principales ventajas de este tipo de unidades son las siguientes: son superficies perfectamente dimensionadas, lo que facilita la comparación con las otras unidades; son unidades bien georeferenciadas, que permiten la comparación entre varios elementos del inventario; además, no exigen un exhaustivo conocimiento previo del territorio. Por el contrario, las celdas, de dimensiones fijas, tienen la desventaja de que están muy alejadas de representar cualquier rasgo geomorfológico, por lo que no son identificables en el terreno. Otro problema consiste en la dificultad de asignar una cualidad homogénea en toda la celda, si bien este problema se reduce drásticamente disminuyendo el tamaño de la malla, con el inconveniente de aumentar el número de unidades. A pesar de los problemas señalados, la disponibilidad actual de datos sobre variables continuas, tales como los derivados de imágenes de satélite y de modelos digitales de terreno, hacen pensar que



en el futuro los modelos matriciales serán cada vez más utilizados. Para la utilización de estas unidades es muy importante elegir el tamaño de la celda, en función de la finalidad del estudio, la escala de trabajo, el grado de detalle, el tiempo y dinero disponibles y las características del territorio. La mayoría de los métodos de cartografía de amenazas, utilizando SIG y análisis multivariantes, emplean este tipo de unidades, siendo pioneros los trabajos de Carrara et al., (1977) y Carrara (1983), quienes aplicaron el análisis multivariante en matrices cuyas celdas tenían 100 x 100 y 200 x 200 m de lado.

Las unidades mixtas, cuya filosofía surge como consecuencia de la dificultad de acoplar una configuración geométrica a las características del terreno. Se construyen mediante la rasterización de unidades irregulares homogéneas en su contenido.

Las unidades de condición única se generan mediante la superposición de un conjunto de mapas temáticos; definidas por Chung et al. (1995) para modelos matriciales, se han usado comúnmente en muchas estructuras vectoriales (polígonos de condición única). Por lo tanto, son unidades homogéneas en su contenido, y en su forma pueden ser tanto regulares como irregulares. Su principal ventaja reside en que reducen al máximo el número de unidades de acuerdo con la máxima información disponible. De hecho, cuando se utilizan matrices en grandes áreas de estudio, en las que cada celda es una unidad distinta, el número de unidades puede llegar a ser tan grande (tanto como toda el área de estudio) que dificultan enormemente el análisis, por lo que hay que extraer una muestra relativamente pequeña del área total para llevar a cabo análisis de tipo estadístico. Además, el procedimiento de superposición de mapas temáticos, necesario para su generación, aprovecha la mayoría de las funciones básicas de los SIG, por lo que su uso reduce notablemente el tiempo de procesado y la memoria de almacenamiento.

Los límites de las unidades regulares de condición única, al igual que otras unidades regulares, no tienen ninguna relación con la geología, geomorfología, ni ningún otro elemento del ambiente, por lo que muchos investigadores han argumentado en su

contra (Carrara et al., 1995). La generación de unidades regulares de condición única es objetiva; sin embargo, su principal debilidad recae en que las variables deben ser categorizadas en un número discreto de clases, y en la incertidumbre asociada a las mismas variables. Si bien éste es un factor común a todos los métodos a la hora de integrar las variables, las unidades de condición única son muy sensibles a los errores de los datos de partida. Adicionalmente, cuando se cruzan muchos mapas, se generan miles de unidades, muchas de las cuales carecen, en principio, de sentido estadístico (Carrara et al., 1995). Muchas de estas unidades son el resultado de los errores de cartografía temática y de la digitalización, que pueden ser eliminados tal y como propone Carrara et al. (1995), utilizando filtros, operación que por otro lado es bastante criticable. Independientemente de los problemas inherentes a las unidades de condición única, hay que señalar que la información a integrar es generalmente discreta, por lo que mediante su utilización se disminuye el volumen de información. En los casos en los que toda la información sea continua, las unidades regulares de condición única son idénticas a las matrices regulares.

Las Tablas 1.10 y 1.11 muestran las características de las unidades de terreno y su aplicación a la cartografía de la amenaza debida a movimientos en masa.

Tabla 1.10. Comparación de las ventajas y desventajas de los principales tipos de unidades de terreno utilizadas en la cartografía de amenazas (Carrara et al., 1995).

<i>Tipo de unidad</i>	<i>Coherencia</i>	<i>Sentido físico</i>	<i>Técnica</i>
Unidad geomorfológica	baja	alto	manual
Matriz-celda	alta	bajo	automática
Unidad de condición única	alta	medio	automática
Unidad de ladera	alta	medio-alto	automática



Tabla 1.11. Relaciones entre modelos de cartografía de amenaza y tipos de unidades de terreno. En negrita se indican las relaciones más frecuentes y apropiadas (Carrara et al., 1995).

<i>Tipo de unidad</i>	<i>Método cartográfico</i>			
	<i>Geomorfológico</i>	<i>Heurístico</i>	<i>Univariable</i>	<i>Multivariable</i>
Unidad geomorfológica	<b>Si</b>	No	No	No
Matriz-celda	No	<b>Si</b>	Si	<b>Si</b>
Unidad de condición única	No	<b>Si</b>	<b>Si</b>	Si
Unidad de ladera	No	Si	Si	<b>Si</b>

Otra aproximación interesante es la aplicación de *sieve mapping* y *weighting factors* propuesta por Wang y Unwin (1992) para los materiales loésicos de China.

#### ***1.5.1.4. Los SIG en la cartografía de amenazas***

La automatización de los bancos de datos y la enorme capacidad de procesamiento de los ordenadores, han posibilitado la aplicación de técnicas estadísticas para explorar las interrelaciones entre los factores y para evaluar su contribución relativa a la rotura, especialmente cuando hay mucha información y el área de estudio es grande. Además, la utilización habitual de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha supuesto un gran desarrollo de las técnicas de análisis, aprovechando las capacidades de esta herramienta. En conjunto, todo ello ha supuesto un gran avance en la elaboración de mapas de amenaza, aumentando el grado de objetividad.

Las primeras aplicaciones de los SIG a la cartografía de amenazas datan de finales de los setenta (Carrara et al. 1977; Newman et al., 1978). Durante los años ochenta su uso se incrementó mucho debido al desarrollo de sistemas comerciales y a las altas capacidades de los ordenadores personales. Por último, en los años noventa se han



convertido en una herramienta imprescindible. Estudios acerca de las potencialidades del uso de los SIG para la cartografía de amenazas debidas a movimientos de terreno se pueden encontrar en van Westen (1993), Carrara et al. (1990, 1995). Van Westen (1992a) y Soeters y van Westen (1996) hacen una revisión del uso de los Sistemas de Información Geográfica y de la teledetección para la cartografía de amenazas a distintas escalas, concluyendo que los métodos estadísticos son recomendables a escalas intermedias (1:25.000).

Ahora bien, como dicen Carrara et al. (1995), “las aplicaciones de sistemas de información geográfica no han cambiado de forma importante la naturaleza de los datos utilizados para evaluar las amenazas debidas a deslizamientos; la mejora más importante ha consistido en el uso de parámetros morfométricos derivados de modelos digitales de terreno. De cualquier forma, en la mayoría de los casos su exactitud no ha sido suficientemente evaluada”.

#### ***1.5.1.5. Síntesis sobre los métodos cartográficos de amenazas***

Como se desprende de lo anterior, existen multitud de métodos para la cartografía de la amenaza debida a deslizamientos. Por otra parte, el procesado de los datos puede variar desde métodos muy sencillos y subjetivos a sofisticados procedimientos, utilizando bancos de datos y ordenadores. Hartlén y Viberg (1988) presentan un intento de sistematizar los distintos tipos de métodos cartográficos existentes, clasificándolos de la forma siguiente:

##### 1.- Peligrosidad relativa.

- a) Susceptible – no susceptible (equivaldría a los mapas de inventarios de movimientos).
- b) Clasificación de la susceptibilidad en clases de peligrosidad.
- c) Procedimientos estadísticos.

##### 2.- Peligrosidad absoluta

- a) Métodos determinísticos – Factor de Seguridad (FS).



- b) Probabilísticos – Se calcula la probabilidad de rotura de acuerdo con el FS. (Chouwnhury, 1984).
- 3.- Peligrosidad empírica – Curvas empíricas.
- 4.- Peligrosidad monitorizada.
  - a) Deformación.
  - b) Precipitación.
- 5.- Cualquier combinación de las anteriores.

Los métodos de peligrosidad relativa consisten en que una ladera se evalúa por comparación con otras. Los métodos absolutos pueden dividirse en dos: métodos determinísticos, que son los clásicos cálculos del factor de seguridad, y métodos de cálculo probabilístico del factor de seguridad. Los métodos empíricos son aquellos en los que se establecen relaciones experimentales entre determinados parámetros, a partir del estudio de deslizamientos ya ocurridos o activos, como por ejemplo entre el ángulo de la pendiente y las roturas.

Yan (1988) diferencia entre modelos de amenaza desarrollados con tres grupos de métodos:

- 1.- Modelos determinísticos, llamados “*white box models*” (Churinov et al., 1981), basados en modelos físicos.
- 2.- Modelos estocásticos o estadísticos o “*black box models*”. Basados en la recurrencia regular de movimientos en el área de estudio.
- 3.- Modelos de información o “*grey box models*”. Constituyen un grupo especial de modelos estadísticos en los que se considera que la información tiene solamente un carácter parcial (se dispone de alguna información y otra no se conoce).

Desde otro punto de vista, Crozier (1995) clasifica los procedimientos para el análisis espacial de las amenazas en: inductivos, deductivos y geotécnicos (cálculo del factor de

seguridad). El procedimiento inductivo implica la investigación directa de las relaciones entre movimientos activos o ya ocurridos y los factores que controlan la estabilidad. La identificación e importancia de los factores se determina empíricamente después del evento. El procedimiento deductivo (indirecto) implica la preselección de los factores condicionantes, sin referencia a los deslizamientos existentes. La selección de los factores y la asignación de su importancia relativa se determina *a priori* por el juicio del investigador, bien por la teoría, bien por la experiencia, o por la intuición. En la práctica, no suele haber una distinción clara entre estos dos tipos de procedimientos.

Una clasificación más sistemática la propone Gee (1991), quien a partir de tres criterios clasifica todos los métodos:

- a) Tipo de unidad del territorio utilizada.
  - unidades regulares (modelo matricial)
  - unidades irregulares (grandes formas o laderas individuales)
  - unidades naturales resultantes de la combinación de factores condicionantes.
- b) Técnica empleada para evaluar la estabilidad.
  - inventario cartográfico de deslizamientos
  - análisis geomorfológico
  - superposición de factores (métodos numéricos o no)
  - análisis geotécnico
- c) Procedimiento para determinar la importancia relativa de cada factor condicionante.
  - “*Blind weighting*”. La importancia relativa se asigna de acuerdo con la experiencia y el juicio personal.
  - “*Sighted weighting*”. La importancia relativa se deriva del análisis de los factores en relación con las roturas existentes.
  - “*Post-event weighting*”. La importancia relativa resulta del estudio detallado de un determinado evento, por ejemplo de un determinado efecto desencadenante.



Según el mismo autor, de la combinación de los tres criterios, resultan en la realidad 18 posibles métodos (6 técnicas de evaluación de la estabilidad y 3 tipos de unidades). Por supuesto, cada una de estas clases se puede dividir en otras que concreten más detalladamente alguno de los criterios. Así, a estos criterios se podría añadir las técnicas o herramientas usadas en todo el proceso (técnica manual, semiautomática y automática), el método de obtención de los datos (recogida de todos los datos en el campo, sólo datos de deslizamientos, ningún dato), etc. Por supuesto, dentro de un mismo tipo de método el análisis puede variar mucho, por ejemplo dependiendo de los parámetros analizados y de su naturaleza, que a la postre dependen, en gran parte, de las condiciones del trabajo.

Sea cual sea el método utilizado, la mejor forma de presentar la información final es la publicación conjunta de los mapas analíticos que representen los rasgos observables y los mapas sintéticos, mostrando la interpretación de forma simplificada, tal y como propone Kienholz (1978). Es necesario también añadir un texto suficientemente explicativo.

Es evidente que ningún esquema metodológico es el más apropiado para todas las necesidades. Las necesidades del proyecto determinan tanto la escala como el tipo de presentación final, sin olvidar que el producto engloba un proceso de comunicación. Según Varnes (1984), en el diseño de una metodología para la elaboración de mapas de amenaza se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Definición de los objetivos de la investigación.
- Determinar qué debería hacerse de acuerdo con los objetivos y las limitaciones de contexto.
- Identificación de los potenciales usuarios.
- Planificación de las fases de la investigación.
- Inclusión de la información básica en la que se fundamentará la interpretación.
- Implicación de los usuarios en todas las fases del programa de investigación.
- Utilización de los métodos más perfeccionados.

### 1.5.2. Validación

A pesar del gran número de mapas de amenaza realizados en los últimos años, hay muy pocos análisis de la fiabilidad y efectividad de tales trabajos (Varnes, 1984; Hutchinson, 1995), y en muchas ocasiones los resultados son poco satisfactorios. Así, por ejemplo, Brabb (1984) muestra que en California miles de flujos de derrubios, desencadenados por unas lluvias intensas en 1982, ocurrieron en áreas clasificadas como no susceptibles en un estudio previo del mismo autor (Brabb et al., 1972). Estudios posteriores pusieron de manifiesto que en tales áreas habían ocurrido previamente deslizamientos, no identificados por ser muy superficiales y haber sido degradados y revegetados.

Un método comúnmente utilizado para validar los mapas consiste en compararlos con los mismos deslizamientos existentes, a partir de los que se ha realizado la evaluación, clasificando previamente el mapa en dos o más clases de susceptibilidad o amenaza. Como más adelante se comenta, esto no es exactamente una validación, sino una contrastación del grado de ajuste.

Carrara (1983) aplicando análisis discriminante y de regresión en la Cuenca del Tescio (Italia), evaluó el éxito con este procedimiento, obteniendo resultados que variaban desde el 83% hasta el 73% de grado de ajuste, respectivamente. En Nagano (Japón), Kawakami y Saito (1984) obtuvieron una precisión del 84%, tras aplicar la función de regresión al área de estudio. Gee (1991) realizó en el área de Wellington, Nueva Zelanda, un estudio comparativo entre los resultados obtenidos a partir de nueve métodos distintos de evaluación de la amenaza, obteniendo resultados superiores al 80% en todos los casos. En un trabajo de Jennings et al. (1991), para un área del sur de Gales, se compararon los resultados obtenidos tras la aplicación de un método en el que aplicaban un algoritmo empírico y dos procedimientos estadísticos (regresión logística y análisis discriminante); el grado de ajuste en todos los casos superó el 70%. Con un sistema en el que compara también el porcentaje de deslizamientos bien



clasificados, van Westen (1993), obtuvo un ajuste superior al 82%, con la excepción de los modelos derivados de análisis multivariable.

Carrara et al. (1995) realizaron un estudio de comparación de tres métodos de cartografía: análisis discriminante aplicado en unidades de ladera, probabilidad condicionada en unidades de condición única y análisis discriminante en unidades de condición única. Como resultado, todos los métodos tuvieron un comportamiento similar. Sin embargo, ya que los valores resultantes en la función discriminante y la probabilidad condicionada son diferentes, los autores manifestaron que no eran comparables (lo que es verdad, pero solo hasta cierto punto), pero sí que eran del todo comparables los mapas realizados con técnicas discriminantes. El mapa derivado de unidades de ladera dio unos resultados algo mejores (81% contra 73%), pero la resolución espacial, por el contrario, era menor (414 unidades frente a 2094).

Irigaray et al. (1996a), llevaron a cabo un análisis comparativo de varios métodos de cartografía de la amenaza, utilizando también la misma población de deslizamientos empleada en el análisis. Para ello aplicaron coeficientes de asociación estadística (coeficiente de contingencia, K-S, etc.) con el fin de determinar el método que mejor se ajustaba a todos los tipos de movimientos en masa. Además hicieron un cruce entre los mapas de 3 clases de susceptibilidad y los deslizamientos, para calcular el porcentaje de acierto para cada método y tipo de movimiento estudiado. Los resultados indican que los mejores métodos son “el de la matriz” y el de “el valor de la información”, En ambos casos y para todos los tipos de movimientos obtuvieron ajustes superiores al 96%.

Evaluaciones similares realizadas con métodos de análisis multivariable, están ampliamente representados en la literatura, con una tasa media de éxito que supera el 70% (Hutchinson, 1995).

En todos los trabajos descritos, tanto el análisis como la validación constituyen un razonamiento circular, por lo que su única justificación reside en la suposición de que

los deslizamientos futuros ocurrirán en los mismos lugares (van Westen, 1993); sin embargo, esto no suele suceder así. Por ello, tal y como han hecho algunos autores, es necesario validar con una población de movimientos en masa independiente de la utilizada en el análisis.

En el trabajo de Neuland (1976), la función discriminante calculada tuvo una tasa de éxito del 87% con los datos originales. Posteriormente, se aplicó la función a otra muestra de 100 individuos, prediciéndose el 95% del grupo de inestables y el 73% de los estables, lo que reafirmó la fiabilidad del modelo.

Yin y Yan (1988) obtuvieron un acierto del 71% en el análisis de predicción de un mapa realizado con técnicas de regresión múltiple, reclasificando los valores obtenidos en cuatro grados de susceptibilidad.

Haigh et al. (1988) realizaron un estudio en el Himalaya con técnicas multivariadas, diferenciando entre desprendimientos y deslizamientos, y obtuvieron tasas de predicción del 80% y 92% respectivamente.

Mulder (1991) elaboró diversos modelos mediante técnicas discriminantes, variando el tamaño de la muestra para calcular la función (separación aleatoria), obteniendo una tasa de predicción de hasta el 78% al comparar repetidas veces los resultados con la población no seleccionada.

Carrara et al. (1991) separan de forma aleatoria la población de unidades de ladera para validar el mapa resultante de aplicar la función discriminante. Utilizan el 65% de la muestra para el análisis y el 35% restante para la validación. Los resultados de la aplicación de diversas funciones discriminantes indican que aproximadamente el 80% de las unidades inestables de la muestra de validación se clasifican satisfactoriamente. Lo mismo sucede con las zonas inestables.



Baeza (1994), que calcula la función discriminante a partir de datos puntuales (estables e inestables) tomados en el campo, aplica la función a otra zona de condiciones similares en la que identifica 55 movimientos para validar. El resultado es que el 87,3% de los movimientos coincidían en áreas clasificadas como inestables. Ajustando posteriormente la función nuevamente, mejora sensiblemente los resultados. Utiliza también un índice que aplica a los cuatro niveles de susceptibilidad previamente definidos.

$$I = (n/N) / \sum(n/N) * 100$$

donde:

n = número de deslizamientos en la clase.

N = número de celdas de una clase.

Una alternativa que permite contrastar la validez de la cartografía de susceptibilidad consiste en compararla con movimientos ocurridos con posterioridad a su elaboración. Puesto que el fin último de los mapas de amenaza es la predicción en el futuro, esta estrategia es la más razonable.

Existen algunas validaciones de este tipo como las realizadas por Siddle et al. (1991), en un trabajo en el que se estudiaron 8 movimientos en masa desencadenados en un periodo posterior de 4 años. Cinco de ellos ocurrieron en áreas cartografiadas previamente como antiguos deslizamientos y tres en áreas clasificadas como potencialmente inestables. Otro estudio similar aunque de mayor dimensión es el ya citado de Brabb (1984).

Duque et al. (1990a, b, 1991) evaluaron algunos mapas de peligrosidad a escala 1:5.000 elaborados con dos metodologías distintas en varios municipios del País Vasco (Cendrero et al., 1987a; b; c; Tamés et al., 1986), a partir de los deslizamientos producidos en un evento lluvioso de 1989 con una intensidad superior a 70 mm en 24 horas. Para ello, calcularon, para cada clase de peligrosidad, lo que denominaron *índice de inestabilidad observada*:



$$Olc = Sic / Stc$$

Donde:

Olc = Inestabilidad observada en la clase C

Sic = Superficie de la clase C afectados por inestabilidades

Stc = Superficie total de la clase C

Los resultados obtenidos indicaron que había un aumento de la incidencia de deslizamientos a medida que aumentaba la peligrosidad de las clases, si bien los autores señalaban la cautela necesaria al interpretar esa buena correspondencia, debido a la posible irregularidad en la distribución de la lluvia en ese único evento.

Con el objeto de evitar el posible efecto local de las precipitaciones, es conveniente analizar un lapso de tiempo más amplio, a fin de que cubra toda la diversidad de situaciones climáticas. Por esta razón, Remondo et al. (1996) evaluaron los citados mapas de amenazas en 10 municipios de Guipúzcoa (prácticamente los mismos que en el trabajo de Duque et al. 1990a, b, 1991), utilizando los deslizamientos ocurridos entre 1954-1991. Para ello, aplican un *índice de inestabilidad real*, similar al descrito por Baeza (1994):

$$Ir = Sac / Sc$$

Donde:

Sa = Porcentaje de la clase de peligrosidad afectada por deslizamientos en relación al área total deslizada.

Sc = Porcentaje de la clase de peligrosidad en relación a la superficie total.

Los resultados, aunque mejores que en el caso anterior, reflejan los mismos problemas, por lo que hay que sospechar que a pesar de que la predicción es satisfactoria, las clases de peligrosidad de los mapas no están convenientemente establecidas.



González-Díez (1995), evaluó dos mapas cualitativos de peligrosidad del área del Magdalena-Pas (Cantabria) y de una pequeña subzona (5 y 6 clases, respectivamente), calculando el porcentaje de superficie deslizada en cada clase de peligrosidad correspondiente a los últimos 200, 25 y 3 años. La aplicación de este procedimiento de contrastación puso de manifiesto la validez de los mapas elaborados con un número reducido de parámetros (litología, estructura y geometría de la ladera).

Irigaray et al. (1999) llevaron a cabo en Rute (Córdoba) una validación de un mapa de susceptibilidad realizado mediante el método de la matriz. El mapa estaba basado en movimientos de terreno ocurridos con anterioridad a 1995, y para validar utilizaron 125 movimientos en masa ocasionados por varios eventos de lluvias intensas ocurridas entre 1996 y 1997. La validación consistió en dos procesos: por un lado se calcularon una serie de coeficientes estadísticos de asociación (Goodman-Kruskal gamma, Kolmogorov-Smirnov, etc.) que indicaron un buen ajuste entre el mapa de clases de susceptibilidad y el nuevo inventario de movimientos; por otro lado, obtuvieron la distribución relativa de los nuevos movimientos, utilizando la misma relación que Baeza (1994). Ambos métodos en conjunto demostraban la bondad del mapa de susceptibilidad.

Chung et al. (1995) comparan varios modelos de regresión múltiple, dividiendo la población de deslizamientos en dos clases temporales. Los previos a 1960 los utilizan para elaborar los modelos y los comprendidos entre 1960 y 1980 para la validación. Para ello, representan el porcentaje acumulado de área deslizada (post-1960) frente al porcentaje de área potencialmente inestable (de mayor a menor potencialidad) derivada del modelo, obteniéndose una curva de predicción que permite visualizar fácilmente los resultados y comparar distintos modelos. A pesar de que los resultados en ningún caso fueron muy buenos, el sistema de validación utilizado supone un gran avance y permite validar cuantitativamente mapas de amenazas sin necesidad de clasificar previamente los valores numéricos obtenidos en un número discreto de clases. Además, el procedimiento proporciona valores prácticamente continuos para la validación, por lo que se evita uno de los problemas que aparecen cuando se utiliza un

número reducido de clases, que pueden dar lugar a coincidencias estadísticamente satisfactorias, pero a costa de considerar como susceptible una proporción muy alta del territorio estudiado. Otros autores que han utilizado este método de validación son Chung y Fabbri (1998, 1999a, b, 2000), Luzi y Fabbri (1995), Luzi y Pergalani (1996a), Díaz de Terán et al. (1998), Brum et al. (1998), Remondo et al. (1998, 2000).

A pesar de los trabajos de validación descritos, existen dificultades para validar muchos de los mapas resultantes de la aplicación de muchos métodos de análisis (van Westen, 1993; Carrara et al. 1995) y sobre todo de los elaborados con métodos de cartografía directa; pero el mayor problema para contrastar el valor predictivo de los mapas de amenaza es que la mayoría de las cartografías no consideran el aspecto temporal, por lo que el lapso de tiempo para el que expresan la amenaza es incierto. Otra de las incertidumbres asociadas al carácter predictivo de los mapas proviene de que están basados en información que cambia con el tiempo, como el caso de los usos del suelo. Aún así, la única forma para mejorar las metodologías de análisis al uso es la validación. Para ello, sería especialmente útil hacer contrastaciones entre mapas elaborados por dos o más equipos independientes, para el mismo área y método y a ser posible con eventos ocurridos a posteriori (Hutchinson, 1995).

### **1.5.3. Mapas de riesgo**

El cálculo del riesgo no es una tarea sencilla desde el punto de vista conceptual ni operativo. Las incertidumbres de los modelos de susceptibilidad y amenazas hacen muy complicado que tales mapas puedan ser utilizados como base para ulteriores análisis del riesgo. Además, el hecho de que los mapas de amenazas debidos a movimientos en masa, salvo raras excepciones, no consideren ni el aspecto temporal ni la movilidad ladera abajo de la masa, implica que se está aún muy lejos de hacer mapas de riesgos. Aún así, se han propuesto algunos mapas de riesgos, normalmente elaborados con métodos directos y cualitativos, como por ejemplo los PER (plan de exposición a los riesgos) desarrollados en Francia, a partir de la integración de una



evaluación de elementos expuestos y de su vulnerabilidad, junto con los criterios geológico-geomorfológicos que definen la amenaza (Flageollet, 1989). Otro ejemplo son los mapas de riesgo elaborados a escala 1:5.000 para varios municipios de Vizcaya y Guipúzcoa, en los cuales se consideró, además de la amenaza potencial, la presencia de elementos expuestos (Tamés et al., 1986; Cendrero et al., 1987a, b y c).

Sin embargo, son muy escasos los mapas de riesgos elaborados con técnicas cuantitativas, a pesar de que hoy en día las herramientas y técnicas disponibles abren muchas posibilidades de trabajo en este sentido.

Así, Carrara et al. (1978) elaboran un mapa de “riesgos” a partir de un mapa matricial de amenazas (técnicas discriminantes) al que añaden uno de estructuras antrópicas, lo que supone, en conjunto, una evaluación areal cuantitativa de daños potenciales o riesgos. Posteriormente, Carrara, et al. (1991) producen un nuevo mapa basado en unidades de ladera. Aunque no incorporan implícitamente el tiempo, asignan un periodo de 25 años, principalmente por ser éste el periodo de recurrencia de lluvias intensas en la región. Para el cálculo del riesgo utilizan la siguiente expresión:

$$R_L = H_L * A_L/A_S * A_d/A_S * D_L$$

Donde:

$R_L$  = Riesgo de deslizamiento.

$H_L$  = Probabilidad de ocurrencia dentro de cada unidad de ladera. Determinado por la función discriminante.

$A_L/A_S$  = Relación entre área inestable y área total de la unidad de ladera.

$A_d/A_S$  = Relación entre el área habitada y el área total de la unidad de ladera.

$D_L$  = Grado de daño causado por el proceso. Consideraron el valor igual a 1 (destrucción total) en el caso de ocurrencia de un deslizamiento.

El resultado del análisis son tres clases de riesgo (virtualmente nulo, bajo y relativamente alto). A partir de entrevistas con habitantes del lugar sobre lo ocurrido en

los últimos 50 años, estiman que la predicción del mapa estaba de acuerdo con lo sucedido.

Otro ejemplo de mapa de riesgo cualitativo, puede verse en Chacón et al. (1992) quienes elaboran un modelo a partir de la transformación de un mapa de incidencia de movimientos de ladera en un mapa de zonas expuestas al que posteriormente añaden uno de vulnerabilidad y de recursos del territorio. Chacón et al (1994) elaboran un mapa de riesgo similar, aunque con distinta metodología para calcular la amenaza.

---

De la revisión antecedente se desprende que, si bien en los últimos tiempos se han producido avances considerables en la realización de mapas de amenazas de deslizamientos y en la aplicación de diferentes herramientas para la elaboración de los mismos, existen toda una serie de cuestiones abiertas, no resueltas todavía de manera satisfactoria, en las que es necesario profundizar. En el capítulo siguiente se plantean varias de dichas cuestiones, como base para la identificación de los problemas a abordar.







## Cap. 2 Planteamiento y objetivos





## 2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

### 2.1. Planteamiento del problema.

Sobre la base de lo comentado en el capítulo precedente se pueden identificar una serie de puntos en los que resulta de interés profundizar para mejorar nuestro conocimiento y capacidad de gestión con respecto a los movimientos en masa.

Los movimientos en masa son procesos naturales y, como tales, agentes geomorfológicos responsables en buena medida de la evolución del relieve, si bien no existen muchos datos sobre su contribución a dicha evolución. Estos procesos suponen un riesgo para el hombre y sus bienes; las pérdidas debidas a su actuación son muy elevadas y están en constante crecimiento. Las zonas montañosas densamente pobladas son especialmente sensibles a los daños producidos por estos procesos. Existe, por tanto, una clara necesidad de poner en marcha políticas y planes de mitigación para reducir esos daños, lo que requiere una mejora de las herramientas de evaluación y predicción actualmente existentes.

Los mapas de amenaza y riesgo constituyen una de las herramientas más utilizadas para emprender actuaciones específicas encaminadas a mitigar, al menos parcialmente, las consecuencias de los deslizamientos. No obstante, la validez predictiva de dichos mapas es, en general, desconocida.

Se han desarrollado muchos métodos y técnicas de análisis con los que se puede abordar el análisis de las amenazas debidas a movimientos en masa. Los métodos geotécnicos sólo son aplicables a movimientos individuales o zonas muy reducidas, puesto que son muy costosos en tiempo y en dinero. En el caso de estudios zonales, incluso para áreas relativamente pequeñas, como un municipio, la única alternativa viable son los métodos geomorfológicos. Dentro de este grupo de métodos, los



denominados métodos indirectos estadísticos son los que más posibilidades ofrecen, por ser los más potentes, objetivos y cuantitativos.

Sin embargo, y a pesar del gran desarrollo metodológico experimentado en los últimos años, se constatan las siguientes carencias:

- Con la excepción de algunos ejemplos parciales, las cartografías de amenaza están sin contrastar (Hutchinson, 1995). La ausencia de validación implica que el fin último del mapa de peligrosidad, que es la predicción del comportamiento futuro, no está debidamente apoyado en una contrastación independiente, por lo que dicho mapa será meramente una hipótesis. Una validación simple, aunque supone un gran avance, es siempre insuficiente y no clarificará adecuadamente el valor predictivo del mapa. Por otro lado, la validación es la única forma de progresar en la mejora de los métodos y técnicas, en la selección de los parámetros utilizados, en la determinación de errores y la importancia de los mismos en la evaluación, etc. Por todo ello es conveniente determinar el valor predictivo de los mapas de amenaza. Aunque no es realista pretender que se logre una capacidad predictiva del 100%, sí es razonable aspirar a obtener documentos cuya formulación y capacidad predictiva sean comparables a los que se elaboran en otros ámbitos sujetos a incertidumbres, como el de la predicción meteorológica.

- Prácticamente todos los trabajos de cartografía de riesgos debidos a deslizamientos se han centrado en la peligrosidad y, en concreto, en la probabilidad espacial o susceptibilidad, pero no en la probabilidad temporal. Así, Leroi (1996) en una revisión sobre las metodologías para la cartografía de las amenazas y riesgos debidos a movimientos de ladera, concluye que ningún método de cartografía integra explícitamente la noción del tiempo. La probabilidad espacial no está definitivamente resuelta en ningún caso, pero ya existen muchas aproximaciones, y puesto que el objetivo de los mapas es la predicción, es necesario considerar el aspecto temporal en los mismos. A pesar de que no sea posible, de momento, predecir cuándo y en qué punto exacto va a desencadenarse un fenómeno potencialmente dañino, se puede

incorporar en los mapas la probabilidad temporal de que esto suceda, con lo que el mapa resultante tendrá un valor añadido. El lapso de tiempo a considerar deberá ser lo suficientemente grande como para ser representativo del clima y de otras condiciones existentes, pero no tanto como para manifestar los efectos debidos a cambios en las condiciones geodinámicas y climáticas o para que su aplicación sea poco realista en las condiciones habituales de la planificación (unas pocas décadas). A pesar de que se esté aún lejos de poder elaborar mapas de riesgo, las ciencias de la tierra pueden y deben plasmar más información sobre la actividad de los procesos y sus potenciales consecuencias, que la tradicionalmente incluida en los mapas de amenazas.

- Sigue habiendo enfoques muy diversos de los que resultan cartografías con sentidos muy distintos, que además no suelen analizar ni la peligrosidad ni el riesgo, al menos de acuerdo con las definiciones al uso. Así, según Val et al. (1996), “Los conceptos de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo que se han venido aplicando en diferentes estudios y cartografías del País Vasco, son ambiguos, faltos de definición e incluso erróneos, lo que ha conducido al descrédito de los propios documentos, de gran valor técnico sin embargo en la mayoría de los casos, ante las diferentes administraciones y usuarios”. Si bien no cabe pensar en un tipo de mapa final estándar, y todos los productos se diseñan atendiendo a razones particulares, es siempre bueno explicar el significado del mapa con escrupulosidad.

- El alcance de la masa desplazada, la vulnerabilidad y los elementos expuestos, son aspectos necesarios para la evaluación del riesgo, que aunque han sido tratados independientemente, no se han integrado satisfactoriamente en ningún modelo predictivo, con lo que se está aún lejos de disponer de verdaderos mapas de riesgos.

- La clasificación del territorio en zonas de distinta peligrosidad o riesgo sigue siendo imprecisa, y no sólo debido al escaso conocimiento que tenemos de los procesos naturales. La bondad de la cartografía que se obtiene depende, además de la calidad de la ejecución y del tratamiento, del número y tipo de parámetros considerados. Si se pretende explicar toda la casuística a partir de combinaciones de parámetros, el



número a considerar sería grandísimo. Ahora bien, por motivos obvios (la recogida de datos sobre muchos parámetros y su análisis implica un gran coste de tiempo y dinero) esto es inabordable; por ello se debe usar sólo un número reducido de parámetros que resulten asequibles y que expliquen un porcentaje de casos tal que pueda ser considerado aceptable, en el sentido de que de ellos se deriven mapas fiables. La aplicación de los SIG al tratamiento de la información en los análisis de amenazas ha ampliado de manera notable la posibilidad de obtener datos de calidad sobre toda una serie de parámetros significativos, relacionados con la geometría del terreno. Así, se han incorporado a dichos análisis diversos factores morfométricos, derivados de los Modelos Digitales del Terreno (MDT); no obstante, la utilidad de esos factores no ha sido suficientemente contrastada. Otras variables, como la litología, la vegetación o los rasgos de inestabilidad, no suelen estar adecuadamente reflejadas y llevan asociados errores e incertidumbres considerables. Por todo ello, es conveniente también tratar de solventar el problema de la incertidumbre en la toma de datos y los errores asociados al tratamiento de los mismos, en todos los niveles del proceso de elaboración de los mapas. La valoración de los errores debería quedar reflejada, de alguna forma, en los mapas resultantes.

- La actividad antrópica, cada vez más intensa, es un factor que puede influir en la actividad y desencadenamiento de movimientos en masa. Siendo tan importante *a priori* como otros factores condicionantes y desencadenantes, generalmente no ha sido considerada, a pesar de las evidencias al respecto. Así, según Nilsen y Turner (1975), el 50% de los deslizamientos analizados en Contra Costa County, California, fueron causados por la actividad humana. Duque et al. (1991) y Remondo et al. (1996) estimaron, en varios municipios del País Vasco, que los movimientos en masa relacionados con la actividad humana constituían el 52% y 32% respectivamente, del total. Por esta razón, en algunos trabajos se ha tratado solamente la amenaza natural, excluyendo todos los movimientos relacionados directamente con la actividad humana. Los efectos de la actividad antrópica pueden ser tan complejos que resulta muy difícil incluirlos en los análisis sistemáticos de tipo estadístico, si bien algunas de las variables comúnmente utilizadas reflejan algunas de las modificaciones introducidas por el

hombre. Sería deseable buscar formas de incorporar a la predicción, aunque sea de manera semicuantitativa, la posible influencia humana en la modificación del nivel de amenaza.

Pero el análisis de los procesos de deslizamiento no solamente tienen interés desde una perspectiva de tipo “utilitario” encaminada a mitigar los riesgos; también resulta de interés para mejorar nuestro conocimiento de la evolución geomorfológica pasada, ayudando a proporcionar una imagen más cuantitativa de la misma. Así, aunque se han desarrollado diferentes modelos, tanto conceptuales como matemáticos, para describir la evolución de las vertientes, con y sin intervención de movimientos en masa, hay una gran escasez de datos cuantitativos sobre la cronología y las tasas de movilización de los deslizamientos. El papel de éstos en la evolución del relieve en regiones con diferentes características morfodinámicas es poco conocido (Cendrero y Dramis, 1996); aunque existen algunos análisis de este tipo (González-Díez et al., 1999), abarcan lapsos de tiempo bastante amplios, difíciles de relacionar con el desarrollo reciente de los procesos.

De una manera esquemática y simplificada, la hipótesis de trabajo en la que se fundamenta el presente análisis se podría formular como: “el estudio de la distribución espacial y temporal de los movimientos en masa de una cierta zona, en relación con los factores causales y a lo largo de periodos de tiempo comparables a los necesarios para la planificación, debe permitir establecer con mayor precisión la importancia de cada uno de dichos factores, determinar la contribución del proceso a la evolución del relieve y desarrollar modelos que sirvan para predecir con más precisión el comportamiento futuro”. El esquema conceptual que plasma de manera gráfica la hipótesis anterior se presenta en la Figura 2.1. Según se aprecia en la figura, el conocimiento del proceso estudiado se aplica para proyectarlo hacia el pasado, a fin de obtener una mejor comprensión de la evolución geomorfológica, y hacia el futuro, para desarrollar mejores instrumentos de predicción evaluación de amenazas y riesgos.



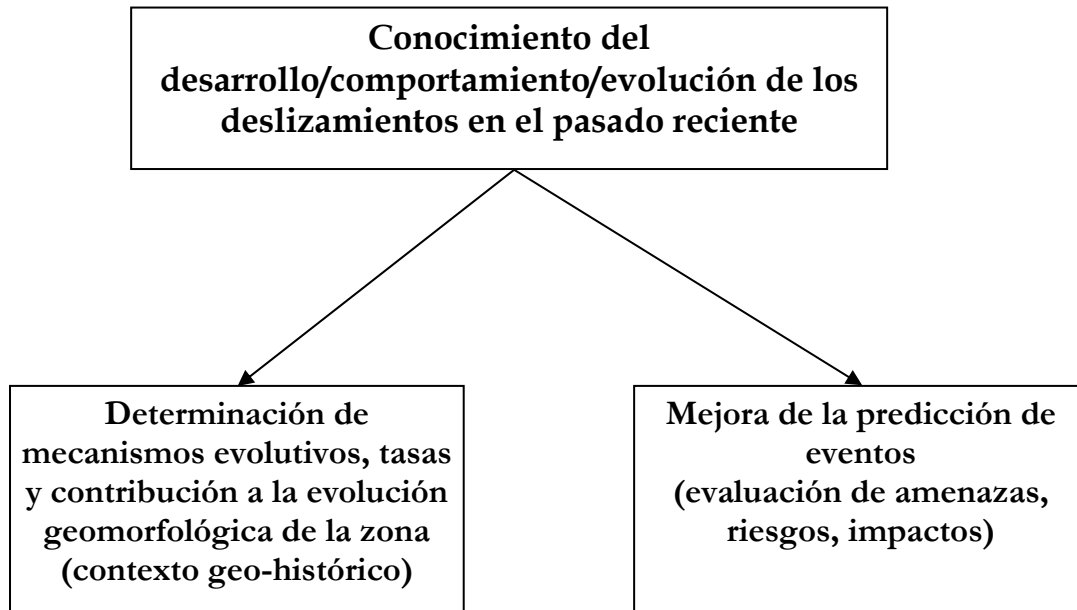


Figura 2.1. Esquema conceptual de la hipótesis de trabajo.

Evidentemente, en este trabajo no se pretenden resolver definitivamente todos los problemas expuestos, sino hacer algunas aportaciones que contribuyan a un mejor conocimiento de los procesos reseñados, así como a la elaboración de herramientas más útiles y contrastadas, que sirvan de base tanto para la planificación como para la obtención de mejores mapas de riesgos o para la realización de mejores evaluaciones de impacto ambiental.

Los métodos desarrollados y/o aplicados para tratar de conseguir los objetivos arriba indicados se han ensayado en tres zonas de estudio, de tres lugares diferentes del norte de España: Bajo Deva (Guipúzcoa), La Pobla de Lillet (Barcelona) y varios municipios de Cantabria. El esfuerzo principal de desarrollo metodológico se ha concentrado en la primera de dichas zonas, utilizándose las otras dos fundamentalmente para contrastar la validez del procedimiento.

## 2.2. Objetivos

Según se desprende de lo dicho anteriormente, el objetivo general de este trabajo es tratar de mejorar el conocimiento del desarrollo de los procesos de deslizamiento en la zona de estudio, como base para una mejor predicción de los sucesos que puedan acontecer en el futuro y una mejor mitigación del riesgo, así como para una determinación más precisa del papel de los mismos en la evolución del relieve. Como resultado de todo el estudio se quiere llegar a establecer unos criterios que contribuyan a mejorar las metodologías de evaluación de amenazas debidas a movimientos en masa, utilizando parámetros asequibles, con el propósito de hacerlas más objetivas y de aplicación más generalizable.

Este objetivo general puede concretarse en los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una metodología cuantitativa de elaboración de mapas de amenaza (modelos predictivos) debida a deslizamientos, considerando tanto la distribución espacial como la temporal. Esto implica analizar las relaciones existentes entre la distribución espacial de los factores causales, y la distribución espacio-temporal de los movimientos en masa ocurridos en los últimos 50 años. Para ello se aplicarán técnicas de análisis de las relaciones entre datos espaciales, mediante relaciones estadísticas, conocidas como Análisis de Datos Espaciales (*Spatial Data Analysis, SDA*, en inglés).

Puesto que los diferentes tipos de movimientos en masa no son consecuencia de los mismos factores condicionantes y desencadenantes, tales relaciones deben establecerse para cada tipo de movimiento independientemente. Por ello, el análisis se ha centrado en un tipo de movimiento de masa: los deslizamientos superficiales (deslizamientos de derrubios, según la clasificación presentada), dado que constituyen una tipología muy frecuente y por tanto son muy adecuados para tratamientos estadísticos. Las conclusiones que de este análisis se deriven con respecto a la validez de la metodología son extrapolables a otros tipos de deslizamientos. Si bien este tipo de movimientos no



implica importantes consecuencias económicas, resultan especialmente adecuadas desde un punto de vista metodológico.

La unidad de análisis regular (matriz) se considera la más idónea, puesto que se ajusta muy bien a las capacidades de análisis de los SIG y, además, permite incorporar información proveniente de sensores remotos, que en el futuro próximo constituirían la principal fuente de datos.

La utilización de estos procedimientos es especialmente adecuada para la aplicación de técnicas multivariantes *sensu lato*, que permiten analizar de forma objetiva y simultánea la influencia de todos los factores considerados, obteniéndose de ellas resultados cuantitativos. Se pueden obtener así mapas de susceptibilidad a la rotura, a los que posteriormente se puede añadir la probabilidad temporal.

Dentro de este objetivo se podrán abordar paralelamente otros objetivos particulares, gracias al volumen y tipo de datos generados.

- Identificar los factores condicionantes más significativos que intervienen en la aparición de deslizamientos, así como la importancia relativa de los mismos.
- Establecer el mínimo de parámetros que permitan llevar a cabo evaluaciones fiables del nivel de amenaza, evaluando el grado de fiabilidad de las mismas en comparación con las obtenidas a partir del análisis de un amplio número de factores. Esto permitirá hacer una valoración de la relación esfuerzo/calidad del análisis.
- Hacer un análisis comparativo de diferentes técnicas de análisis estadístico, en diferentes áreas, con el fin de determinar las que resultan más adecuadas, teniendo en cuenta tanto la calidad de los resultados obtenidos como la facilidad de aplicación. Esto permitirá hacer propuestas de buenas prácticas para este tipo de análisis, teniendo en cuenta la naturaleza de las zonas de estudio.



- Comprobar hasta qué punto los procedimientos SIG permiten construir, de manera automática, mapas de amenaza con significado cuantitativo, expresados en términos que permitan incorporarlos a los procesos de gestión de amenazas y riesgos.
  - Desarrollar procedimientos de evaluación de riesgos y de impactos ambientales que, basados en los mapas de amenazas, sirvan para mejorar la formulación y cuantificación de las predicciones en dichos ámbitos.
  - Hacer un análisis comparativo de la “rentabilidad” de diferentes procedimientos de análisis y tipos de mapas, a fin de evaluar la relación “esfuerzo/resultado” de los mismos y hacer recomendaciones sobre las prácticas más aconsejables.
- 
- Establecer procedimientos de validación sistemática e independiente de los mapas de amenazas, a fin de determinar su nivel de fiabilidad o capacidad predictiva. Esto puede proporcionar las bases para la realización de pronósticos “asimilables” a los pronósticos meteorológicos. Asimismo, se pretende analizar la influencia de los errores en la determinación de diferentes parámetros, en la capacidad predictiva de los mapas obtenidos.
  - Contribuir al mejor conocimiento de los procesos: su desencadenamiento y evolución a lo largo del tiempo. Se pretende establecer, de forma al menos semicuantitativa, la contribución de los movimientos en masa a la evolución del relieve en tiempos recientes, así como de la posible influencia humana en dichos procesos y evolución.







## Cap. 3 Metodología



### 3. METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos señalados se ha seguido la metodología habitual en un trabajo de investigación. Partiendo del estado de los conocimientos sobre la distribución y ocurrencia de movimientos en masa, se plantea una hipótesis relativa a la posibilidad de desarrollar modelos de susceptibilidad con validez predictiva. Seguidamente se obtienen los datos correspondientes para las zonas de estudio analizadas y se utilizan para contrastar la hipótesis. Igualmente se plantea la posibilidad de aplicar los datos sobre la ocurrencia de deslizamientos para mejorar el conocimiento sobre la contribución de estos procesos a la evolución del relieve. En el presente capítulo se discute con detalle la metodología y las técnicas aplicadas; algunos detalles específicos de estas últimas se comentarán en capítulos posteriores.

En relación con la cartografía de amenazas, es importante tener en cuenta previamente las condiciones de contorno de la investigación a desarrollar, pues condicionan tanto los detalles metodológicos y técnicos como los resultados. Así, de acuerdo con Hansen (1984b) la metodología depende de cuatro aspectos: naturaleza y extensión del área de estudio, disponibilidad de financiación, tiempo y personal disponibles, y accesibilidad del área. El método óptimo debe seleccionarse según sea la relación coste / beneficio, teniendo en cuenta tales aspectos.

Walker et al. (1987) plantean la necesidad de considerar si el estudio debería referirse a deslizamientos actuales o potenciales; si el énfasis debiera ponerse en las zonas de rotura, en la extensión de la masa deslizada, en la frecuencia de ocurrencia o en las consecuencias del deslizamiento. La naturaleza de la interacción entre la amenaza y los elementos expuestos al riesgo debe influir en el diseño del estudio. Cuanto mayor y más variada sea el área, y más diversa sea la ocupación humana y su actividad, más compleja deberá ser la investigación en cuanto a escala, contenidos, etc. Por esta razón, Varnes (1984) propone que las cartografías deberían completar una serie de fases



previas al planteamiento metodológico, empezando por un estudio preliminar conducente a responder una serie de cuestiones relacionadas con el tipo de elementos expuestos y las posibles consecuencias que pueden sufrir, al tipo de instrumentos que deben aplicar y decisiones que deben tomar las entidades administrativas, siempre teniendo en cuenta los recursos disponibles.

A pesar de que los comentarios anteriores representan consejos de buena práctica y no tanto criterios para definir una metodología de investigación, deben ser considerados a la hora de proponer dicha metodología. Las respuestas a estas preguntas ayudan a determinar el tipo y cantidad de investigación necesaria y la escala a la que deberá hacerse la cartografía de riesgo. Es evidente que no resultaría adecuado proponer una metodología para cuya aplicación fuera necesario un esfuerzo en la toma de datos que haga imposible, en práctica, su aplicación para resolver los problemas de mitigación existentes en la realidad. Así, en este trabajo se plantea una metodología para la cartografía extensiva de amenazas a escala municipal-regional utilizando la información geocientífica comúnmente existente o relativamente fácil de obtener, desde una aproximación geomorfológica. Las áreas de aplicación, como se verá en el capítulo siguiente, corresponden a zonas montañosas altamente influenciadas por la actividad humana, en las que los procesos de ladera actúan intensamente. En tales zonas existe una necesidad, por parte de las administraciones públicas, de disponer de instrumentos de prevención y predicción. Atendiendo a esta necesidad y teniendo en cuenta las condiciones de contexto, se diseña la metodología.

De acuerdo con Hansen (1984b), la amenaza puede evaluarse a partir de tres métodos distintos:

- Método histórico, según el cual se analizan los datos registrados acerca de la magnitud, frecuencia, fecha, etc. de eventos pasados.
- Análisis geomorfológico; la frecuencia y la magnitud derivan de las evidencias de campo y de la fotointerpretación.
- Medidas, experimentación y cálculos; que pueden proporcionar información cuantitativa adicional.

Una evaluación completa requiere la aplicación de más de uno de estos métodos, preferiblemente de los tres, tal y como se ha hecho en este estudio.

En cuanto a la reconstrucción histórica de los procesos de ladera en el pasado reciente y sus implicaciones en la evolución del relieve, el método desarrollado se apoya en el análisis geomorfológico convencional, combinando fotointerpretación y trabajo sobre el terreno.

El trabajo realizado se ha estructurado en las siguientes fases:

1º Adquisición de los datos necesarios para la consecución de los objetivos. Esto incluye la identificación, caracterización y datación de las áreas deslizadas, y de los factores que condicionan y determinan la inestabilidad.

La identificación y caracterización de las áreas deslizadas se ha llevado a cabo a través de las técnicas clásicas de fotointerpretación y de campo. La datación de los movimientos en masa se ha basado fundamentalmente en la comparación de pares estereoscópicos correspondientes a distintas fechas, si bien también se ha utilizado la información histórica disponible y en algunos casos se han ensayado técnicas de datación absoluta mediante isótopos radiactivos. Una vez establecido el modelo de rotura de los movimientos en masa a estudiar, se definen los factores que intervienen en el proceso y que servirán para un ulterior análisis. Evidentemente, en un estudio de carácter areal no es posible obtener información sobre todas las variables que intervienen en el proceso; por tanto, es preciso seleccionar los rasgos que puedan dar información directa o indirecta sobre el mayor número de parámetros físicos posibles.

2º Construcción de un banco de datos digital que incluya toda la información recogida. Tanto las áreas deslizadas como los factores causales seleccionados se han incorporado a un SIG, con una estructura tal que permita gestionar y analizar la información incluida, de forma que se puedan obtener los resultados deseados. Toda esta información es de carácter espacial; en el caso de las áreas deslizadas, se ha elaborado



una ficha con criterios de campo para cada uno de los deslizamientos analizados (más de 2500).

3° Aplicación de las distintas técnicas de análisis. Se han aplicado técnicas estadísticas multivariantes de cartografía indirecta para el análisis de la susceptibilidad del terreno a deslizarse. Las técnicas utilizadas han sido las Funciones de Favorabilidad (FF) y el Análisis Discriminante *sensu stricto*.

Por otro lado, la determinación de los volúmenes movilizados por los deslizamientos analizados, junto con la cronología de los mismos, permite cuantificar las tasas del proceso, que pueden compararse con las tasas generales de denudación, a fin de determinar en qué medida han contribuido a la evolución reciente del relieve. Asimismo, se han establecido las relaciones entre ocurrencias y factores desencadenantes, con el fin de tratar de identificar tendencias que sirvan de base para plantear escenarios de cara al futuro cercano.

4° Contrastación de los resultados y análisis de sensibilidad. La validación de los modelos de susceptibilidad, mediante distintas estrategias, permite conocer los factores más importantes de la inestabilidad, comparar las técnicas de análisis, estimar la importancia de los errores, etc. La validación, además, ayuda a establecer la probabilidad temporal (frecuencia en el tiempo) para cada punto del espacio. Los conceptos de probabilidad espacial, temporal y espacio-temporal se resumen en la Figura 3.1 y se discuten con mayor detalle en el capítulo 6.

5° Aplicaciones de los modelos predictivos validados. Conociendo la probabilidad espacio-temporal y construyendo escenarios de progresión de la masa deslizada se pueden construir mapas de amenaza en sentido estricto.

Una vez conocidos y validados los modelos de amenazas, éstos pueden utilizarse en estudios de evaluación de impacto ambiental, para la predicción de impactos sobre los procesos de ladera.



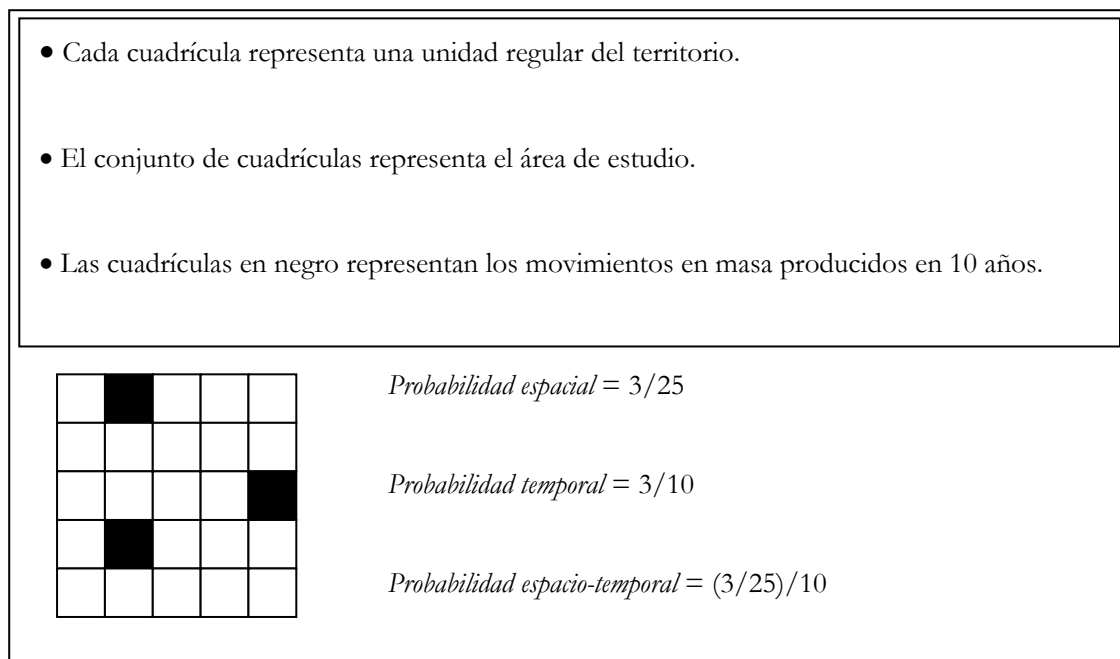


Figura 3.1. Conceptos de probabilidad espacial, probabilidad temporal y probabilidad espacio-temporal.

El análisis, en conjunto, debe ayudar a determinar hasta qué punto la actividad humana ha podido modificar el desarrollo de estos procesos.

Una revisión muy adecuada de las fuentes de información que se pueden utilizar para este tipo de análisis es la presentada por Brunsdén e Ibsen (1994) e Ibsen y Brunsdén (1996).

En este trabajo se han utilizado las siguientes fuentes básicas de información, tanto en formato digital como en papel:

- Literatura: trabajos publicados o inéditos que se refieren al área de interés. Información sobre los procesos, el clima, la geología, la hidrología, etc. Otras fuentes de datos son los artículos de prensa sobre eventos, las crónicas, los informes de zonas catastróficas, informes de compañías aseguradoras, estudios de empresas constructoras.



- Cartografía existente: mapas de inventarios de deslizamientos, mapas de riesgos, topográficos, geológicos, de vegetación, etc., tanto analíticos como sintéticos.
- Fotografías aéreas tomadas en distintas fechas.
- Adquisición directa de nuevos datos: Cartografía detallada de deslizamientos y toma de datos sobre sus características geométricas y ambientales, y de los efectos de los mismos. Adquisición de datos geocientíficos adicionales para cubrir carencias o mejorar las cartografías de factores condicionantes existentes. Entrevistas sistemáticas a lugareños, autoridades y personal técnico.
- Muestreos y medidas en laboratorio, para caracterizar temporalmente los movimientos en masa.

En el diagrama de la Figura 3.2 se muestra la secuencia metodológica en la que se representan, de forma esquemática, las distintas etapas de este trabajo

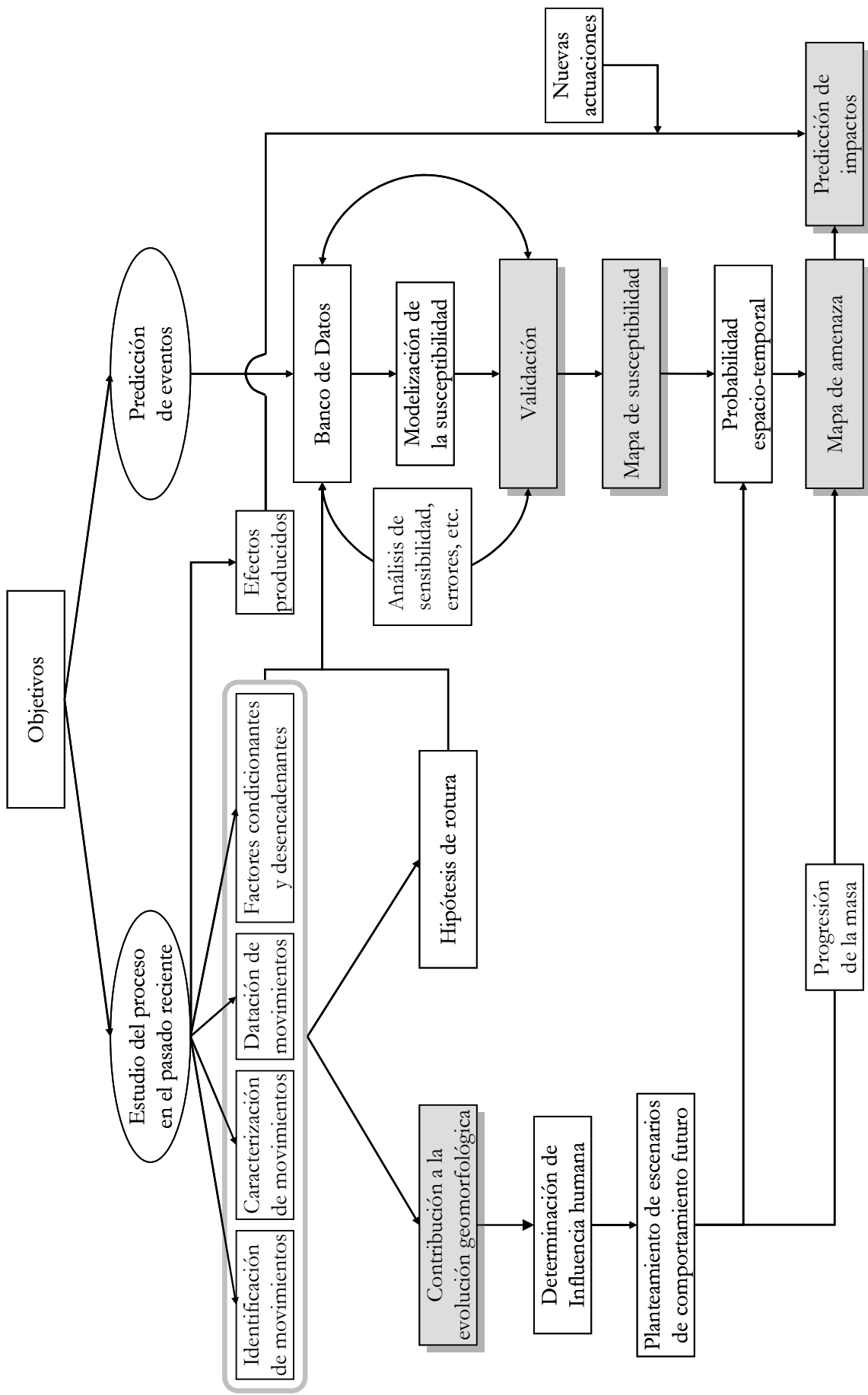


Figura 3.2. Diagrama metodológico general.

### 3.1 Hipótesis de trabajo

La hipótesis de trabajo se fundamenta en que es posible establecer correlaciones significativas entre parámetros asociados a deslizamientos y la ocurrencia de movimientos de ladera en el pasado reciente, de modo que permitan hacer predicciones con respecto al comportamiento futuro.

La inestabilidad de una ladera está relacionada con una serie de parámetros geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, de cobertura vegetal, etc. Determinando la contribución relativa de cada parámetro al proceso de inestabilidad, se podría estimar la mayor o menor susceptibilidad del terreno a deslizarse y, a partir de ello, clasificar un área determinada en zonas de distinto grado de amenaza. Para ello, es necesario considerar además la propagación de los deslizamientos ladera abajo y la recurrencia temporal del proceso. Si además se incorpora la vulnerabilidad de los elementos expuestos, según las características del deslizamiento, se pueden obtener mapas de riesgo.

Ahora bien, puesto que el análisis está basado en procesos pasados y lo que se pretende es hacer predicciones para el futuro, se da por supuesto el principio de que el pasado y el presente son la clave para predecir el futuro, por lo que se presupone que el comportamiento futuro de las laderas no diferirá mucho del comportamiento pasado, a partir del cual se han establecido los criterios de zonificación, al menos si las condiciones ambientales no sufren variaciones significativas.

La metodología, por tanto, es de tipo inductivo/deductivo, y consistirá en el análisis estadístico de parámetros, siendo el mapa resultante una hipótesis de clasificación del área en zonas de distinta susceptibilidad y/o amenaza que habrá que contrastar. Para ello, es necesario conocer lo ocurrido en el pasado reciente. La validación con muestras independientes dará sentido cuantitativo al carácter predictivo del mapa y permitirá

valorar la suposición actualista en la que se basa el trabajo. En principio, cuanto más detallado sea el conocimiento sobre ese pasado, mayor será la fiabilidad de la predicción. Asimismo, los cambios que los factores desencadenantes hayan podido experimentar, incluso en periodos de tiempo cortos, ayudarán a comprender mejor las posibles tendencias futuras y la aplicabilidad y limitaciones del mapa de amenazas.



## 3.2 Técnicas y herramientas de análisis

En este apartado se explican las técnicas de análisis empleadas, así como las herramientas utilizadas para aplicar las mismas.

### 3.2.1 Identificación y cartografía de movimientos en masa

Un aspecto fundamental y determinante para cualquier análisis de peligrosidad o riesgo es el inventario y cartografía de los deslizamientos existentes. Fundamental puesto que constituye la base para cualquier análisis sobre procesos de ladera, y determinante porque de su calidad dependerá, en principio, el resultado final. Entre las técnicas para la identificación de rasgos geomorfológicos, el trabajo de campo y la fotointerpretación son las más utilizadas, a la vez que ofrecen los mejores resultados.

La interpretación de fotografías aéreas constituye una técnica de teledetección esencial para la identificación de signos de inestabilidad. De acuerdo con Rib y Liang (1978) la teledetección (*Remote Sensing*) es “*the collecting of information about an object or phenomenon by the use of sensing devices not in physical or intimate contact with the subject under investigation*”. Si bien existe la tendencia a restringir el término teledetección a la información numérica generada por satélites y otros dispositivos aerotrasportados, ésta debe aplicarse a toda la que cumpla las características señaladas (Janssen, 2000). De todos los sistemas disponibles, las fotografías aéreas con visión estereoscópica son las de uso más generalizado, las menos costosas y las que más información proporcionan a escala detallada.

Las fotografías aéreas no suelen realizarse expresamente para la identificación de deslizamientos, por lo que, por motivos de escala, época del año, momento del día,

etc., pueden no ser idóneas para un trabajo específico. De cualquier forma, todas las fotos disponibles son de utilidad, sobre todo para tratar de reconstruir la historia de los movimientos del pasado reciente. Idealmente, si se pretende hacer una interpretación detallada de fotografías aéreas, éstas, deberían tener una escala mitad que el mapa producto final (Rengers y Soeters, 1980).

Normalmente, la fotointerpretación suele realizarse por un solo operador, por lo que la información que se obtenga dependerá en gran medida de su experiencia. Para que la fotointerpretación sea útil, se requiere un investigador experimentado en la técnica de identificación de movimientos en masa y en las características geológicas y geomorfológicas del área de estudio (Rib and Liang, 1978). Cuando el inventario y cartografía se basan mayoritariamente en criterios de campo, las discrepancias entre varios profesionales quizás no sean muy grandes, pero en casos como el de este trabajo, en el que la base de identificación es la fotointerpretación, las diferencias entre operadores pueden ser muy grandes. Varnes (1978), van Westen (1993), Carrara et al. (1995) y Carrara (2000) han estudiado este hecho, demostrando la incertidumbre que supone este aspecto tan determinante. Si bien este problema es extensible a todos los parámetros cartografiados, éste es sin duda el más destacable por su importancia en el análisis de la peligrosidad. Con el fin de reducir los errores en la fotointerpretación Guzzetti y Cardinali (1990) proponen que la identificación y cartografía se lleven a cabo por dos operadores simultáneamente, mediante un estereoscopio de doble cuerpo.

Independientemente de este problema, que de momento no puede solventarse, salvo parcialmente con la experiencia, un mismo investigador puede interpretar con actitud desde “restrictiva” (inventariando exclusivamente los elementos que no den lugar a dudas) a “incluyente” (inventariando también rasgos dudosos). En cualquier caso, parece de interés determinar la importancia que los errores de inventario pueden tener para la calidad del resultado final.



En este trabajo se ha actuado de la segunda forma, de manera que se han fotointerpretado los deslizamientos evidentes y todos aquellos que pudieran serlo. Estos últimos fueron considerados como hipotéticos y posteriormente se revisaron en el campo con las fotografías del mismo año, lo que ayudó a mejorar el criterio de interpretación, y permitió definir criterios para fotointerpretar vuelos de fechas precedentes. En el capítulo 6 se discute la estimación de errores para esta fase de trabajo.

Las series de fotografías aéreas disponibles para la zona del Bajo Deva y utilizadas en este trabajo se relacionan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de los vuelos utilizados para el estudio de la zona del Bajo Deva.

<b>Fecha del vuelo</b>	<i>Escala</i>	<b>Color</b>	<i>Cobertura</i>
1954-5	1:12.000	B/N	Total
1969 **	1:15.000	B/N	Parcial
1970 **	1:15.000	B/N	Parcial
1970	1:20.000	B/N	Total
1981	1:16.000	B/N	Parcial
1983	1:18.000	B/N	Total
1985	1:15.000	B/N	Total
1988	1:18.000	B/N	Parcial
1991 *	1:18.000	COLOR	Total
1993	1:15.000	B/N	Total
1997 *	1:18.000	COLOR	Total
1997	1:40.000	COLOR	Total

\* El inventario correspondiente a estos vuelos ha sido comprobado con trabajo de campo en sendas campañas.

\*\* Entre ambas cubren la totalidad de la zona estudiada.



Todos los vuelos reseñados han sido estudiados con detalle por medio de fotointerpretación, la cual ha sido posteriormente contrastada sobre el terreno.

En lo que se refiere al control de campo relativo a la identificación de “nuevos” deslizamientos (visibles en un vuelo pero no en los anteriores), sólo se ha realizado para dos vuelos recientes, correspondientes a las fases “inicial” (1991) y “final” (1997) de este análisis.

Como se observa en la tabla, la naturaleza de los vuelos varía (color o B/N), al igual que la escala (1:12.000 a 1:20.000) y, por supuesto, la calidad. En conjunto, el análisis está basado fundamentalmente en fotogramas de escala 1:15.000 – 1:18.000, que es la correspondiente al grueso de los vuelos disponibles. Afortunadamente, el vuelo más antiguo (1954-5) es también el de escala más detallada (1:12.000) y, además, de muy buena calidad para este fin. Esto hace que constituya una excelente referencia para establecer el “instante cero”, a partir del cual se determina la aparición de nuevos movimientos.

Para la fotointerpretación se ha usado un estereoscopio de doble puesto tipo Condor-T22 de la marca Ushikata, con aumentos de 1,5x y 3x lo que permite triplicar la escala de visión (hasta 1:6.000 en la mayoría de los vuelos). El estereoscopio de doble puesto permite interpretar cómodamente los distintos matices que muestran los fotogramas al ser contemplados desde distintos ángulos, a la vez que facilita el contraste con la interpretación de otro operador.

Un problema importante en la fotointerpretación de rasgos geomorfológicos de pequeñas dimensiones (como la mayoría de los deslizamientos del estudio) es la sensibilidad que proporciona esta técnica. Para contrastar esta sensibilidad, se acudió a comparar los movimientos observables en el terreno con los detectados en las fotografías aéreas. Se pudo establecer así, en los dos vuelos para los que se hizo la comprobación (1991, 1997), que en el campo se observan aproximadamente un 30% más de deslizamientos que en las respectivas fotos. Estos movimientos son, casi sin



excepción, de pequeñas dimensiones, por lo que no son detectables por fotointerpretación. Es razonable suponer que lo mismo resulta aplicable a vuelos más antiguos, para los cuales esta comprobación no es posible. No obstante, para evitar posibles errores por inconsistencia en el tratamiento de vuelos de distintas fechas, el análisis básico de susceptibilidad se ha realizado sobre la base de los movimientos perceptibles en las fotografías aéreas.

Aparte de los problemas señalados, la mayor dificultad que aparece a la hora de fotointerpretar consiste en la identificación de rasgos geomorfológicos en zonas cubiertas. Este problema está causado por la existencia de zonas de sombra, nubes, falsos reflejos, defectos que presentan los fotogramas y, sobre todo, por la vegetación boscosa. Aunque estas zonas se han estudiado con más cuidado por medio de recorridos densos y sistemáticos en el campo, la interpretación final es imprecisa por defecto y da lugar, si no se tiene en cuenta esa circunstancia, a atribuir al arbolado una capacidad de retención mayor que la que realmente tiene.

La cartografía de los movimientos identificados es de suma importancia en los estudios de tipo regional. En Europa hay numerosas propuestas de cartografía geomorfológica (Brunsden et al. 1975; Kienholz, 1978; Mahr y Malgot, 1978; Seijmonsbergen, 1986; Brancaccio et al., 1994; Panizza et al., 1998). En síntesis, todas las propuestas plantean representar cada individuo mediante su envolvente, señalando dentro de ella la corona y el área de acumulación del material (Varnes, 1958; Zaruba y Mencl, 1969; Cendrero et al., 1994). En ocasiones mediante símbolos o signos se identifica la tipología del movimiento (Duque et al., 1990a; González et al., 1992; Panizza et al., 1998). En escalas de alta resolución, algunos autores representan los micro-rasgos internos de los movimientos (Cendrero et al., 1994; Martín, 1994; Weber, 1994; González-Díez, 1995). Otras veces, por el contrario, cuando los deslizamientos son muy pequeños en relación a la escala, su representación se simplifica a un punto (Díaz de Terán et al., 1998; Remondo et al., 1998; Corominas et al., 2000).

Por otro lado, es evidente que la topografía se modifica cuando una masa se desliza, y que cuando se representan los movimientos de ladera las condiciones topográficas del mapa no coinciden con las reales en las situaciones en las que ya existe el movimiento. Este hecho se agudiza cuando se pretende representar, sobre una misma base topográfica, los deslizamientos ocurridos en distintos periodos de tiempo y establecer correlaciones con la geometría del terreno. Con la intención de considerar las condiciones originales previas al desencadenamiento de los movimientos en masa Chacón et al. (1992, 1994, 1996, 1999) establecen unas franjas alrededor de las zonas de rotura, en el inventario de movimientos de ladera. Esta aproximación es útil y conveniente en el caso de movimientos profundos de grandes dimensiones; en el caso de pequeños movimientos superficiales, las modificaciones geométricas están en general por debajo de la sensibilidad de los Modelos Digitales de Terreno (MDT) utilizados, por lo que no representan un inconveniente significativo. Otra solución al problema es la utilizada por Carrara et al. (1992) con las denominadas unidades de ladera (ver apartado 1.5.1.3: Unidades cartográficas de análisis). Una revisión de las técnicas utilizadas para la cartografía de los movimientos en masa y de los datos que deberían incluirse en todos los mapas la presenta Cotecchia (1978).

La cartografía inicial elaborada para este trabajo (escala 1:5.000; ver Anexo I), a partir de la fotointerpretación del vuelo de 1991 y del trabajo de campo correspondiente, representa la totalidad de los movimientos, diferenciando la zona de ruptura y el depósito (siempre que ambos fueran diferenciables), así como una serie de rasgos micromorfológicos (escarpes menores, lóbulos, etc.). Para la cartografía correspondiente a los demás lapsos temporales considerados, se han utilizado solamente los centroides de las zonas de rotura. Esto ha sido así por dos razones principales: por un lado, porque el análisis realizado trata de establecer la “probabilidad” de que tengan lugar nuevos movimientos, lo cual, evidentemente, está directamente relacionado con la ruptura; por otro lado, las dimensiones de los movimientos en la zona de estudio son tales que en la mayoría de los casos esas zonas de ruptura son asimilables a un píxel.



Además, al objeto de evaluar el nivel de error del procedimiento aplicado, se ha elaborado, para una zona del Bajo Deva que representa aproximadamente un 20% del área de estudio, una cartografía en la que se han representado, a partir de los rasgos geomorfológicos visibles en el campo o en la fotografía aérea, todas las zonas que presentan indicios de haber experimentado deslizamientos (uno o varios superpuestos) en tiempos recientes (unas décadas; probablemente no más de un siglo en cualquier caso, según se comenta más adelante al tratar la persistencia de estos rasgos en el paisaje). El análisis de susceptibilidad se llevó a cabo tanto para esta cartografía como para la que representa los centroides de las zonas de ruptura individuales, con el fin de comparar los resultados.

Aparte de la identificación y cartografía de los movimientos en masa, generalmente se elabora una base de datos en donde se recogen una serie de ítems referidos a cada movimiento analizado. Existen muchos ejemplos de bases de datos diseñadas para el inventario de procesos de ladera (Matula y Nemcok, 1965); Carrara y Merenda, 1976, Tamés et al., 1986; Cendrero et al., 1987a, b y c; Cooke y Doornkamp, 1990; González-Díez, 1995). Obviamente, en función de los fines del trabajo, las bases de datos se inclinan más por unos u otros aspectos. En conjunto, todos los ejemplos de inventario existentes presentan algún que otro problema. Normalmente, los ejemplos van desde unos simples recordatorios para la toma de datos de forma sistemática, a unos *desiderata* que contienen toda la información que sería deseable obtener y que en la mayoría de los casos es imposible recoger.

Aún así, la principal ventaja del uso de una ficha de inventario es que cada una de las principales categorías de factores condicionantes y determinantes puede ser examinada sistemáticamente. La ficha puede usarse durante la fotointerpretación y durante los recorridos de campo. De todas formas, cuanto más amplia sea, más información aporta, pero más tiempo se necesita para rellenarla. Es destacable la ficha propuesta por Carrara y Merenda (1976), en la que se recoge información cualitativa y objetiva, aunque hace hincapié en la información morfológica, siendo mínima la de carácter geotécnico. Otra ficha, más sencilla es la propuesta por Kienholz (1978) en la que es

destacable la ficha auxiliar que indica el tipo de inestabilidad que puede afectar a determinadas estructuras, y el grado de los posibles efectos.

Para este trabajo se ha diseñado una ficha de recogida de datos, basada sobre todo en las propuestas por Carrara y Merenda (1976) y Tamés et al. (1986), que contiene unos 60 ítems.

Los aspectos relativos a la cartografía y su incorporación al banco de datos, así como los detalles sobre la ficha de recogida de datos, se discuten con mayor amplitud en el capítulo 5.

### **3.2.2 Caracterización espacio-temporal de movimientos en masa**

Para cubrir los objetivos planteados en este trabajo es necesario determinar la edad de los deslizamientos, a fin de establecer la distribución espacio-temporal de los mismos. Conocer la edad de un deslizamiento ayuda a determinar las circunstancias que han dado lugar a la rotura. Si además se conoce la edad de los deslizamientos del entorno, la pluviometría, la sismicidad, actuaciones humanas, etc., se pueden extraer conclusiones sobre la dinámica general de la región, sobre las que basar la evaluación de la amenaza.

De acuerdo con Corominas y Moya (1996), la predicción temporal de los deslizamientos puede abordarse con dos enfoques distintos: mediante modelos determinísticos y probabilísticos. En los modelos determinísticos, la predicción de la rotura se deriva de las velocidades de deformación de puntos situados en la ladera. Así, los desplazamientos y deformaciones tienden a acelerarse cuando se acerca el momento de la rotura, con lo que se pueden diseñar modelos predictivos más o menos complejos (Voight, 1989; Rat, 1988). El problema de estos modelos es que para su desarrollo se necesita un sistema de auscultación y registro de datos continuos, lo que hace que sólo



sea aplicable en deslizamientos singulares. Por el contrario, cuando se dispone en un área de una serie temporal de deslizamientos se puede estimar la probabilidad de ocurrencia, por lo que puede estilizarse para la elaboración de mapas de amenazas, siempre y cuando las condiciones ambientales sean relativamente homogéneas. El problema de los modelos probabilísticos reside en la dificultad de tener una serie de movimientos en masa datados, a partir de la cual calcular la probabilidad. Son pocos los trabajos que han abordado este problema con series temporales suficientemente representativas. Entre ellos, caben citar los de Starkel (1966), Grove (1972), Jonson (1987), Kotarba (1988), van Steijn (1991), Corominas et al. (1992), Cendrero et al. 1994; González-Díez (1995), González-Díez et al. (1996, 1999).

Las técnicas que más frecuentemente se emplean en la caracterización temporal de los movimientos de ladera son: datación isotópica, dendrocronología, liquenometría y cronoestratigrafía (Anderson y Richards, 1987; Corominas y Moya, 1996). Para periodos recientes las más utilizadas son los fondos documentales y la interpretación de fotografías aéreas. Otras técnicas de teledetección, hoy por hoy, no ofrecen buenos resultados para movimientos en masa de pequeñas dimensiones; de la misma forma la interpretación de mapas antiguos no es útil para deslizamientos superficiales. Los procedimientos de datación aplicables varían pues, como es lógico, según el lapso temporal que se considere. La técnica consistente en interpretar imágenes fotográficas tomadas en distintos años es útil para conocer el intervalo de tiempo en el que se ha producido el movimiento, tal y como han hecho Brunsden y Jones (1976), van Westen (1993), González-Díez (1995), etc. Las principales ventajas de esta técnica son que suele haber cobertura total para todo el área de estudio y que generalmente existen fotogramas correspondientes a distintas fechas a bajo coste. Por ello, es posible hacer dataciones de todos los movimientos sin las carencias espaciales típicas de los fondos documentales, y a precios más económicos que las dataciones mediante otras técnicas. No obstante, esta técnica no puede aplicarse a movimientos anteriores a los años 50 y está sujeta a la disponibilidad de imágenes de distintas fechas. También está limitada por la escala y resolución de las imágenes. Por último, decir que mediante este procedimiento no es posible establecer una edad absoluta, sino encuadrar un

determinado movimiento en un intervalo temporal, determinado por la imagen en la que se identifica el deslizamiento y la imagen previa en la que no existe.

Aunque la técnica de fotointerpretación multitemporal ha sido aplicada por numerosos autores (van Westen, 1993; Luzi y Pergalani, 1996a; González-Díez, 1995; Díaz de Terán et al., 1998; Irigaray et al., 1999, etc.), no se ha encontrado en la literatura ejemplos de análisis de detalle realizados con un número tan grande de intervalos temporales como los que se presentan aquí. Así van Westen (1992a, 1993), en un estudio que utiliza los fotogramas correspondientes a tres vuelos, destaca lo tedioso del proceso, aparte de las dificultades que entraña una buena interpretación debido a los cambios en la cobertura vegetal y a las diferencias de calidad y escala de los fotogramas. Guzzetti et al. (1996), llevan a cabo una reconstrucción de sucesos de deslizamientos e inundaciones para un periodo de unos setenta años utilizando también la fotointerpretación multitemporal (aparte de otras técnicas), pero a una escala mucho más pequeña.

El procedimiento seguido para crear grupos espacio-temporales de deslizamientos ha sido básicamente el siguiente:

- primero se han interpretado todos los fotogramas correspondientes a los vuelos señalados en la Tabla 3.1.
- en segundo lugar, todos aquellos deslizamientos identificados en un determinado vuelo, fueron revisados en el vuelo precedente en el tiempo, con el objeto de conocer si eran anteriores o no. en algunos casos, en los que la imagen precedente ofrecía dudas, fue necesario comprobarlo en un tercer vuelo anterior.
- una vez identificados en cada vuelo los deslizamientos ocurridos con posterioridad al vuelo precedente, se procedió a su cartografía, con la ayuda de la ortofoto de 1993 y su correspondiente topografía 1:4.000 (ver Anexo I).



El resultado es un conjunto de siete mapas que ilustran la distribución espacial de los deslizamientos ocurridos en un intervalo de tiempo. Los intervalos de tiempo definidos son:

- hasta 1954-5 son deslizamientos con aspecto reciente (rasgos geomorfológicos muy frescos y prácticamente sin vegetación)
- 1954 – 1970
- 1970 – 1983
- 1983 – 1985
- 1985 – 1991
- 1991 – 1993
- 1993 – 1997

Además se han elaborado otros dos mapas que reflejan los deslizamientos identificados, tanto con criterios de fotointerpretación como de campo, en 1991 y 1997. En el primer caso, el trabajo de campo se realizó durante 1993; en el segundo en el periodo 1996-2000. Esto es, para esas fechas, se cuenta con una “doble cartografía”, una correspondiente a lo observable en las fotografías aéreas y otra que, además, incluye los movimientos visibles en el campo pero no en aquéllas. Así, la cartografía de 1991 incluye los deslizamientos previos a 1991 identificados con fotointerpretación y campo; el inventario de 1997, incluye los ocurridos entre 1991 y 1997 que han sido identificados de la misma forma. Estas dos cartografías han servido de base para distintos análisis, como más adelante se comenta.

En conjunto, los distintos inventarios realizados permiten llevar a cabo distintos análisis de susceptibilidad y validaciones, de cara a mejorar los mapas de amenazas, y analizar el proceso en relación con la evolución geomorfológica de la zona.

---

Por otra parte, las experiencias recientes en el uso de nuevos nucleidos cosmogénicos o producidos por el hombre, permiten explorar la posibilidad de datación de superficies



creadas como consecuencia de deslizamientos. En este trabajo se ha ensayado la aplicación del Cs-137 para la datación y estudio de la evolución de deslizamientos ocurridos en los últimos 50 años. Para ello y como paso previo, se requiere una precisa selección de los lugares y elementos datables (Schoeneich, 1991; Corominas et al., 1994).

El Cs-137 es un isótopo radiactivo presente en el ambiente y que procede, en su mayor parte, de las explosiones nucleares atmosféricas realizadas durante los años 50 y 60. Durante dichas explosiones, el cesio es inyectado a la estratosfera, donde se distribuye homogéneamente. Los posteriores intercambios verticales transportan el isótopo a la troposfera, a la misma latitud, desde donde se deposita en el suelo, tanto por vía seca como húmeda. La sedimentación del Cs-137 sobre la superficie del suelo se ha estudiado de forma experimental, de manera que existen modelos, tanto sobre la tasa de sedimentación a lo largo de los años, como de la distribución latitudinal de las mismas (Smith et al., 1999). Independientemente de tales modelos generales, la distribución espacial del Cs-137 depositado sobre la superficie depende fundamentalmente de las características climatológicas locales, estando relacionada directamente con el régimen de lluvias (Longmore, 1982).

La mayor parte del Cs-137 depositado sobre la superficie es absorbido fuertemente por intercambio iónico sobre las partículas del suelo y sobre todo por aquellas partículas de tamaño menor y que presentan una mayor superficie específica. Como consecuencia, tiende a estar distribuido en los primeros centímetros del terreno, en suelos que tienen una proporción importante de partículas de pequeño tamaño, como es el caso de los suelos arcillosos y limosos, y en los que contienen abundante materia orgánica. Por el contrario, en suelos arenosos el Cs-137 se distribuye hasta profundidades mayores, movido por la fracción coloidal y en suspensión por el agua (Arapis et al., 1997).

La cantidad de Cs-137 existente en un punto del terreno se ha utilizado para determinar la erosión que ha afectado a las capas superficiales en los últimos 50 años. De manera cualitativa, la erosión se determina comparando la cantidad total de cesio,



en un perfil vertical en un punto, con la existente en un punto sin perturbar. Para establecer una relación cuantitativa entre erosión y cantidad de cesio-137, se calcula la carga total de un determinado punto con respecto a otro de referencia y se utiliza después un modelo que describa la relación entre el tanto por ciento de pérdida de cesio y la tasa de erosión acontecida (Kachanoski y De Jong, 1984; Quine et al., 1994; Smith y Elder, 1999). Para ello, hay que partir de estudios experimentales, que dependen en gran medida del tipo de terreno, así como de consideraciones teóricas que tengan en cuenta el comportamiento del cesio en el suelo y la pérdida de éste por erosión.

Para este trabajo se ha elaborado (en colaboración con el grupo de Física Médica-Nuclear de la Universidad de Cantabria) un modelo que predice la distribución del Cs-137 en el interior del suelo (Soto et al., 1999; Soto et al., 2001). El modelo, desarrollado en una aplicación informática, simula el comportamiento del cesio teniendo en cuenta la tasa de sedimentación anual sobre la superficie, el transporte hacia los niveles inferiores, la desintegración radiactiva del isótopo y la tasa de erosión. Realizando una ligera modificación de dicho modelo se puede predecir la distribución de Cs-137 en distintos puntos de un deslizamiento, ya se trate de puntos no perturbados de la zona de cicatriz o de las zonas de acumulación. Los puntos no perturbados se corresponden con zonas sin erosión ni sedimentación. El valor de la sedimentación en la superficie, corregida a partir de la desintegración radiactiva, define la carga total en cualquier punto no perturbado y sirve de referencia a otros puntos próximos. Complementariamente, la evolución en el tiempo de la sedimentación de cesio sobre la superficie y el tipo de suelo definen la distribución del isótopo en profundidad.

Mediante el modelo mencionado se puede predecir la concentración de Cs-137 en el suelo en los puntos de cicatriz del deslizamiento. Para ello debe ajustarse la sedimentación del isótopo con la medida en el punto de referencia no perturbado. A continuación se simula el comportamiento del cesio en el terreno año tras año, comenzando en los años 50. Como consecuencia de las simulaciones anteriores se obtiene la carga total y el perfil de concentraciones de Cs-137 en un terreno denudado

por cualquier deslizamiento ocurrido con posterioridad a 1950. Cada simulación proporciona el valor teórico de la carga total depositada a partir de cualquier año sobre terreno inicialmente sin cesio, que puede ser comparada con la carga total media en un punto denudado por un deslizamiento. Comparando la carga media en un punto de la cicatriz con los calculados por las distintas simulaciones se puede calcular la fecha en la que ocurrió el deslizamiento.

Este método de datación de deslizamientos recientes tiene una sensibilidad variable, dependiendo de la edad real del deslizamiento. La sensibilidad teórica sería máxima para los deslizamientos ocurridos durante los años 60, en los que se produjo una mayor sedimentación de cesio, y menor en la actualidad.

Debido a que los deslizamientos, fundamentalmente cuando se trata de movimientos superficiales, implican el depósito de suelo superficial, con una cierta concentración de cesio, la carga total en las zonas de acumulación puede aumentar. Por el contrario, si lo que se acumula es material algo más profundo y por lo tanto sin ninguna concentración de cesio, la zona de acumulación puede tener una carga total inferior a la del punto de referencia. Este hecho implica la dificultad de aplicar el método en la zona de acumulación, pero, por otra parte, puede servir para reconstruir la dinámica del movimiento y su evolución.

La penetración del cesio en el suelo no suele superar los 60 cm de profundidad, de manera que en un suelo no perturbado las mayores concentraciones aparecen en los primeros centímetros superficiales, desde los que la concentración desciende progresivamente hasta que alcanza el límite de detección instrumental.

En cada punto del terreno las muestras se recogen mediante un saca-muestras de acero de 70 cm de longitud y 12 de diámetro, diseñado al efecto. El cilindro se introduce en el suelo lo máximo posible y después se extrae conteniendo el perfil completo del suelo. Una vez en el laboratorio, el perfil completo de cada punto se corta en láminas de 2,5 a 5 cm de espesor que se secan en estufa a 110° C durante 24 horas. Las láminas



se muelen y se tamizan con tamiz de 2 mm de diámetro de malla. Posteriormente se toman 50 g de muestra y se envasan en recipientes de plástico de 6 cm de diámetro. Las muestras preparadas se cierran herméticamente y se almacenan durante 30 días, para que se establezca el equilibrio radiactivo entre Ra-226, Rn-222 y los descendientes de vida media corta de este último. Las muestras preparadas se miden por espectrometría gamma utilizando un detector de semiconductor de Ge HP marca Canberra, mod. GR 2020-7500 SL de configuración vertical. El detector está unido mediante un “dedo frío” a un recipiente con nitrógeno líquido situado debajo. Igualmente, está colocado en el interior de un castillete de hierro de baja actividad y 10 cm de espesor, para disminuir la radiación externa. El detector está unido a una cadena electrónica Canberra compuesta por una fuente de alimentación de alta tensión, un preamplificador y un amplificador. Las señales procedentes de este último son recogidas por un analizador multicanal Accuspec/a, mod, 840632a, con tarjeta para ordenador. La cadena de espectrometría se encuentra en un laboratorio que se mantiene a una temperatura constante de 17° C. Para determinar la relación entre la altura de los impulsos recibidos y la energía de las radiaciones gamma correspondientes se han utilizado muestras radiactivas de baja actividad de distintos isótopos. La medida se realiza durante un intervalo de recuento de 8 horas por muestra. A partir de este recuento se obtiene el espectro de la muestra donde aparecen los fotopicos de los elementos radiactivos emisores gamma presentes. En el caso del Cs-137, los fotopicos corresponden a una energía de 0,661 Mev. La actividad de las muestras se determina a partir de los resultados del recuento del número de cuentas del isótopo en la energía citada, a lo que se resta el correspondiente al fondo, obteniéndose el número de cuentas efectivo. Este número se compara con el producido por unas muestras calibradas patrón y se obtiene la concentración en Bq/Kg.

La datación por medio de Cs-137 se ha aplicado en este trabajo con una doble finalidad. Por un lado, determinar las posibilidades que el método ofrece para la datación de deslizamientos recientes; por otro lado, para intentar obtener un elemento de contrastación de las edades obtenidas por fotointerpretación, al igual que se ha

hecho con los datos obtenidos de fuentes documentales o por entrevistas con los lugareños.

### 3.2.3 Técnicas de análisis de la susceptibilidad

El análisis de la susceptibilidad del terreno a experimentar deslizamientos se ha llevado a cabo utilizando dos conjuntos de técnicas matemáticas: Funciones de Favorabilidad y Análisis Discriminante.

Las Funciones de Favorabilidad (FF), más que una técnica singular de análisis de datos, constituyen un marco matemático para la elaboración de modelos predictivos a partir de datos espaciales, en el que hay cabida para numerosas técnicas matemáticas; son funciones que transforman información de carácter espacial en valores de favorabilidad (en el caso que nos ocupa, de “favorabilidad para que el terreno se deslice”). Por ello, debería hablarse de modelos predictivos o modelos de susceptibilidad mediante Funciones de Favorabilidad. Por el contrario, el Análisis Discriminante (AD) es una de las técnicas convencionales de análisis multivariable.

Ambos métodos analíticos, aplicados al análisis cartográfico, constituyen dos tipos de técnicas diferentes de lo que en general se denomina Análisis de Datos Espaciales (Spatial Data Análisis, SDA). El Análisis de Datos Espaciales se refiere a un proceso por medio del cual se pretende alcanzar una comprensión del significado de la distribución espacial de una o varias clases de datos en relación a otros; es decir, interpretar las relaciones existentes entre datos de distinta naturaleza para la comprensión de un determinado proceso o mecanismo. Debido a la complejidad de la naturaleza, tendemos a usar el sentido común y la experiencia para simplificar la realidad, de manera que sólo analizamos conscientemente un número manejable de datos. Sin embargo, mediante técnicas matemáticas y herramientas adecuadas, es



posible establecer relaciones más complejas y clarificadoras entre los datos espaciales que se relacionan con el problema objeto de estudio.

Puesto que lo que se pretende es estudiar la interacción y dependencia de todo el conjunto de parámetros simultáneamente, para establecer las implicaciones sobre la estabilidad de las laderas, dichas técnicas deben adaptarse a la naturaleza cuantitativa y cualitativa de los datos con los que se va a trabajar, así como a su distribución espacial; todo ello en relación con el objetivo del análisis, por lo que debe basarse en unos eventos (los deslizamientos ya ocurridos).

En los dos apartados siguientes se describen los dos grupos de técnicas indicados, seguidos por una breve recapitulación en la que se resumen, de manera comparativa, las características principales de ambos métodos.

### ***3.2.3.1 Funciones de Favorabilidad***

Para elaborar un modelo que represente los lugares donde ocurrirán deslizamientos en el futuro, se parte de la siguiente proposición: *Dado un conjunto de factores condicionantes con una determinada distribución espacial, se pretende saber si un punto concreto del espacio (celda o pixel) se deslizará o no en el futuro.* Esta proposición, en adelante, se denominará proposición inicial o de partida y se puede denotar de la siguiente forma:

$F_p$  : “ $p$  quedará afectado en el futuro por un determinado tipo de movimiento en masa”.

El concepto básico del procedimiento mediante funciones de favorabilidad, es que el modelo predictivo puede calcularse a partir de una función matemática que refleje el objetivo de la proposición inicial (chung y fabbri, 1993). Para ello, hay que hacer dos suposiciones:

- Los factores condicionantes del tipo de movimiento objeto de estudio, son conocidos y pueden emplearse en el análisis.
- Los deslizamientos de un mismo tipo ocurrirán en el futuro en circunstancias similares a como lo han hecho en el pasado y en la actualidad.

Las variables que condicionan la aparición de los deslizamientos son de distinta naturaleza, fundamentalmente cuantitativas o numéricas (aproximadamente continuas) y cualitativas o categóricas. Desde un punto de vista espacial, también pueden ser continuas, discretas, areales, lineales o puntuales. Para que estas variables heterogéneas puedan ser tratadas matemáticamente es preciso que todas ellas estén representadas por valores numéricos por medio de los cuales puedan ser comparadas, y al final integrarse en un mapa también numérico. En este orden de cosas, una solución al problema consiste en transformar mediante una función las variables, tanto cuantitativas como cualitativas, en otras que expresen la posibilidad, probabilidad, certidumbre, etc. de que la proposición inicial se cumpla. Esta función de transformación de las variables es lo que se denomina *Función de Favorabilidad*. Así, por ejemplo, un mapa de categorías litológicas quedará transformado en un mapa de valores de susceptibilidad de las distintas litologías para la génesis de deslizamientos (por ejemplo, la categoría margas estratificadas, se transforma en la unidad 0,3 de probabilidad; dicho de otra manera, esta unidad tendría el 30% de probabilidad de que en ella ocurra un deslizamiento). No obstante, estos valores no deben entenderse como valores de probabilidad absoluta, sino como una estimación de esa probabilidad. Así, una variable continua que está comprendida en un intervalo cerrado  $[min,max]$  se transforma en otra variable, también continua, dentro de otro intervalo cerrado comprendido entre los valores  $[a,b]$ .

$[min, max] \rightarrow [a,b]$  si la variable es continua

En el caso de una variable categórica con “ $m$ ” categorías  $\{1,2,3,\dots,m\}$  también se transforma en una nueva variable que tiene los mismos límites que la anterior ( $[a,b]$ ; equivale, por ejemplo a  $[0,1]$ ).



$\{1,2,3,\dots,m\} \rightarrow [a,b]$  si la variable es categórica

$[a,b]$  representa una estimación de la *posibilidad* (probabilidad, certidumbre, pertenencia difusa, etc.) de que la proposición inicial, o de partida, sea cierta o que se cumplirá (es decir, de que en ese pixel [celda] concreto ocurra un deslizamiento en el futuro); la probabilidad, certidumbre, pertenencia difusa, etc. son, por tanto, diferentes interpretaciones de las *Funciones de Favorabilidad*.

La estimación de esa *posibilidad* puede realizarse por medio de lo que se conoce como análisis bivariable, consistente en poner de manifiesto las relaciones existentes de los deslizamientos ya ocurridos con cada uno de los parámetros (variables) que controlan su aparición. Así, los valores de favorabilidad se calculan mediante la combinación, por análisis bivariable, de cada una de las variables con el mapa de deslizamientos. Estos *valores de favorabilidad* se pueden estimar mediante la siguiente función (Chung y Fabbri, 1993):

$$VF = 1 - \left( 1 - \frac{1}{\text{área de la unidad}} \right) \text{área unidad afectada por deslizamientos}$$

donde, VF = Valor de favorabilidad

De esta forma se obtienen unas tablas (Tabla 3.2), tantas como variables consideradas, en las que se describen los *valores de favorabilidad* para cada una de las unidades de cada variable. Estos valores de cada variable están definidos dentro de un intervalo que es común para todas ellas, lo que permite su posterior integración. En este momento, se dispone ya de *valores de favorabilidad* (o lo que es lo mismo, de susceptibilidad) para cada una de las variables.



Tabla 3.2. Ejemplo de tabla de valores de favorabilidad para 5 variables: DEM, ORIENT, PEND, LITO, VEGE. Valores calculados para toda la zona del Bajo Deba

Nº de deslizamientos = 454

Probabilidad *a priori* de encontrar un deslizamiento en el área de estudio = 0,0003

### DEM

ID	clase	nº celdas	nº deslizam	Valor Favorabilidad
0	1	733405	342	0.000466318
1	2	598040	110	0.000183934
2	3	60803	2	3.28931e-005

### ORIENT

ID	clase	nº celdas	nº deslizam	Valor Favorabilidad
0	8	175044	52	0.000297068
1	1	158289	37	0.00023375
2	2	224806	59	0.000262449
3	6	211852	70	0.000330419
4	5	136600	43	0.000314788
5	4	152107	59	0.000387885
6	9	20638	3	0.000145363
7	3	166591	63	0.000378172
8	7	146321	68	0.000464732

### PEND

ID	clase	nº celdas	nº deslizam	Valor Favorabilidad
0	1	87274	5	5.72908e-005
1	2	251029	68	0.000270885
2	3	473258	182	0.000384568
3	4	427910	165	0.000385595
4	5	130217	31	0.000238064
5	6	19413	2	0.000103024
6	7	2602	1	0.00038432
7	8	479	0	2.08768e-005
8	9	60	0	0.000166667
9	10	6	0	0.00166667



**LITO**

<u>ID</u>	<u>clase</u>	<u>n° celdas</u>	<u>n° deslizam</u>	<u>Valor Favorabilidad</u>
0	7	256494	66	0.000257316
1	24	9275	2	0.000215633
2	2	76475	62	0.000810722
3	1	154627	102	0.000659652
4	20	260	0	3.84615e-005
5	4	16089	14	0.00087016
6	18	7954	3	0.000377169
7	15	332	0	3.01205e-005
8	22	24201	9	0.000371885
9	19	26127	3	0.000114824
10	5	276844	114	0.000411784
11	12	12717	17	0.00133679
12	11	17811	8	0.000449161
13	8	210027	7	3.3329e-005
14	23	1986	0	5.03525e-006
15	16	316	0	3.16456e-005
16	6	13006	4	0.00030755
17	25	11897	2	0.00016811
18	9	109615	14	0.00012772
19	3	2356	0	4.24448e-006
20	10	12883	1	7.76217e-005
21	14	113086	26	0.000229914
22	17	9437	0	1.05966e-006
23	21	1759	0	5.68505e-006
24	26	2425	0	4.12371e-006
25	13	24249	0	4.12388e-007

**VEGE**

<u>ID</u>	<u>clase</u>	<u>n° celdas</u>	<u>n° deslizam</u>	<u>Valor Favorabilidad</u>
0	7	83731	3	3.5829e-005
1	5	83438	18	0.000215729
2	4	622161	130	0.000208949
3	6	359660	284	0.000789635
4	3	36703	0	2.72457e-007
5	2	139873	16	0.000114389
6	1	66682	3	4.49897e-005

Los *valores de favorabilidad* existentes en cada celda deberán ser integrados posteriormente, de acuerdo con una determinada regla de integración o *Función de Favorabilidad* (en adelante FF), dependiendo de la técnica matemática que se emplee.

Los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos realizados mediante el empleo de las FF expresaran, por tanto, la probabilidad, la certidumbre, posibilidad, etc. de que en un determinado lugar del espacio ocurra un deslizamiento en el futuro, dependiendo de la interpretación de las *Funciones de Favorabilidad* que se haga. Estos mapas, pues, clasifican el territorio analizado según clases de valor relativo en función de la “propensión” de ese territorio a sufrir deslizamientos.

Para aplicar la idea de las *Funciones de Favorabilidad* a la generación de modelos predictivos, se pueden utilizar, al menos, tres teorías matemáticas (Chung y Fabbri, 1993): la teoría de probabilidades, la teoría de conjuntos difusos y la teoría evidencial. En este trabajo sólo se aplican las dos primeras. El desarrollo matemático que se presenta a continuación está basado en los trabajos de Chung y Fabbri (1993, 1998, 1999a, b y 2000).

### *Las FF en el marco de la teoría de probabilidades*

En los modelos probabilísticos para la predicción de los futuros movimientos en masa, la probabilidad espacial (susceptibilidad) en cada punto del espacio (o en cada celda o pixel) es considerada como la *probabilidad condicionada* de que el punto sea afectado por un deslizamiento en el futuro, dado (condicionado a) la información espacial que existe sobre ese punto.

La probabilidad de encontrar un deslizamiento en el futuro, independientemente de la información espacial de los factores causales se suele denominar *probabilidad “a priori”* y se obtiene mediante la siguiente expresión:



$$Prob\{Fp\} = \frac{\text{área de } F}{\text{área de } A} \quad (1)$$

donde:

$Prob\{Fp\}$  : es la probabilidad *a priori* de que un pixel  $p$  quede afectado por un deslizamiento en el futuro. Por lo tanto, todos los pixels del área de estudio tendrán el mismo valor.

$F$  : serán las áreas, dentro del área de estudio, afectadas por deslizamientos en el futuro.

$A$  : Área de estudio.

Sin embargo, el objetivo de la modelización mediante técnicas de análisis de datos espaciales es conocer cómo varía la probabilidad en cada pixel en relación con los valores de las variables que concurren en el mismo.

Supongamos que se dispone de  $m$  mapas temáticos correspondientes a diferentes variables “ $v$ ”, representativas de otros tantos factores condicionantes que están relacionados con la ocurrencia de deslizamientos. Cada pixel “ $p$ ” dentro del área de estudio vendrá caracterizado por una serie de valores “ $c$ ”, tantos como mapas temáticos se tengan:

$$v_1(p) = c_1, \quad v_2(p) = c_2, \quad \dots, \quad v_m(p) = c_m$$

El problema de la predicción puede resolverse agregando todos los “ $m$ ” valores correspondientes a cada pixel dentro de la zona de estudio mediante una función que describa el grado de apoyo a la condición de que el pixel quede afectado por un futuro deslizamiento.

En el píxel  $p$ , el valor  $v_1(p)$ , derivado del primer mapa, es  $c_1$ , que corresponde a una de las  $n_1$  clases (unidades del mapa),  $\{1, 2, \dots, n_1\}$ . Se puede considerar al conjunto de los píxels cuyo valor para el primer mapa es  $c_1$ , como la unidad temática del primer mapa cuyo valor es  $c_1$  y lo denotamos  $A_{1c_1}$ , siendo una de las subáreas  $n_1 \{A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n_1}\}$  que no se superponen en el mapa. De igual forma,  $A_{2c_2}$  sería la unidad para el mapa segundo. Finalmente se tendrán  $m$  clases temáticas  $A_{1c_1}, \dots, A_{mc_m}$ , una para cada mapa, que corresponden con los  $m$  valores de píxel  $v_1(p) = c_1, \dots, v_m(p)$  que se producen para cada píxel en el cruce de mapas.

A modo de ejemplo podemos suponer una situación en la cual el análisis se realiza utilizando solamente dos mapas temáticos ( $m = 2$ ), con tres y cuatro clases, respectivamente:

1. Litología (calizas masivas, flysch calcáreo, areniscas estratificadas;  $n_1 = 3$ ).
2. Pendiente (1:  $< 15^\circ$ ; 2:  $15^\circ-25^\circ$ ; 3:  $25^\circ-35^\circ$ ; 4:  $> 35^\circ$ ;  $n_2 = 4$ ).

Un píxel con calizas masivas y pendiente superior a  $35^\circ$ , tendrá  $c_1 = \text{calizas}$  y  $c_2 = > 35^\circ$ . Evidentemente, cada píxel vendrá denotado por dos valores, uno para cada mapa utilizado. Todos los píxels con  $c_1 = \text{calizas}$  constituyen la clase  $A_{1c_1}$ ; es decir el valor  $c_1$  del mapa correspondiente a la variable 1.

### *Función Condicionada de Probabilidad*

Por consiguiente, una posibilidad consiste en considerar que la susceptibilidad en cada píxel se exprese como la *probabilidad condicionada* de que un píxel “ $p$ ” quede afectado por un deslizamiento en el futuro, suponiendo que “ $p$ ” tiene  $m$  valores ( $c_1, c_2, \dots, c_m$ ). Esto es:

$$\text{Prob}\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$$

Entonces, la probabilidad condicionada conjunta en un píxel vendría dada por:



$$Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \frac{\bigcap_{k=1}^m (F \cap A_{kc_k})}{\bigcap_{k=1}^m A_{kc_k}} \quad (2)$$

donde:

$\bigcap_{k=1}^m A_{kc_k}$  es la subárea de condición única formada por todas las celdas que tienen una particular y exclusiva combinación de m valores  $(c_1, c_2, \dots, c_m)$ ; por ejemplo calizas y pendientes  $> 35^\circ$ ; y

$\bigcap_{k=1}^m (F \cap A_{kc_k})$  denota el área desconocida que quedará afectada por deslizamientos en el futuro, dentro de la unidad de condición única.

Cuando  $Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$  es aproximadamente similar a la probabilidad “*a priori*”,  $Prob\{Fp\}$ , puede decirse que los valores en el pixel,  $(c_1, c_2, \dots, c_m)$ , no añaden ninguna información útil para dilucidar si el pixel va a quedar afectado por un deslizamiento o no. Sin embargo, tanto si  $Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$  es mucho mayor que  $Prob\{Fp\}$ , como si es mucho menor, los valores  $c_1, c_2, \dots, c_m$  proporcionan información muy significativa, estando altamente correlacionadas, positiva o negativamente, con la susceptibilidad a los deslizamientos. En las celdas con  $Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$  mucho mayor que  $Prob\{Fp\}$  es mucho más probable que se produzcan deslizamientos que en las celdas con otros valores. De igual forma, es improbable que las celdas cuyos valores  $Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$  sean mucho menores que  $Prob\{Fp\}$  queden afectadas por deslizamientos futuros. Una implicación de esto es que, es más importante el valor relativo entre  $Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$  y  $Prob\{Fp\}$  que las probabilidades en sí. Además, ya que ambas probabilidades llevan implícito el área “desconocida” que se moverá en el futuro, sería imposible calcular ambas probabilidades sin ningún tipo de suposición con respecto a lo pueda ocurrir en el futuro. Por ello, la relación entre los dos valores de probabilidad puede solventar, en parte, esta dificultad.

Para estimar las *probabilidades “a priori”* y *condicionada* ( $Prob\{Fp\}$  y  $Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$ ), se introduce el concepto de “pixel que ha sido afectado por deslizamientos en el pasado” ( $Sp$ ), con el que sustituimos al pixel que será afectado por deslizamientos en el futuro ( $Fp$ ). Por lo tanto, la expresión (2) se convierte en:

$$Prob\{Sp | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \frac{\bigcap_{k=1}^m (S \cap A_{kc_k})}{\bigcap_{k=1}^m A_{kc_k}} \quad (3)$$

donde,  $S$  representa las áreas, dentro del área de estudio, afectadas por deslizamientos en el pasado.

La forma más simple de estimar *la probabilidad condicionada* consistiría en calcular  $Prob\{Sp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$  en vez de  $Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$ , basándonos en la hipótesis de que:

$$Prob\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\} \cong Prob\{Sp | c_1, c_2, \dots, c_m\}$$

Esta es, evidentemente, la expresión matemática de la hipótesis de partida, que supone que los deslizamientos futuros dependen de los mismos factores que los pasados y, por lo tanto, que el análisis de la ocurrencia de éstos puede utilizarse para predecir aquéllos. Naturalmente, como cualquier hipótesis, deberá ser contrastada por medio de procedimientos de validación independiente. Un razonamiento análogo al que se acaba de presentar puede utilizarse en relación con otras aproximaciones, tales como la *relación de probabilidades*, los *pesos de evidencia* y el *factor de certidumbre*, que se describen más adelante.

Estos estimadores son relativamente sencillos de calcular y son los que mejor reflejan lo que ha sucedido en el pasado, pero eso no significa necesariamente que sirvan para predecir bien las ocurrencias futuras. Por ello no deben utilizarse como indicadores de



predicción, sino de referencia acerca de las posibilidades teóricas de predicción de los factores causales.

Otro estimador que puede utilizarse, en principio más adecuado, es el basado en el Teorema de Bayes (Wentzel y Owtscharow, 1978), bajo la condición de independencia condicional (no simplemente independencia). A partir de las reglas de Bayes, la *probabilidad condicionada* (2) puede representarse de la siguiente forma:

$$Pr ob\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \frac{Pr ob\{F_p\} Pr ob\{c_1, c_2, \dots, c_m | F_p\}}{Pr ob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}} \quad (4)$$

Si suponemos que  $c_1, c_2, \dots, c_m$  son variables independientes, dada la condición  $F_p$  (que la celda quede afectada por un deslizamiento en el futuro), entonces:

$$Pr ob\{c_1, c_2, \dots, c_m | F_p\} = Pr ob\{c_1 | F_p\} Pr ob\{c_2 | F_p\} \dots Pr ob\{c_m | F_p\} \quad (5)$$

$Pr ob\{c_1, c_2, \dots, c_m | F_p\}$  = Probabilidad de que exista la unidad de condición única representada por esa combinación de variables en un píxel en el que tenga lugar un deslizamiento futuro.

$Pr ob\{c_1 | F_p\}$  = Probabilidad de encontrar la clase  $c_1$  del mapa 1, en un píxel en el que aparezca un deslizamiento en el futuro.

Donde  $c_1, c_2$ , etc. de la parte derecha deben entenderse como eventos en los que el píxel  $p$  tienen el valor  $c_k$  en el mapa  $k$  (hasta  $m$ ). Por consiguiente, bajo la condición de independencia entre las variables, la probabilidad condicionada conjunta en (4) es:

$$Pr ob\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \frac{Pr ob\{F_p\} Pr ob\{c_1 | F_p\} Pr ob\{c_2 | F_p\} \dots Pr ob\{c_m | F_p\}}{Pr ob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}}$$



$$= \frac{Prob\{c_1\} \dots Prob\{c_m\}}{Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}} Prob\{F_p\} \frac{Prob\{F_p | c_1\}}{Prob\{F_p\}} \dots \frac{Prob\{F_p | c_m\}}{Prob\{F_p\}} \quad (6)$$

Si se acepta la condición de independencia en (5), la probabilidad condicionada en (4) puede expresarse por medio de tres componentes como se muestra a continuación:

*PRIMER COMPONENTE:*

$Prob\{c_1\}$ ,  $Prob\{c_2\}$ ,  $Prob\{c_m\}$  y  $Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  son las probabilidades de las variables espaciales.

$Prob\{c_1\}$ ,  $Prob\{c_2\}$ ,  $Prob\{c_m\}$  son las probabilidades de encontrar una determinada unidad de una variable (por ejemplo: calizas, 25°-35°).

$Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  probabilidad de encontrar una combinación particular (condición única) de variables (por ejemplo: calizas, 25°-35°).

Para entender mejor el primer grupo de componentes hay que suponer que los valores de las distintas variables que concurren en un pixel son estadísticamente independientes. Es decir: el hecho de que un pixel pertenezca a una determinada unidad de una determinada variable es independiente de que en el mismo pixel exista una unidad particular de otra variable. En tal caso  $Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m\} = Prob\{c_1\} \cdot Prob\{c_2\} \dots Prob\{c_m\}$  y por lo tanto,

$$\frac{Prob\{c_1\} \dots Prob\{c_m\}}{Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}} = 1$$

Desde un punto de vista espacial, la independencia se traduce en que los mapas son estadísticamente independientes, lo que supone que las distintas unidades de que están constituidos cada mapa no tienen estadísticamente ninguna relación. En este sentido, la



distribución de las unidades en cada mapa debería tener una distribución espacial no determinada por las distribuciones de unidades en otros mapas (“aleatoria”). Lo único que tendrían en común los distintos mapas sería la georeferencia o posición espacial que en este caso sería el pixel.

Esta suposición de independencia no es realista y estrictamente hablando no debería hacerse. Es evidente, por ejemplo, que hay una cierta dependencia entre litología, vegetación y pendiente. Si, por el contrario, se considera que las variables son totalmente dependientes y, por lo tanto, totalmente correlacionadas:

$$\frac{Prob\{c_1\} \dots Prob\{c_m\}}{Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}} = \text{prácticamente } 0$$

por lo que (6) resulta cercano a cero. Naturalmente, el valor real de esa relación estará en algún punto intermedio entre los extremos 0-1 indicados.

$Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  equivale a las clases, unidades o subáreas de condición única. Estas unidades representan una única combinación (condición única) de las unidades/clases de cada una de las variables utilizadas. La utilización de clases de condición única permite reducir enormemente el número de unidades de análisis, sin pérdida de información y, por tanto, facilitando el cálculo. Así por ejemplo, del millón y medio de celdas de que consta el área de estudio del Bajo Deva, se pasa a menos de treinta mil unidades de condición única, en el caso de las cinco variables más significativas. En la Tabla 3.3, se muestra un ejemplo de unidades de condición única generadas a partir del cruce de 6 variables categorizadas.

Tabla 3.3. Ejemplo de una tabla de unidades de condición única elaborada para una zona en torno a la localidad de Itziar (municipio de Deba, Guipúzcoa), con un tamaño de celdas de 15 x 15. Los mapas temáticos cruzados han sido DEM, ORIENT, PEND, ESPE, LITO y VEGE (los números de las variables en la tabla corresponden con los códigos del banco de datos).

Nº de filas = 347

Nº de columnas = 203

Nº de unidades de condición única = 3168

Nº de celdas del área de estudio = 70431

ID	Nº celdas	DEM	ORIENT	PEND	ESPE	LITO	VEGE
1	7	1	1	1	1	2	7
2	8	1	2	1	1	2	7
3	18	1	8	1	1	2	7
4	14	1	8	2	1	2	7
5	305	1	8	3	4	2	6
6	43	1	8	4	4	2	6
7	84	1	1	3	4	2	6
8	296	1	1	2	4	2	6
9	156	1	2	3	4	2	6
10	689	1	8	2	4	2	6
11	146	1	8	1	4	2	6
12	302	1	7	3	4	2	6
13	25	1	7	4	4	2	6
14	688	1	7	2	4	2	6
15	259	1	7	2	3	2	6
16	209	1	7	1	3	2	6
17	47	1	4	1	3	2	6
18	21	1	4	2	3	2	4
19	20	1	4	3	3	2	4
20	31	1	4	4	4	2	4
...	...	...	...	...	...	...	...
3156	1	3	8	2	1	8	4
3157	1	3	2	2	1	8	4
3158	1	3	2	2	4	16	2
3159	1	3	8	2	4	6	2
3160	1	2	1	2	3	8	4
3161	1	2	1	1	3	8	4
3162	1	2	8	1	3	8	4
3163	1	2	6	1	1	8	6
3164	2	2	5	1	1	8	6
3165	2	2	7	3	2	8	2
3166	1	2	7	4	2	8	2
3167	2	2	7	2	4	5	2
3168	2	1	2	3	4	22	4



*SEGUNDO COMPONENTE:*

$Prob\{F_p\}$  es la probabilidad de que una celda o pixel quede afectado en el futuro por un deslizamiento, sin considerar (a priori) ninguna evidencia; sería equivalente a la probabilidad de encontrar en el futuro un deslizamiento en el área de estudio sin considerar ningún factor causal. Por ello, a esta probabilidad se le denomina *probabilidad “a priori”*.

La segunda componente no depende ni de la localización del pixel ni de las unidades de las distintas variables que concurren en el mismo; todos los pixels (todo el área de estudio) tienen el mismo valor de probabilidad. El único problema de este multiplicando reside en el hecho de que se calcula a partir de lo que ha sucedido en el pasado, si bien mediante criterio experto es posible hacer suposiciones sobre lo que puede suceder en el futuro. Si se considera sólo la diferencia relativa entre los distintos valores de los pixels, *la probabilidad “a priori”* no es un factor que introduzca cambios en los resultados.

*TERCER COMPONENTE:*

$Prob\{F_p|c_1\}$ ,  $Prob\{F_p|c_2\}$ , ...,  $Prob\{F_p|c_m\}$ , la probabilidad de encontrar un deslizamiento en el futuro dado que (condicionado por) en el pixel la variable  $c_k$  (de 1 a  $m$  factores causales) corresponde a una determinada unidad de las que constituyen la variable. Por lo tanto, es un reflejo de la contribución de una determinada unidad de una variable a que en el pixel ocurra un deslizamiento en el futuro. El cálculo de esta probabilidad se estima mediante las relaciones bivariantes.

El tercer componente es el que muestra las implicaciones de cada una de las  $m$  variables en el modelo predictivo. Si las áreas que quedarán afectadas por deslizamientos en el futuro fueran conocidas, la probabilidad bivariable condicionada se obtendría de la siguiente forma:

$$Prob\{F_p | c_k\} = \text{área de } F \cap A_{k,c_k} / \text{área de } A_{k,c_k} \quad (7)$$

siendo  $A_{k,c_k}$  la subárea ocupada por una unidad  $c_k$  correspondiente a la capa  $k$  (de 1 a  $m$ ).

Si suponemos que  $Prob\{F_p | c_k\} > Prob\{F_p\}$ ,

$$\frac{Prob\{F_p | c_k\}}{Prob\{F_p\}} > 1$$

Entonces, puede considerarse que la unidad de la capa que existe en el pixel ( $A_{k,c_k}$ ) es propensa a que suceda un deslizamiento en el futuro. En caso contrario la probabilidad condicionada bivariable sería menor que 1. Este argumento es aplicable a cada uno de los  $m$  factores correspondientes al tercer multiplicando. No obstante, como no se conoce  $F$  (áreas que quedarán afectadas por deslizamientos en el futuro), no es posible calcular las dos probabilidades  $Prob\{F_p | c_k\}$  y  $Prob\{F_p\}$ . Sin embargo, se puede sustituir tales probabilidades desconocidas por  $Prob\{S_p | c_k\}$  y  $Prob\{S_p\}$ , es decir, por las calculadas a partir de lo sucedido en el pasado (deslizamientos ya ocurridos).

$$Prob\{S_p | c_k\} = \text{área de } S \cap A_{k,c_k} / \text{área de } A_{k,c_k} \quad (8)$$

Aunque este estimador es una de las técnicas más utilizadas -tal vez la que más- para integrar datos espaciales (Agterberg et al., 1990; Bonham-Carter, 1991; Aspinall, 1992; Chung y Fabbri, 1998, Remondo et al., 1998), puede no ser el más adecuado para las predicciones sobre el futuro, puesto que su cálculo está basado en la suposición de independencia entre variables. Las ventajas de este estimador residen en la sencillez de su cálculo, y en que depende exclusivamente de las probabilidades condicionadas bivariables entre las variables utilizadas y las ocurrencias de deslizamientos pasados.



*Función de relación de probabilidades y sus funciones monótonas derivadas.*

Si se divide el área de estudio en dos subáreas,  $F$  (área que quedará afectada por deslizamientos en el futuro; en un periodo determinado) y  $\bar{F}$  (el resto del área de estudio; la que permanecerá estable). En vez de utilizar la *función de probabilidad condicionada*, se puede suponer que la susceptibilidad en un punto del espacio (celda o pixel) quede definida por la siguiente *relación de probabilidades*:

$$\lambda = \frac{\text{Prob}\{c_1, c_2, \dots, c_m | F_p\}}{\text{Prob}\{c_1, c_2, \dots, c_m | \bar{F}_p\}} \quad (9)$$

Este mismo tipo de función se utiliza en técnicas de tratamiento de imágenes para hacer clasificaciones mediante análisis discriminante.

Si los valores asociados a la celda,  $c_1, c_2, \dots, c_m$ , proporcionan información útil para identificar las áreas que posiblemente queden afectadas por deslizamientos en el futuro, la  $\text{Prob}\{c_1, c_2, \dots, c_m | F_p\}$  (probabilidad de que la celda tenga los “m” valores, suponiendo que la celda quedará afectada por deslizamientos) debería ser mucho mayor que  $\text{Prob}\{c_1, c_2, \dots, c_m | \bar{F}_p\}$  (Probabilidad de que la celda tenga los mismos valores, suponiendo que no quedará afectada por deslizamientos). Por lo tanto,  $\lambda$ , tomará valores entre 0 e  $\infty$ .

Utilizando la fórmula de Bayes, se puede relacionar la *función de relación de probabilidades* y la de *probabilidad condicionada*, de la siguiente forma:

$$\text{Prob}\{c_1, c_2, \dots, c_m | F_p\} = \frac{\text{Prob}\{c_1, c_2, \dots, c_m\} \text{Prob}\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\}}{\text{Prob}\{F_p\}} \quad (10)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en (9), la *relación de probabilidades* se convierte en una función que relaciona la *probabilidad condicionada* y la *probabilidad “a priori”*:

$$\lambda = \frac{Prob\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\}}{Prob\{F_p\}} \frac{1 - Prob\{F_p\}}{1 - Prob\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\}} \quad (11)$$

$\lambda$  representa la diferencia relativa entre la probabilidad condicionada conjunta y la probabilidad a priori, y no simplemente una relación. Por esta razón, la *relación de probabilidades* se viene usando para representar el conocimiento en los sistemas de inteligencia artificial.

$\lambda$ , o cualquier función monótona no decreciente de  $\lambda$ , se pueden utilizar como buenos indicadores de la susceptibilidad. La función monótona más simple utilizada para conocer la susceptibilidad en cada punto es el logaritmo de la *relación de probabilidades*:

$$WoE\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \log_e \lambda \quad (12)$$

Esta función normalmente se denomina *Pesos de Evidencia* -"Weights of Evidence", en inglés- (Agterberg et al., 1990; Bonham-Carter, 1991); sus valores oscilan entre  $-\infty$  e  $\infty$ .

Otra función monótona es el *Factor de Certidumbre* ("Certainty Factor", CF); introducido por Shortliffe y Buchanan (1975), como un modelo para representar evidencias en medicina, y posteriormente modificado por Heckerman (1986). Chung y Fabbri (1998) adaptaron el método para la cartografía de amenazas por deslizamientos en el entorno de un SIG. Una de las posibles definiciones del CF es la siguiente:

$$CF\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \quad (13)$$

El CF representa la posibilidad de que la celda (o el pixel p) quede afectada por un deslizamiento futuro, dado que en ella se combinan  $c_1, c_2, \dots, c_m$  valores. Sus valores oscilan entre  $-1$  (certidumbre absoluta de que no ocurrirá un deslizamiento) y  $1$  (certidumbre absoluta de que sí ocurrirá). De acuerdo con esta definición, el CF es igual a 0 cuando la probabilidad condicionada es igual a la probabilidad *a priori*, y se



incrementa a medida que la probabilidad condicionada se aleja de la probabilidad a priori. Por ello, el CF es sólo una medida de la certeza con respecto a la probabilidad *a priori*.

Para calcular la relación de probabilidades y sus funciones monótonas, además de la condición de independencia supuesta anteriormente, hay que hacer otra suposición consistente en que:

$$Prob\{c_1, c_2, \dots, c_m | \overline{F_p}\} = Prob\{c_1 | \overline{F}\} Prob\{c_2 | \overline{F_p}\} \dots Prob\{c_m | \overline{F_p}\}$$

siendo,  $\overline{F_p}$  el área que no quedará afectada por deslizamientos en el futuro.

Entonces la relación de posibilidad en (9) queda:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdots \lambda_m \quad (14)$$

donde,

$$\lambda_k = \frac{Prob\{c_k | \overline{F_p}\}}{Prob\{c_k | F_p\}} = \frac{Prob\{F_p | c_k\}}{Prob\{F_p\}} \frac{1 - Prob\{F_p\}}{1 - Prob\{F_p | c_k\}}$$

Utilizando los deslizamientos ocurridos en el pasado, se obtiene un valor de posibilidad ( $\lambda_k$ ) para cada variable o mapa ( $k$ ) y entonces:

$$\lambda_k^* = \frac{Prob\{S_p | c_k\}}{Prob\{S_p\}} \frac{1 - Prob\{S_p\}}{1 - Prob\{S_p | c_k\}}$$

El estimador de Bayes se puede aplicar a las expresiones (11), (12) y (13) para obtener, respectivamente, la *relación de probabilidades*, la *función de pesos de evidencia* y el *factor de certidumbre*, de la siguiente forma:



$$\lambda^* = \lambda_1^* \cdot \lambda_2^* \dots \lambda_m^* \quad (15)$$

$$WoE^* \{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \log_e \lambda^* \quad (16)$$

$$CF^* \{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = (\lambda^* - 1) / (\lambda^* + 1) \quad (17)$$

Las ventajas de tales estimadores residen nuevamente en que su cálculo depende solamente de la probabilidad condicionada bivariable entre los deslizamientos ya ocurridos y los distintos valores de las variables que concurren en el pixel.

El CF puede también calcularse mediante un procedimiento que consta de dos fases:

1ª Cálculo de los CF para cada una de las variables  $(1, 2, \dots, m)$ , mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Si } C_p \geq P_p \text{ entonces } \frac{C_p - P_p}{C_p (1 - P_p)}$$

$$\text{Si } C_p < P_p \text{ entonces } \frac{C_p - P_p}{P_p (1 - C_p)}$$

Siendo  $C_p$ : la probabilidad condicionada a la existencia de una determinada unidad; y  $P_p$ : la probabilidad “*a priori*”.

2ª Integración de todos los valores CF en un Factor de Certidumbre final, indicativo de susceptibilidad, de acuerdo con las siguientes funciones lógicas.

$$\text{Si } CF_{L1} < 0 \text{ y } CF_{L2} < 0 \text{ entonces } CF_{L1} + CF_{L2} + (CF_{L1} \times CF_{L2})$$



Si  $CF_{L1} \geq 0$  y  $CF_{L2} \geq 0$  entonces  $CF_{L1} + CF_{L2} - (CF_{L1} \times CF_{L2})$

Si  $CF_{L1}$  y  $CF_{L2}$  son de distinto signo entonces :

$$\frac{CF_{L1} + CF_{L2}}{1 - \min(\text{abs}CF_{L1}, \text{abs}CF_{L2})}$$

Estas expresiones deben aplicarse tomando primero dos variables, combinando el resultado con una tercera, y así sucesivamente.

### *Modelo de regresión basada en la probabilidad condicionada*

La *regresión lineal multivariable* también puede usarse como estimador de la *probabilidad condicionada* en (2) de la siguiente forma:

$$Prob\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \beta_0 + \beta_1 c_1 + \beta_2 c_2 + \dots + \beta_m c_m + \varepsilon_p \quad (18)$$

donde  $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$  son parámetros (pesos) desconocidos que deben ser estimados y  $\varepsilon_p$  es el error asociado a la aproximación lineal de la probabilidad condicionada conjunta.

Este modelo sólo es estrictamente válido si  $c_1, c_2, \dots, c_m$  son variables continuas y no categóricas o discretas. Para evitar este problema, hay que transformar las variables categóricas en numéricas, procediendo de alguna de las maneras siguientes:

- Transformando las variables categóricas en series de variables binarias - *booleanas* - (Chung y Agterberg, 1980; Chung, 1983; Carrara, 1983, 1988; Chung y Fabbri, 1993); se generan una serie de mapas en los que se representan la presencia o

ausencia de una determinada unidad, por lo que habrá tantos mapas como unidades tenga la variable.

- Asignando *a priori* valores numéricos a las unidades, a partir de la experiencia.
- Asimilando las variables a determinados parámetros físicos cuantificables.
- Transformando las unidades en valores (valores de favorabilidad) mediante una función de valor (Función de Favorabilidad), tal y como describen Chung y Fabbri (1993). Una variante de este procedimiento es el utilizado por DeGraff y Romesburg (1980), Irigaray (1995) e Irigaray y Chacón (1996a y b), quienes, mediante coeficientes estadísticos de asociación y de acuerdo con los niveles de confianza de los mismos, determinan los valores. Este último procedimiento es el que se aplica en este trabajo.

Se puede entonces sustituir  $c_1, c_2, \dots, c_m$ , por la probabilidad condicionada conjunta, de forma que se obtiene:

$$Prob\{F_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \beta_0 + \beta_1 Prob\{F_p | c_1\} + \beta_2 Prob\{F_p | c_2\} + \dots + \beta_m Prob\{F_p | c_m\} + \varepsilon_p \quad (19)$$

Puesto que no se conoce lo que sucederá en el futuro, no es posible estimar  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ , pero se pueden calcular coeficientes similares a partir de la consideración de los deslizamientos ya ocurridos de la siguiente forma:

$$Prob\{S_p | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \alpha_0 + \alpha_1 Prob\{S_p | c_1\} + \alpha_2 Prob\{S_p | c_2\} + \dots + \alpha_m Prob\{S_p | c_m\} + \alpha_p \quad (20)$$

donde,  $S_p$  son las evidencias del pasado (deslizamientos del pasado).

Para calcular  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  se puede utilizar la técnica de los mínimos cuadrados (Draper y Smith, 1981) o, la de los mínimos cuadrados ponderados (Chung et al., 1995)



que está basada en unidades de condición única. Esta última técnica simplifica mucho el cálculo, produciendo los mismos resultados.

Por último, decir que las frecuencias de ocurrencia calculadas mediante relaciones bivariantes pueden modificarse introduciendo criterios expertos. Así por ejemplo, el conocimiento detallado del terreno puede hacer que el operador reinterprete un mapa de pendiente, si éste no representa satisfactoriamente la geometría del terreno.

### *Las FF en el marco de la teoría de los conjuntos difusos.*

En este caso, se pretende averiguar si una celda (o pixel) determinada en la zona de estudio pertenece al *conjunto* de las zonas que se deslizarán o, por el contrario, está incluida en el *conjunto* de las que no lo harán.

Como las suposiciones (modelo de rotura) en las que se basa el análisis de susceptibilidad realmente no son del todo verdaderas, no es posible conocer con certeza la pertenencia exclusiva a uno de tales conjuntos, siempre moviéndose dentro del campo de las matemáticas convencionales.

Los conjuntos difusos, a diferencia de los conjuntos matemáticos convencionales, se caracterizan porque los criterios que definen al conjunto (la función de inclusión) no son *objetivos*; es decir, sus límites son difusos. Un conjunto difuso no tiene criterios claros de pertenencia al mismo; es decir, sólo *tiene criterios difusos*.

Los criterios para la inclusión en el conjunto constituido por las celdas que se pueden deslizar, se derivan de las variables condicionantes. En efecto, es posible considerar los *valores de favorabilidad* calculados anteriormente, como indicadores del grado de pertenencia a ese conjunto difuso; así, los valores cercanos a 1 indican pertenencia al conjunto en cuestión, mientras que los próximos a 0, no pertenencia. Ahora bien, puesto que tales valores son meros indicadores y, por otra parte, no son bien conocidas

las relaciones entre las distintas variables, es preciso integrar los criterios aportados por las distintas variables de acuerdo con las reglas de la *Teoría de Conjuntos Difusos*.

Suponemos un conjunto difuso  $Z$ , consistente en todas las celdas pertenecientes al área de estudio ( $A$ ) en las que la proposición inicial es “probablemente” cierta.  $Z$  se puede definir mediante una función de pertenencia difusa ( $\mu_z$ ) de la siguiente forma:

$$\mu_z: A \rightarrow [0,1] \quad (21)$$

La función (*función de favorabilidad*) representa el grado de pertenencia o de compatibilidad. Si denotamos con  $F$  el área afectada por deslizamientos en el futuro, entonces:

$$\mu_z\{Fp | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \frac{\bigcap_{k=1}^m (F \cap A_{kc_k})}{\bigcap_{k=1}^m A_{kc_k}} \quad (22)$$

puede ser una buena *función de pertenencia* para (21). La función es idéntica a la de *probabilidad condicionada* en (2).

Teóricamente, un conjunto difuso se define de forma conceptual, pero en la práctica la *función de pertenencia* correspondiente se construye para determinar el grado de apoyo a la proposición de partida, a partir de la información espacial contenida en los  $m$  mapas de variables condicionantes; es decir, a partir de las  $m$  evidencias,  $c_1, c_2, \dots, c_m$ , que concurren en la celda perteneciente al área de estudio.

Existen diferencias significativas entre lo aleatorio (probabilidad) y lo difuso. Lo aleatorio tiene que ver con la incertidumbre en relación con la pertenencia o no de un elemento en un conjunto ordinario (no difuso), el cual tiene criterios de pertenencia al conjunto claramente definidos; es decir, un elemento pertenece o no pertenece al conjunto sin ambigüedades, por lo que la probabilidad tiene que ver con la



incertidumbre. Por el contrario, lo difuso se relaciona con conjuntos en los que los elementos pueden tener distintos grados de pertenencia. Un conjunto difuso no tiene criterios claramente definidos de pertenencia, por lo que los criterios y la función de pertenencia son una medida del grado de “difusión”.

Para estimar la *función de favorabilidad* (22) y si se consideran los deslizamientos ocurridos en el pasado se obtiene que:

$$\mu_z\{Sp | c_1, c_2, \dots, c_m\} = \frac{\text{área} \bigcap_{k=1}^m (S \cap A_{kc_k})}{\text{área} \bigcap_{k=1}^m A_{kc_k}} \quad (23)$$

Así, de igual forma que en el caso de la *función de probabilidad condicionada*, se puede estimar la *función de pertenencia* de forma directa, en cada una de las unidades de condición única. En este caso, los estimadores serán un buen reflejo de los movimientos ya acontecidos, pero no buenos para las predicciones.

Otra forma de calcular el grado de pertenencia consiste en utilizar operadores para conjuntos difusos. De forma que se calcule la función de pertenencia para cada una de las  $m$  variables; así se transforman en valores que representan el grado de apoyo a la proposición de que el pixel pertenezca a un conjunto difuso formado por todos los pixels que probablemente queden afectados por deslizamientos en el futuro, dado que en el pixel concurren unas determinadas unidades de unas determinadas variables. Al final se obtienen  $m$  funciones de pertenencia, tantas como variables se introduzcan en el análisis.

Además, desde un punto de vista conceptual es más sencillo estimar la función de pertenencia  $\mu_{z_k}\{F_p | c_k\}$  que  $\mu_z\{F_p | c_1, \dots, c_m\}$ , ya que sólo se necesita un criterio simultáneamente.

Entonces, la forma de obtener para cada mapa el valor de pertenencia difusa será:

$$\mu_{z_k} \{ S_p | c_{kl} \} = \frac{\text{área } \bigcap_{k=1}^m (S \cap A_{kc_k})}{\text{área } \bigcap_{k=1}^m A_{kc_k}} \quad (24)$$

donde:

$A_{kc_k}$  es el área que ocupa una determinada clase  $c_k$ ;

$S \cap A_{kc_k}$  son las áreas de  $A_{kc_k}$  afectadas por deslizamientos en el pasado.

Una vez calculadas las funciones de pertenencia para cada una de las variables, éstas se combinan utilizando para integrar los *operadores de conjuntos difusos*.

Se puede decir que cada una de las  $m$  variables a integrar serían los conjuntos difusos  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  y que los criterios de pertenencia (funciones) a tales conjuntos serían  $\mu_{z_1}, \mu_{z_2}, \dots, \mu_{z_m}$ . La función final de pertenencia difusa sería la integración de todos los criterios de pertenencia, de acuerdo con unas determinadas reglas (operadores) de la teoría de conjuntos difusos. No obstante, y aunque es sencillo calcular las funciones de pertenencia difusa, su sentido exacto no es fácil de entender.

Los operadores disponibles son, entre otros:

Intersección

$$\mu_z = \text{mínimo} (\mu_{z_1}, \mu_{z_2}, \dots, \mu_{z_m}) \quad (25)$$

Unión

$$\mu_z = \text{máximo} (\mu_{z_1}, \mu_{z_2}, \dots, \mu_{z_m}) \quad (26)$$



## Producto algebraico

$$\mu_z = \prod_{k=1}^m \mu_{z_k} \quad (27)$$

## Suma algebraica

$$\mu_z = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - \mu_{z_k}) \quad (28)$$

## Gamma (función del producto y suma algebraicos)

$$\mu_z = \left[ \prod_{k=1}^m \mu_{z_k} \right]^{1-\gamma} \left[ 1 - \prod_{k=1}^m (1 - \mu_{z_k}) \right]^{\gamma} \quad (29)$$

donde  $0 \leq \gamma \leq 1$ . De manera que cuando  $\gamma$  es igual a 1, se trata de una suma algebraica y, cuando  $\gamma$  es igual a 0 es un producto algebraico.



Como resumen y desde un punto de vista práctico (Figura 3.3), el procedimiento para elaborar modelos de susceptibilidad mediante los métodos anteriormente descritos, debe seguir los siguientes pasos:

- 1.- Selección de los parámetros condicionantes en función del modelo de rotura.  
Diseño del banco de datos digital.
- 2.- Captura de los datos. Para el presente trabajo los datos se incorporan a partir de los existentes en estudios de riesgos previos (Díaz de Terán et al., 1998), fotointerpretación, trabajo de campo e importación de la base de datos del Servicio de Información Territorial de la Diputación Foral de Guipúzcoa.
- 3.- Corrección de errores y evaluación de la incertidumbre, de cara a mejorar el banco de datos.
- 4.- Obtención de variables derivadas del modelo digital de elevaciones, MDE, (obtención de mapas secundarios).
- 5.- Opcionalmente, es posible en este momento analizar la dependencia entre las variables, con el objeto de seleccionar las variables independientes a incluir en el análisis. La alternativa consiste en la comparación de los resultados derivados del análisis de distintas agrupaciones de variables, mediante un análisis de sensibilidad.
- 6.- Categorización de las variables continuas.
- 7.- Análisis de la susceptibilidad mediante *Funciones de Favorabilidad*. Las fases de análisis son:
  - a) Determinación de los *valores de favorabilidad* para cada variable. Análisis bivariable entre los deslizamientos y cada una de las variables.
  - b) Creación de unidades de condición única, mediante la superposición de los mapas de variables utilizados en el análisis.
  - c) Integración de todos los *valores de favorabilidad*, mediante distintos métodos matemáticos (Teoría de la Probabilidad, Teoría de Conjuntos Difusos) y de acuerdo con una *FF*. Obtención de un modelo cuantitativo de susceptibilidad.
- 8.- Obtención del mapa de susceptibilidad. Reclassificación de los valores obtenidos en el modelo en un número concreto de clases de susceptibilidad.



9.- Validación independiente de los resultados obtenidos, a fin de determinar el valor predictivo del método y de mejorar la selección y utilización de las variables.

### ***3.2.3.2 Análisis discriminante***

El *análisis multivariable* convencional constituye una técnica muy adecuada y poderosa para analizar la susceptibilidad, pues comprende un conjunto de métodos estadísticos y matemáticos con los que analizar, describir, e interpretar informaciones simultáneas sobre varias variables que caracterizan un objeto. Se trata, en este caso, de explicar el comportamiento de una variable dependiente (deslizamientos o no) a partir de la combinación lineal de una serie de variables independientes conocidas (los factores condicionantes).

De entre los métodos multivariantes existentes, interesa especialmente el *Análisis Discriminante*, que aquí denominamos “*sensu stricto*” para diferenciarlo del que podría realizarse en el marco de las *Funciones de Favorabilidad*. Con el *análisis discriminante* se obtiene la adscripción de objetos a una clase, de forma que la separación de los conjuntos de muestras sea óptima y se minimice la probabilidad de clasificación errónea.

El análisis discriminante es una técnica que tiene por objeto maximizar la distancia de separación entre dos o más grupos de objetos predefinidos, a partir de una combinación lineal (*Función Discriminante*) de un conjunto de variables conocidas (variables discriminantes). Por lo tanto, su objetivo aplicado a este caso es maximizar la variabilidad entre las poblaciones estables e inestables, mediante un solo grupo de variables (factores condicionantes), minimizando la dispersión dentro de cada población.

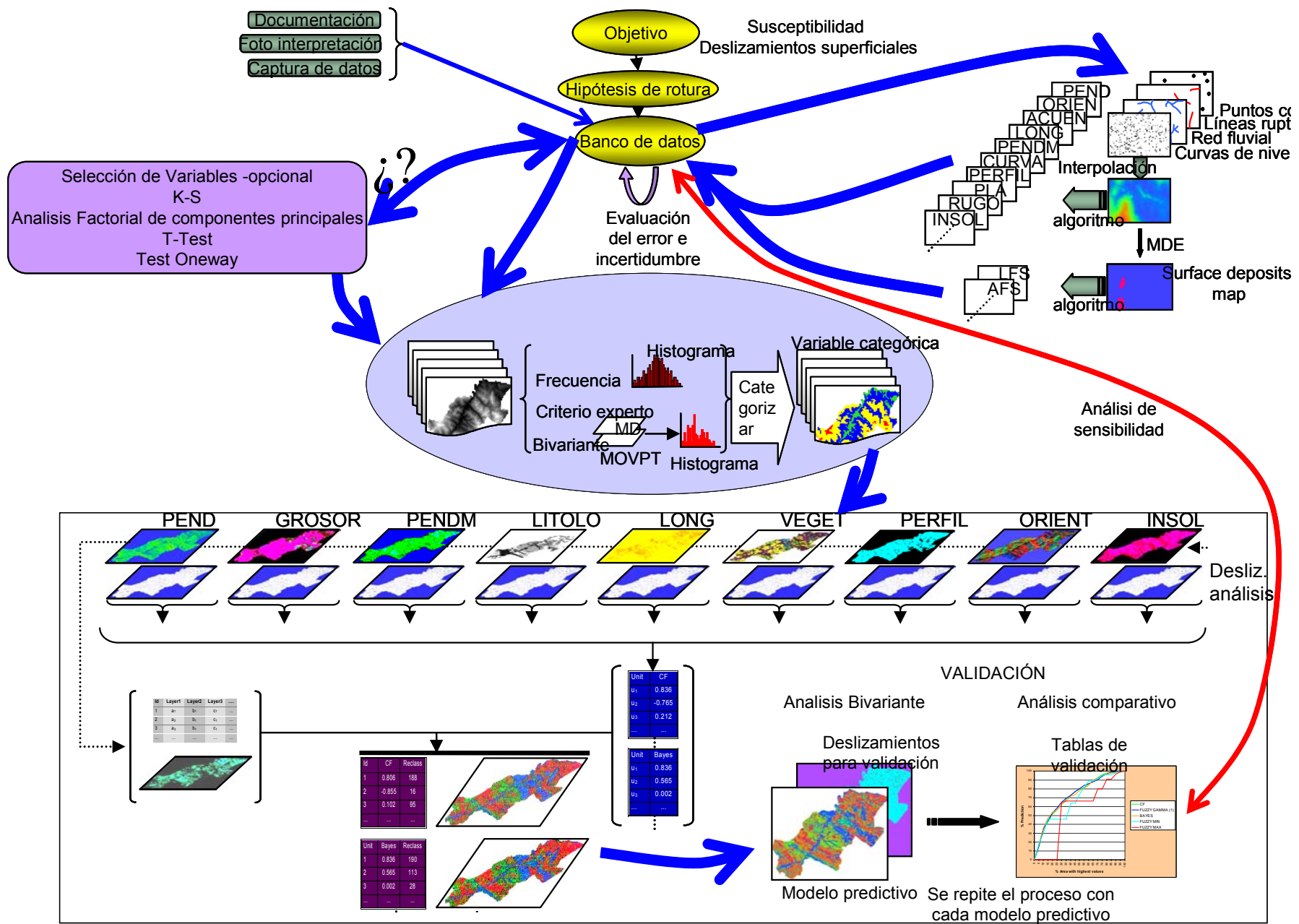


Figura 3.3. Flujo diagrama del procedimientos de cartografía de susceptibilidad a deslizamientos mediante FF.



Este tipo de método es, con diferencia, el que más se ha aplicado a esta clase de análisis y está ampliamente descrito en la literatura (Jones et al., 1961; Neuland, 1976; David et al., 1977; Carrara et al., 1978, 1991; Dillon y Goldstein, 1986; Baeza y Corominas, 1996; Santacana et al. 2000). En nuestro caso concreto, hemos seguido la aproximación propuesta por Baeza (1994). El trabajo se ha realizado en colaboración con C. Baeza, N. Santacana y J. Corominas, de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), dentro del proyecto GISLYT (Corominas y Chacón, 2001).

Las suposiciones en las que se basa esta técnica son la independencia y normalidad de las variables, y que las matrices de varianza-covarianza de las poblaciones estables e inestables sean iguales (Baeza, 1994).

Una *Función Discriminante* se describe de la siguiente forma:

$$D = \alpha_1 c_1 + \alpha_2 c_2 + \dots + \alpha_n c_n + \varepsilon \quad (30)$$

donde,  $c_{1...n}$ : son las variables independientes;

$\alpha_{1...n}$ : son los coeficientes de clasificación estimados; y

$D$ : es el valor discriminante de la función.

Esta relación es similar a (18), descrita en el marco de las *Funciones de Favorabilidad*. A su vez, utiliza los mismos criterios de clasificación que la *Función de Relación de Probabilidades* (9); es decir, zonas deslizadas y no deslizadas. No obstante, difiere apreciablemente en el tratamiento de las variables, en su cuantificación y en el procedimiento de generación de la función; también se diferencia notablemente en el procedimiento de elaboración del modelo de susceptibilidad. Por ello, resulta muy interesante la comparación de ambas técnicas.

Desde un punto de vista práctico, el procedimiento a seguir consta de las siguientes fases:



1º Selección aleatoria de una muestra de la población. Dicha muestra debe estar constituida por un número equivalente de celdas o pixels con presencia y ausencia de roturas (celdas estables e inestables). Con ello, se evita la dependencia estadística de una de las dos poblaciones (Dillon y Goldstein, 1998). Cada una de las celdas se caracteriza por un determinado valor correspondiente a cada uno de los factores causales (variables).

2º Con el objeto de identificar errores u omisiones se realiza un análisis estadístico descriptivo simple, consistente en un cálculo de la frecuencia, media, desviación típica, etc.

3º Selección de las variables que definirán la función discriminante. Mediante estadísticos descriptivos se identifican y descartan algunas de las variables preseleccionadas por incumplimiento de algunos de los supuestos básicos de la técnica discriminante. Para ello, se procede de la siguiente forma:

- a) Creación de variables compuestas y transformación de variables simples. Así por ejemplo, cuando dos variables son dependientes entre sí o tienen un significado físico muy parecido, puede crearse una variable compuesta por ambas. También, por ejemplo, cuando una variable no cumple criterios de normalidad puede ser transformada, de manera que si los cumpla.
- b) Asignación de valores numéricos a las variables nominales. Las funciones discriminantes obtenidas utilizando variables cualitativas no suelen dar muy buenos resultados (Dillon y Goldstein, 1986), por lo que es recomendable transformarlas a una escala numérica. Esto se ha llevado a cabo mediante la aplicación de “criterio de experto”. No obstante y puesto que las variables transformadas siguen siendo discretas, los resultados del análisis no mejorarán, necesariamente, de forma sustancial.
- c) Evaluación de la normalidad de variables. El supuesto de normalidad es un principio básico que se debe cumplir. Para ello, se aplica el test de verificación de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Así, las variables que no superen el nivel de significación del 5%, deben ser transformadas ( $\log x$  o  $\log x + \beta$ , por ejemplo)

de forma que se corrija la desviación de la distribución asimétrica. Puesto que en la naturaleza las variables son como son, no es posible obtener una normalidad absoluta, siendo necesario sólo corregir las grandes desviaciones.

- d) Evaluación de la dependencia de las variables. En los casos en los que las variables explicativas (factores condicionantes) estén correlacionadas ( $> 0,98$ ; esto es que sean dependientes), es necesario eliminar una de ellas. Para el análisis de la dependencia se utiliza el Análisis Factorial de Componentes Principales, lo que permite conocer el grado de correlación entre las variables, además de identificar las agrupaciones de variables con estructura semejante (con sentido físico común). Una vez identificadas las variables dependientes y antes de descartar alguna de ellas, es conveniente realizar un Análisis de Contraste de Poblaciones, entre la población de estables e inestables, con el objeto de conocer las variables que mejor caracterizan a cada población y, por tanto, presentan una mayor capacidad discriminante. El análisis de contraste entre poblaciones se puede realizar mediante el Test t de Student (análisis de las medias) y mediante el Test One-Way (análisis múltiple de la varianza). Con ambas pruebas se determina qué variables, entre las altamente correlacionadas, influyen en mayor medida en el comportamiento estable / inestable de las laderas.

4º Cálculo de la Función Discriminante. Una vez seleccionadas las variables y en buena medida cumplidos los supuestos descritos, se puede construir la *Función Discriminante* con la combinación del menor número posible de variables que sea capaz de discernir entre las poblaciones de estables e inestables. Como resultado se obtiene una función (30) combinación lineal de las variables con mayor significación estadística. Los coeficientes estandarizados dan una correlación simple de cada variable con la función, de manera que reflejan la influencia positiva o negativa de las diferentes variables explicativas con respecto a la variable explicada. Además, el valor del coeficiente de la variable indica la contribución relativa de la misma a la susceptibilidad, de manera que se puede conocer qué variables presentan una mayor o menor significación. Los



valores de la función variarán entre  $-q$  y  $+q$  (siendo  $q$  un número racional). Los valores negativos indican baja susceptibilidad mientras que los positivos alta susceptibilidad.

5° Creación del modelo aplicando la función discriminante. Una vez calculada la función de combinación lineal de variables, se trabaja con la base de datos en formato matricial. Simplemente es necesario sumar los diferentes mapas (variables) tal y como describe la función. El resultado será un modelo de susceptibilidad.

El proceso de extracción de la muestra aleatoria, la transformación de los mapas de variables y la elaboración del modelo se realiza en un SIG convencional. Por el contrario, el resto de las fases del análisis debe realizarse en una aplicación estadística. En este trabajo se ha utilizado el programa SPSS, versión 9.

El análisis discriminante se ha aplicado en este trabajo como procedimiento de validación de los otros métodos utilizados. Se ha pretendido así llevar a cabo validaciones “externas”, comparando los resultados obtenidos con métodos totalmente diferentes, además de las validaciones “internas” realizadas para cada método dado con poblaciones independientes de datos.

### ***3.2.3.3 Visualización de los modelos de susceptibilidad***

Una vez aplicadas cualquiera de las técnicas de análisis anteriormente descritas, obtenemos un modelo digital matricial georeferenciado en el que cada celda viene representada por un valor numérico relativo al grado de susceptibilidad. Para visualizar tales valores numéricos y obtener una imagen, o mapa, que sea inteligible, es preciso asignar colores o tonos a cada uno de los valores obtenidos. Además, es necesario que el número de colores sea discreto, por lo que los valores numéricos se deben clasificar en intervalos (niveles de susceptibilidad), obteniéndose así un mapa de susceptibilidad. La manera de clasificar los valores es una parte muy importante del proceso,



especialmente si queremos comparar visualmente varios modelos. Tradicionalmente, se han utilizado distintos procedimientos básicos para clasificar los valores, como por ejemplo:

- Definición de unos límites de clase arbitrarios con criterios más o menos razonados y explicitados. Por ejemplo, si tenemos valores de probabilidad (de 0 a 1), podemos dividir tales valores en 3 clases: 0-0,20; 0,20-0,85; y de 0,85-1.
- Clasificar los valores en intervalos de igual valor. Utilizando el ejemplo anterior, las clases quedarían en: 0-0,33; 0,33-0,66 y de 0,66-1.
- Clasificar los valores en intervalos de igual área. En este caso, el 33% de los valores más cercanos a 0 quedarían en la misma clase, y así sucesivamente.
- Definición de intervalos, a partir de la media, utilizando múltiplos (enteros o no) de la desviación típica.

Dependiendo del modelo matemático usado los valores obtenidos no tienen el mismo significado, aunque vengan representados por el mismo intervalo numérico. Así por ejemplo, mientras los valores obtenidos en un modelo de probabilidad (0-1) son estimaciones de la probabilidad, los obtenidos con un modelo de conjuntos difusos (0-1, por ejemplo) representan valores de pertenencia (difusa) a un conjunto (futuros deslizamientos o no). En tal caso, un mismo valor correspondiente a cada uno de los dos modelos no es lo mismo, por lo que en la mayoría de las ocasiones no es posible la comparación visual ni numérica, salvo que los modelos a contrastar tengan el mismo rango y sentido de valores. Cuando los intervalos son además distintos, como sucede al comparar la relación de probabilidad (0 - infinito), con la probabilidad bayesiana (0-1, por ejemplo), las incompatibilidades son aún más notables. Por ello, los mapas obtenidos por los procedimientos tradicionales de clasificación, aunque no carentes de sentido, son en general muy difícilmente comparables visualmente y, lo que es peor aún, pueden dificultar el proceso de validación.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, todos los modelos matemáticos están basados en una serie de suposiciones que no son del todo ciertas, por lo que los valores obtenidos no pueden considerarse valores absolutos. Un ejemplo que ilustra



muy bien este aspecto es un modelo de probabilidad, en el que se han obtenido valores entre 0 y 1, aunque se sea consciente de que la “probabilidad” de una determinada celda no es exactamente la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en el futuro (además habría que definir qué se entiende por futuro). Por ello, y aunque no pueden ser considerados valores absolutos, pueden ser vistos como valores relativos, puesto que todos ellos están basados en las mismas suposiciones y en idénticas condiciones. Esto implica que es más significativo el orden relativo de los valores numéricos que los valores en sí.

Por lo tanto, se clasificarán ordinalmente los valores numéricos. Para ello, se sustituyen los valores obtenidos al aplicar el modelo matemático por un número ordinal decreciente, de forma que el valor más favorable (más susceptible) se nos convierta en  $n$ , el siguiente en  $n-1$  y así sucesivamente hasta el último valor, que será igual a 1. Para evitar que distintos modelos tengan distintos números ordinales (distintos  $n$ ), de acuerdo con el máximo número de valores distintos obtenidos en cada uno de ellos, los valores de orden se llevan a una escala de 0 a 1. Esto se hace dividiendo el número ordinal por el número de celdas del área de estudio (intervalos de igual área), de forma tal que al final de proceso el valor numérico original más susceptible se convierte en 1 y el que menos tiende a 0. Una vez obtenidos los nuevos valores (valores normalizados), ya podemos clasificarlos con alguno de los procedimientos arriba descritos, obteniendo una imagen (mapa) que sea comparable con otras. En este trabajo, los valores se han clasificado en 200 clases de igual área (correspondiente cada una de ellas a un 0,5% de la superficie del área de estudio). Considerando el gran número de clases resultante, el procedimiento de obtención de los valores normalizados, y que los modelos se han aplicado en unidades de características homogéneas, siempre menores en número al número de celdas de la zona de estudio, la diferencia entre utilizar un procedimiento de clasificación como el utilizado o un procedimiento que divida los valores en clases de igual valor es insignificante, tal y como se muestra en la Figura 3.4. El procedimiento propuesto tiene la ventaja de facilitar de manera notable la automatización de las validaciones.

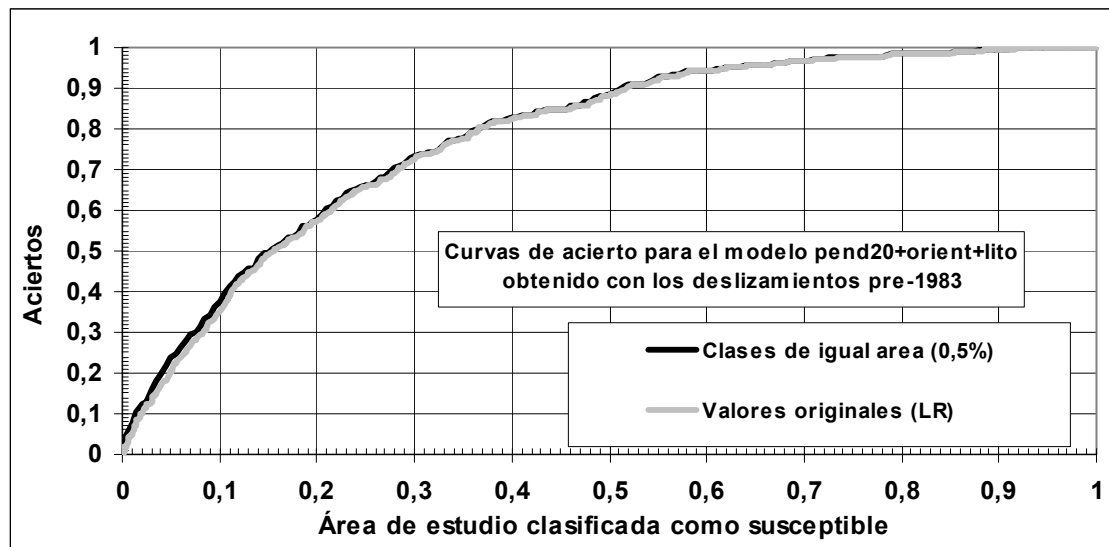


Figura 3.4. Comparación de las curvas de validación obtenidas para un mismo modelo de susceptibilidad (Relación de probabilidades), utilizando 200 clases de igual área y valores originales (continuos) sin clasificar. Se observa que la diferencia es mínima.

La imagen resultante ocupa sólo 8-bit (hasta 256 valores diferentes, de 0 a 255) y se puede visualizar de forma muy comprensible, asignando a los distintos valores un color mediante una “*pseudo-color-look-up table*”, tal y como se muestra en muchas de los mapas de este trabajo, o mediante tonos de grises.

### 3.2.3.4 Recapitulación

Las principales características de los métodos utilizados se resumen en la Tabla 3.4.

Ambos grupos de procedimientos proporcionan resultados cuantitativos satisfactorios que han sido ya suficientemente contrastados; sin embargo, presentan diferencias,



tanto desde un punto de vista matemático como operacional, que hacen especialmente interesante la comparación entre ellos.

Los dos grupos de métodos tienen en común el ser aplicables a grandes áreas, a escalas medias y pequeñas; utilizar variables cartográficas comúnmente existentes o fáciles de obtener; poderse aplicar tanto en unidades matriciales como vectoriales (si bien el formato matricial se ajusta mejor a los condicionantes técnicos); etc.

La Tabla 3.5, comparativa de las técnicas utilizadas, muestra sus principales ventajas e inconvenientes.

Tabla 3.4. Principales características de los métodos de análisis de la susceptibilidad utilizados.

Características*	MÉTODOS DE ANÁLISIS			
	Análisis discriminante	<i>FUNCIONES DE FAVORABILIDAD</i>		
		Probabilidad condicionada	Factor de Certidumbre	Teoría de conjuntos difusos
Tipo de variables utilizables	Cuantitativas	Cuantitativas/cualitativas	Cuantitativas/cualitativas	Cuantitativas/cualitativas
Cuantificación de variables cualitativas	Criterio experto	FF (se obtiene un valor de favorabilidad)	FF (se obtiene un valor de favorabilidad)	FF (se obtiene un valor de favorabilidad)
Pretratamiento de variables	Normalización	Categorización	Categorización	Categorización
Requerimientos matemáticos **	Independencia Normalidad	Independencia Todas las variables	Independencia	Criterios de pertenencia
Unidad de análisis	Celda (píxel)	Unidad de condición única (píxel)	Unidad de condición única (píxel)	Unidad de condición única (píxel)

\*Las características reflejadas en la tabla se refieren a los métodos y técnicas utilizados en este trabajo, pudiéndose modificar en algunos casos.

\*\* El incumplimiento de alguno de los requerimientos no invalida la aplicabilidad del método.

Tabla 3.5. Resumen comparativo de las técnicas de análisis utilizadas.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<i>A. DISCRIMINANTE</i>	
<p>Idóneo para variables continuas</p> <p>Análisis de dependencia de variables implícito</p> <p>Muy buen aprovechamiento de toda la información de las variables</p> <p>Se pueden analizar datos correspondientes a deslizamientos puntuales</p> <p>Criterio experto implícito (puede ser un inconveniente al introducir subjetividad)</p>	<p>Asignación de valores numéricos a variables categóricas</p> <p>Necesidad de conocer muy bien las características de las variables del área de estudio.</p> <p>Se requieren variables con continuidad espacial</p> <p>Cálculos complejos – Banco de datos a analizar más limitado</p> <p>Necesidad de un elevado conocimiento de estadística</p>
<i>FF</i>	
<p>Idóneo para variables categóricas</p> <p>Cálculos más sencillos - Se pueden analizar simultáneamente bancos de datos enormes</p> <p>Pueden aplicarse teorías matemáticas distintas a la de probabilidades</p>	<p>Necesidad de categorizar las variables continuas *</p> <p>Pérdida de información al discretizar las variables *</p> <p>No se analiza implícitamente la dependencia de variables</p> <p>Ausencia de criterio experto, aunque puede introducirse (en tal caso aumenta la subjetividad)</p>

\* La categorización y discretización de variables no es estrictamente necesaria, aunque así ha sido el procedimiento seguido en este trabajo.

Conviene insistir en que el conjunto de los métodos descritos (con la excepción de los que se apoyan en la Teoría de Conjuntos Difusos) sólo son aplicables, desde un punto de vista matemáticamente estricto, a variables continuas entre  $-\infty$  y  $+\infty$ . Es evidente que ninguna de las variables que condicionan la ocurrencia de deslizamientos cumple esa condición, lo que, naturalmente, afecta a la robustez de los métodos. No obstante, el rigor matemático absoluto no es imprescindible para la obtención de resultados útiles; la utilidad y validez de éstos vendrá determinada por la validación independiente que de los mismos se realice. Son estas validaciones las que proporcionan firmeza a los métodos, aunque, por supuesto, no eliminen todos los inconvenientes o limitaciones que presentan. Por ello, la utilización de este tipo de aproximaciones se ha generalizado desde hace tiempo en muy diversos ámbitos del estudio de los sistemas naturales. Posiblemente el ejemplo más conocido y extendido es el del análisis discriminante, que se utiliza hace bastantes décadas en diversas ramas de las ciencias geológicas y biológicas.

Hay que recalcar también que la aplicación de los métodos descritos pueden realizarse introduciendo “criterios de expertos” que, normalmente, mejorarán los resultados, dado que introducen información adicional sobre el comportamiento de las variables. No obstante, esto tiene la evidente contrapartida de que aumenta el grado de subjetividad (por fundamentada que ésta sea) e introduce un cierto sesgo en el proceso. Esta característica es especialmente importante en el caso del análisis discriminante, en el cual el criterio del experto juega un papel central en todo el procedimiento.

### **3.2.4 La validación.**

Los mapas de susceptibilidad resultantes de la aplicación de los distintos métodos de análisis tratan de representar, de forma espacial, el grado de propensión del terreno a deslizarse a partir de los deslizamientos ocurridos en el pasado. La evaluación de los resultados derivados de la aplicación de un determinado método de análisis, sólo puede



llevarse a cabo a partir de la contrastación independiente de los mismos. De igual forma, la comparación entre distintos métodos analíticos dependerá fundamentalmente de la bondad de los resultados. Sin embargo, a pesar del gran número de mapas de amenazas realizados en los últimos años, es muy poco lo que se ha publicado acerca de la fiabilidad de tales mapas (ver apartado 1.5.2).

Por ello, una fase absolutamente esencial en cualquier método de cartografía de riesgos es la validación del mapa predictivo resultante. Cualquier método de cartografía de la amenaza lleva en general implícito un cierto grado de validación, por lo que desde un punto de vista práctico es valioso. Sin embargo, desde un punto de vista científico, no dejará de ser una hipótesis, si no se lleva a cabo una validación sistemática del mapa.

Según se ha comentado anteriormente, los mapas de susceptibilidad obtenidos mediante técnicas estadísticas están basados en una serie de suposiciones:

- Los deslizamientos futuros ocurrirán bajo circunstancias similares a las que los han producido en el pasado (principio de uniformismo aplicado a los procesos).
- Todos los factores condicionantes del proceso son bien conocidos y han sido incluidos en el análisis.
- Todos los deslizamientos ocurridos en el pasado han sido identificados e incluidos en el análisis (o al menos una muestra aleatoria de los mismos).

Además, varias de las técnicas matemáticas descritas requieren que las variables sean normales, independientes, etc. Obviamente, estas suposiciones no son del todo correctas, por lo que el mapa de susceptibilidad resultante representa sólo una estimación de la susceptibilidad, aceptable en la medida que se determine por medio de la validación correspondiente.

Si se quiere validar un mapa de amenazas hay que compararlo con una población o muestra de deslizamientos que no se haya utilizado para su elaboración, es decir debe ser una muestra independiente. Puesto que el objeto principal de un mapa de amenazas



es describir los lugares en los que se producirán deslizamientos en el futuro, la contrastación, idealmente, debería llevarse a cabo pasado un cierto tiempo desde la realización del mapa, comparándolo con los deslizamientos ocurridos en el transcurso de años. Ahora bien, aún siendo este ejercicio muy interesante, presenta problemas evidentes. Por un lado, los agentes desencadenantes y condicionantes cambian con el tiempo, por lo que también cambian los procesos y los riesgos que implican; como el mapa de amenazas que se pretende contrastar no refleja las implicaciones de la magnitud ni del lugar de tales cambios, este tipo de contrastación siempre estará sesgada. Por otro lado, cuando nos referimos a “deslizamientos en el futuro”, normalmente no precisamos si en los próximos 5 años, en los próximos 40 años, etc., de manera que siempre existe una incertidumbre asociada al periodo de predicción que pretende reflejar el mapa, y por lo tanto al que debe usarse para la validación. Por último y quizás lo más importante, no es ni práctico ni generalmente viable, tener que esperar unos años para realizar una estimación del carácter predictivo del mapa; en tal caso, la utilización de los mapas de amenazas en la gestión y ordenación del territorio no sería posible.

La alternativa más realista consiste en utilizar la población de los deslizamientos ya ocurridos y dividirla en, al menos, dos muestras, basando el análisis en una de ellas y utilizando la otra como “los deslizamientos que tenemos que predecir”. Para ello podemos seguir distintas estrategias:

- a) Estrategia temporal. El mapa se contrastará con una muestra de deslizamientos ocurridos posteriormente a los utilizados para la obtención del mapa, dividiendo la población de deslizamientos ya ocurridos en al menos dos clases temporales y utilizando la más antigua para el análisis y la más reciente para la validación, suponiendo que la clase de deslizamientos más modernos no ha ocurrido todavía. Puesto que con el mapa se pretende identificar las áreas dónde ocurrirán deslizamientos en el futuro, este procedimiento es quizás el más natural y convincente, además de ser el más recomendable. Su mayor debilidad reside en la variación temporal de los factores desencadenantes y de algunos condicionantes.



- b) Estrategia espacial. Al igual que en el procedimiento anterior, se puede suponer que los deslizamientos en una parte del área de estudio todavía no han ocurrido. Podemos subdividir el área de estudio en dos subzonas de características similares y utilizar los deslizamientos de una de las subzonas para hacer el análisis y contrastar posteriormente los resultados con los deslizamientos de la otra subzona. El mayor problema de esta estrategia es la dificultad de dividir el área de estudio de dos partes que sean prácticamente idénticas, sobre todo si tenemos en cuenta que, por lo general, para disponer de una muestra significativa de deslizamientos es preciso que el área de estudio sea relativamente grande. Para evitar esto una posibilidad consistiría en dividir el área de estudio en muchas subzonas, por ejemplo en 9, y utilizar 8 para el análisis y una para la validación; cambiando las áreas de análisis y de validación, podemos estimar la validez de la predicción. Una variante frecuente de este procedimiento consiste en extrapolar los criterios, numéricos o no, para la determinación de la amenaza a otra zona de estudio distinta, aunque dentro del mismo contexto morfológico, litológico, estructural y climático. Aunque este tipo de validaciones no son del todo rigurosas, permite estimar hasta qué punto son extrapolables tanto el método como los criterios empleados.
- c) Estrategia aleatoria. Es posible dividir los deslizamientos identificados en una zona en al menos dos muestras aleatorias y utilizar una para el análisis y otra para la validación. Una variante de este método consistiría en valorar la predicción de un deslizamiento con el resto de los deslizamientos, repitiéndolo con otros deslizamientos. Obviamente, esto sólo es viable cuando el número de deslizamientos es muy grande o cuando existen muy pocos deslizamientos. El mayor problema de este tipo de estrategias surge de la dificultad de obtener una muestra totalmente aleatoria que sea estadísticamente representativa; ahora bien, no presenta los problemas mencionados en los casos anteriores.

Estos tres procedimientos y sus variantes (es posible incluso combinar algunos de los procedimientos descritos entre sí) indican la gran cantidad de estrategias que es posible

diseñar para validar un mapa predictivo de amenaza. Obviamente, no todas ellas tienen el mismo significado, aunque sí muy parecido, pero todas sirven para tal propósito.

Hasta ahora, se ha hablado de la validación utilizando una muestra independiente a la empleada en el análisis, con lo que se obtiene una valoración de la potencialidad de predicción de un determinado mapa, que llamaremos *tasa de predicción* o *valor predictivo*. Si, por el contrario, se usa la misma muestra de deslizamientos en el análisis y en la validación, se obtiene una valoración sobre la bondad de ajuste del modelo a los datos con los que está elaborado, que llamaremos *tasa de acierto*. Puesto que suponemos que el modelo (mapa) es correcto, debemos esperar que la tasa de acierto sea mejor que la tasa de predicción.

Sea cual sea la estrategia utilizada, la comparación se puede expresar de varias maneras:

- Validación cualitativa. El procedimiento más usual consiste en comparar visualmente el mapa de susceptibilidad con la muestra de deslizamientos de validación. Este procedimiento es subjetivo y cualitativo.
- Validación cuantitativa. El resultado de la contrastación se expresa numéricamente mediante:
  - o Índices. Por ejemplo, área de la clase afectada por deslizamientos / área de la clase. Para la utilización de índices es conveniente que el mapa de susceptibilidad represente un número discreto de clases.
  - o Valor del error-correlación. Para ello es necesario que el mapa represente zonas susceptibles y no susceptibles.
  - o Función. Por ejemplo, curvas de validación. En este procedimiento se comparan todos los valores numéricos del mapa de susceptibilidad.

Todos estos procedimientos se han aplicado, en mayor o menor medida, en el presente trabajo. Los resultados obtenidos se discuten con detalle más adelante.



### ***3.2.4.1 Curvas de validación: acierto y predicción***

Estas curvas (Figura 3.5) representan, de forma continua, la tasa acumulada de los deslizamientos bien clasificados por un determinado mapa de susceptibilidad. En ordenadas, se representa la porción (acumulada) de los deslizamientos explicados por cada una de las clases de susceptibilidad. En abscisas, las clases de susceptibilidad (parte del área de estudio clasificada como susceptible) ordenadas de mayor a menor susceptibilidad. En los ejemplos que se muestran se ha utilizado una escala de 0 a 1, siendo 1 tanto todos los deslizamientos de la muestra como todo el área de estudio. Además, en abscisas, se ha representado una barra en “pseudo-color” equivalente a la empleada para representar los mapas de susceptibilidad.

La línea diagonal representada en la curva de validación sería el resultado de un mapa de susceptibilidad que no discrimina nada, esto es, una predicción o acierto totalmente aleatorio. Cuanto más se aleje la curva de la diagonal hacia arriba, mejor será la predicción. De igual forma, cuanto más pendiente tenga la curva en el tramo más próximo al origen, mayor será el potencial predictivo del mapa. La curva de validación teórica muestra el ejemplo de un buen mapa de susceptibilidad, en el que el 10% del área de estudio más susceptible explica el 75% de los deslizamientos utilizados en la validación.

Dependiendo de que el mapa de susceptibilidad se compare con una muestra de deslizamientos distinta a la empleada en su confección, o por el contrario se utilice la misma, se obtendrá respectivamente la curva de predicción y la de acierto (Figura 3.6). La curva de predicción es un reflejo del potencial predictivo del mapa, mientras que la de acierto representa el grado de ajuste del mapa con los datos utilizados en su elaboración. Obviamente, la curva de acierto refleja un mejor comportamiento del mapa que la curva de predicción.

Para obtener las curvas de validación (Figura 3.7) se cruzan el mapa de susceptibilidad de 200 clases y el mapa de deslizamientos con el que se desee comparar, obteniéndose

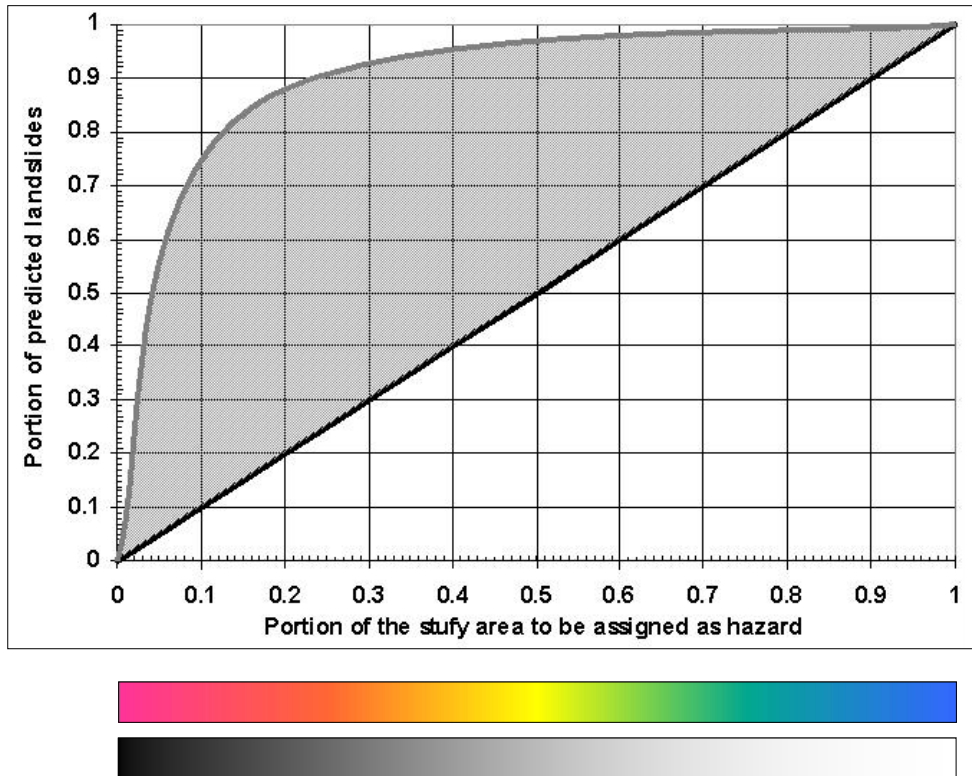


Figura 3.5. Curva teórica de validación

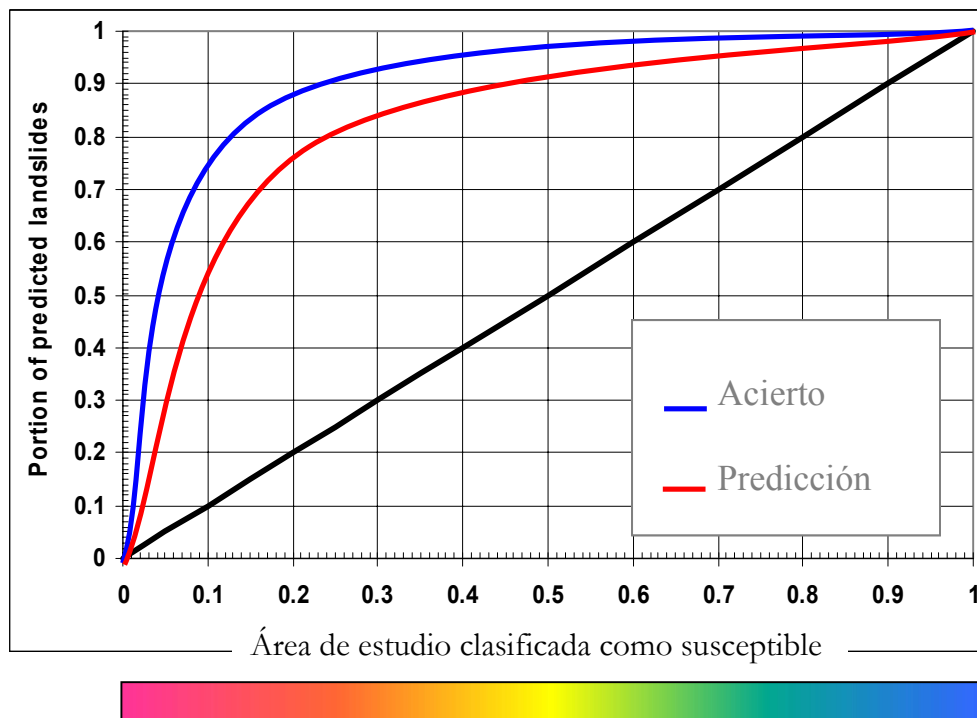


Figura 3.6. Curvas de acierto/predicción

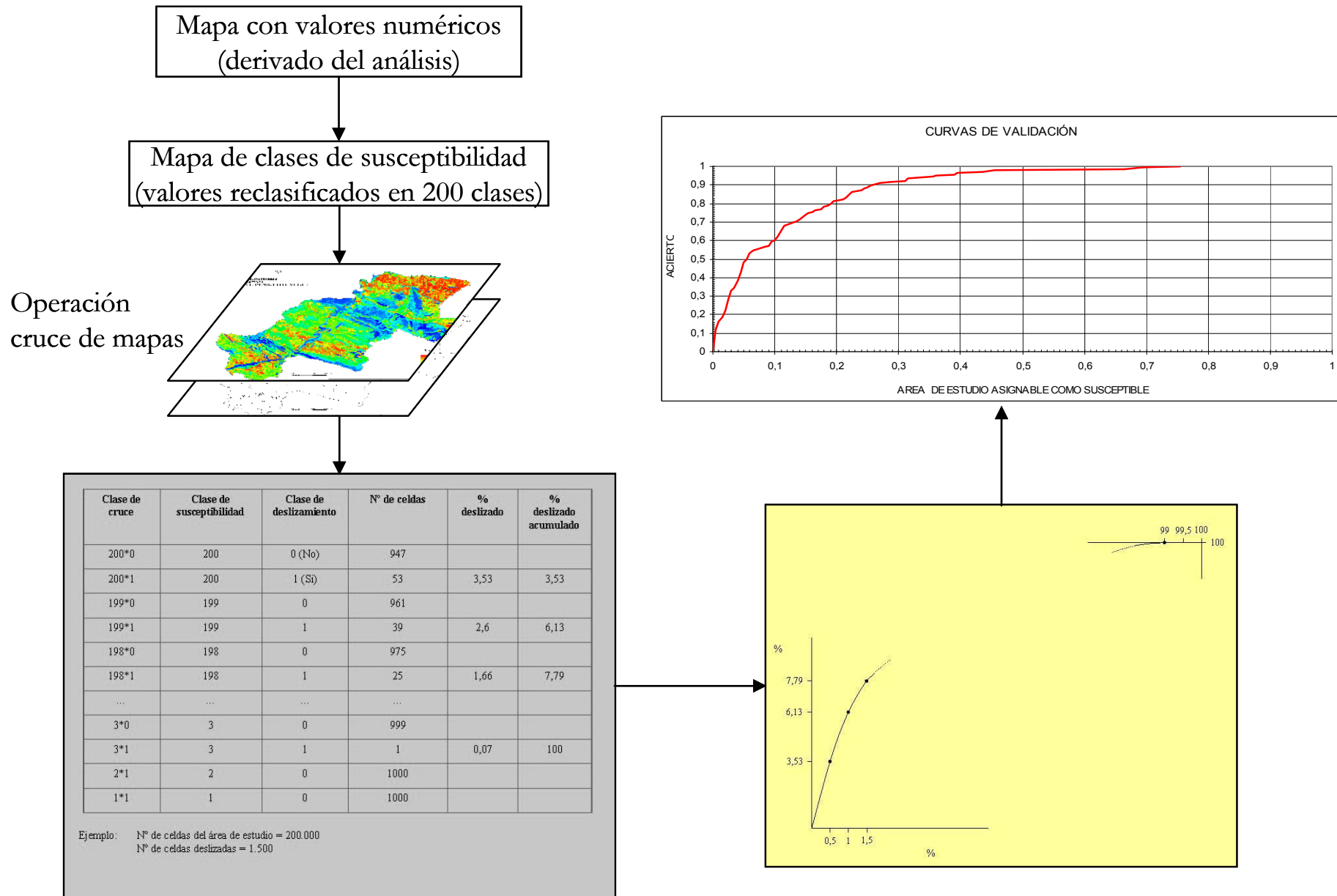


Figura 3.7. Procedimiento de obtención de las curvas de validación.

una tabla de validación cruzada que incluye las combinaciones resultantes y el número de celdas correspondientes a cada combinación.

A partir de estos datos se puede calcular el porcentaje de deslizamientos correspondientes a cada clase de combinación y el porcentaje acumulado. Esto equivale a determinar el porcentaje de deslizamientos de la muestra de validación, para cada clase de susceptibilidad en la que se han reclasificado los valores numéricos resultantes del análisis. Previamente es preciso ordenar la tabla de validación cruzada en orden decreciente de susceptibilidad.

Una vez obtenidos los valores de porcentajes acumulados (en este caso, en tantos por uno), se representan gráficamente los mismos, con lo que se obtiene la curva de validación.

La función de cruce de mapas es una operación básica y común a cualquier SIG, tanto con modelos vectoriales como matriciales, pudiéndose calcular los porcentajes de deslizamientos explicados en el mismo sistema. Ahora bien, lo más cómodo es exportar la tabla de validación cruzada a cualquier hoja de cálculo convencional, en la que también se puede generar la gráfica.

La gran ventaja de utilizar técnicas de validación de este tipo, tanto curvas de predicción como de acierto, es que permiten comparar de forma sencilla e inteligible distintos modelos predictivos, lo que se traduce en las siguientes aplicaciones:

- Conocer el potencial predictivo (curva de predicción) y el grado de ajuste (curva de acierto) de un determinado modelo. Este es uno de los objetivos principales de las curvas de validación. Sin un sistema de contrastación similar a este, en el que se contrasten todos los valores obtenidos en el modelo, el mapa resultante es una mera hipótesis.
- Comparar distintas técnicas de análisis. Las características propias de las curvas de validación descritas, permiten comparar mapas elaborados con



cualquier tipo de método de cartografía empleado, con independencia de que el mapa sea cualitativo o cuantitativo. Validando distintos modelos que correspondan a una misma zona podemos elegir el más apropiado.

- Comparar predicciones en diferentes áreas de estudio. Los resultados derivados de la contrastación de modelos pertenecientes a áreas distintas permiten, por un lado, conocer cuál es el potencial predictivo que tenemos en cada una de las zonas y, por otro lado, determinar el método que mejor resultados aporta.
- Clasificar las variables utilizables en el modelo. Cuando se analizan muchas variables simultáneamente y sobre todo cuando las variables son continuas, es preciso realizar una gran cantidad de cálculos y se requiere mucha memoria de almacenamiento. Con el objeto evitar estos problemas sin menoscabo de la calidad del resultado final, es posible discretizar la información.
- Seleccionar las variables para construir el modelo. Efectuando un análisis de sensibilidad mediante curvas de validación podemos conocer qué variables son significativas y cuales, por el contrario, son accesorias y sólo introducen ruido en el análisis. La validación es la mejor forma de conocer la importancia relativa de cada variable. Por supuesto, el mejor resultado en la curva de acierto (no necesariamente en la de predicción) lo obtendremos integrando toda la información que tengamos, siempre y cuando no incumpla algunas de las suposiciones intrínsecas a la técnica de análisis (por ejemplo en un análisis multivariable no deben integrarse las variables que sean claramente dependientes).
- Conocer mejor el significado de las variables (factores condicionantes), en relación con el proceso. Esto incluye no sólo al conjunto de variables sino que es aplicable al significado de los distintos valores o clases de cada variable. Se dispone así de información que facilita la comprensión de la importancia relativa de los factores que condicionan la evolución geomorfológica del paisaje. Existen muchos estadísticos que permiten analizar este aspecto más en profundidad, pero, no obstante, este método



permite una lectura muy sencilla, además de poderse contrastar no sólo el ajuste de unos datos sino sus implicaciones en la potencialidad de predicción.

- Valorar la importancia de la cartografía de rasgos de inestabilidad para la obtención de mapas de susceptibilidad. Los rasgos de inestabilidad constituyen la base y parte más importante de los modelos predictivos, por lo que tanto su identificación como su cartografía es determinante. Por otra parte, dependiendo de que se utilicen los polígonos correspondientes a las zonas de ruptura o, por el contrario, se simplifiquen en forma de puntos, se pueden obtener resultados distintos.
- Valorar algunas de las suposiciones en las que se basan los modelos predictivos. Comparando entre sí, para un mismo modelo, distintas curvas de predicción (espaciales y temporales), la curva de acierto y las curvas teóricas, es posible conocer las causas que explican sus diferencias. En general, tales diferencias están relacionadas con el hecho de que las suposiciones en las que nos basamos no son del todo realistas.
- Clasificar el área de estudio en zonas de distinto grado de susceptibilidad, de acuerdo con la cartografía tradicional al uso. Los distintos tramos de la curva de validación ayudan a definir clases de susceptibilidad de acuerdo con su potencial de predicción.
- Conocer el significado y las limitaciones del valor predictivo de un mapa. Una sola curva de predicción de un determinado modelo aporta simplemente una idea aproximada del potencial predictivo del modelo. Si se obtienen una serie de curvas, para el mismo modelo, correspondientes a predicciones de diferentes clases temporales de deslizamientos, se tendrá una idea más acertada del verdadero valor predictivo del modelo.
- Calcular la amenaza. Conociendo el valor predictivo de un determinado modelo, es posible plantear suposiciones razonables en las que basar el cálculo de la probabilidad espacio-temporal, con lo que prácticamente tendríamos un modelo de amenaza, a partir del que sería posible abordar la modelización del riesgo.



- Interpretar y valorar los errores. Independientemente del error específico de una determinada variable, podemos conocer la influencia que tal error tiene en la predicción, lo que permitiría valorar hasta qué punto debe mejorarse una variable.
- Conocer la relación coste / beneficio para un determinado modelo predictivo. Conociendo la contribución relativa de cada variable, sus limitaciones y su procedimiento de obtención, así como el valor predictivo resultante, se pueden extraer conclusiones acerca de cómo optimizar los recursos. Probablemente con unas pocas variables comúnmente disponibles, y con muy poco trabajo de campo, es posible obtener unos resultados satisfactorios.
- Incrementar el conocimiento acerca del proceso tanto en su faceta espacial como temporal.

Lo anteriormente dicho indica que gran parte de los objetivos planteados en este trabajo son abordables mediante técnicas de validación.

### **3.2.5 Herramientas**

Dado el volumen de datos generado y el carácter estadístico y cartográfico del estudio, la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), ha resultado imprescindible.

Existen numerosas definiciones de SIG (GIS, en inglés) y una gran controversia respecto a la acepción más exacta del término (Maguire, 1991). Tales discrepancias derivan, fundamentalmente, de la utilización de los SIG en aplicaciones muy diversas, por lo que sus funciones y capacidades principales no son las mismas. Aún así, un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede definir como un “conjunto de programas informáticos que permiten la captación, almacenamiento, tratamiento,

análisis y presentación de bases de datos gráficos y alfanuméricos referenciados geográficamente” (Felicísimo, 1994). La información gráfica es aquella que caracteriza geoméricamente los elementos de la cartografía y define su posición espacial relativa. Esta información gráfica puede representarse mediante un modelo o formato vectorial (puntos, líneas y polígonos), o matricial (celdas definidas por su posición), (Figura 3.8).

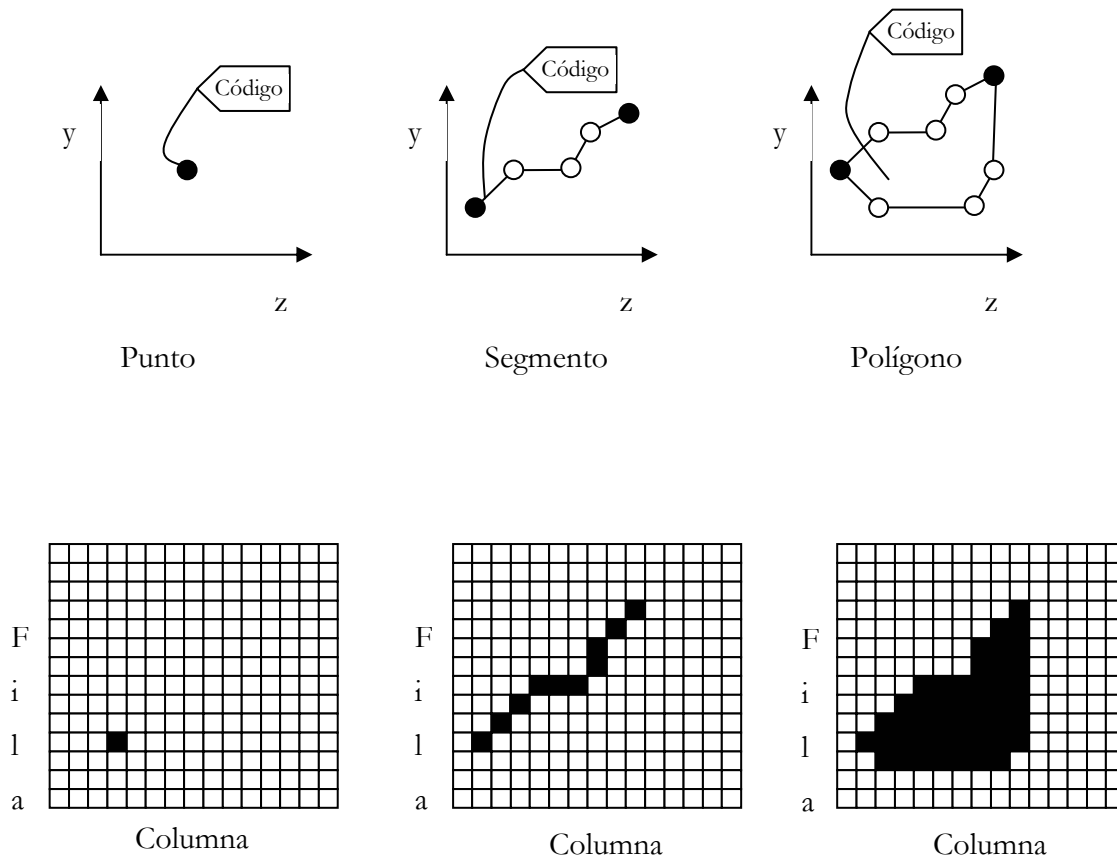


Figura 3.8. Modelos generales de representación de información geográfica

La información alfanumérica incluye diferentes tipos de atributos y las relaciones entre los objetos que no son de tipo geométrico; a este último tipo de información se le suele denominar atributos asociados. Star y Estes (1990) indican que un GIS consiste principalmente en un sistema con cuatro funcionalidades fundamentales: introducción de datos y verificación, almacenamiento y manipulación de datos, transformación y análisis, presentación y salida de datos. Es un *software* designado para tratar datos



espaciales de cara a producir mapas, tablas y ficheros de datos que pueden manipularse con modelos numéricos. Una característica importante de un GIS es la capacidad para generar información nueva, integrando conjuntos de datos diversos, referenciados al mismo sistema de coordenadas (Goodchild, 1993).

Los bancos de datos desarrollados en el entorno de un SIG, al igual que la cartografía convencional, suelen organizar la información en diferentes capas temáticas y, en general, el grado de estructuración es mayor que en la cartografía analógica. Esta estructura en capas presenta una serie de ventajas como son: facilitar la organización de la información, minimizar el número de atributos asociados a cada capa y simplificar la entrada de datos, el acceso a los mismos y las representaciones gráficas (Menéndez, 1994). La referenciación geográfica asegura la correspondencia espacial de los distintos niveles de información con una misma localización geográfica, lo que permite la “superposición vertical” de la información. El sistema es, por tanto, capaz de realizar análisis de muchos mapas a la vez, junto con las tablas de atributos asociados. Las funciones necesarias para ello incluirían la superposición de mapas, la reclasificación, y una gran variedad de otras operaciones lógicas, aritméticas, condicionales, de vecindad, etc.

Los SIG representan un gran avance en el análisis espacial de datos. Tanto la estructura de almacenamiento de los SIG, como las posibilidades que ofrecen de superposición de la información temática, hacen que estos sistemas constituyan una poderosa herramienta para realizar este tipo de estudios.

La historia de los SIG comienza en la década de los sesenta con el *Canadian Geographical Information System* (CGIS) y con el sistema desarrollado por el *Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis*. Otros proyectos importantes desarrollados en la década fueron el *Land Use and Natural Resources Information System* creado en el estado de Nueva York y el *Minnesota Land Management Information System* (Menéndez, 1994). Posiblemente la primera aplicación en España sea la presentada por el CIDS (1977) para la ordenación territorial del entorno de Peña Cabarga (Cantabria). La etapa de

mayor expansión tiene lugar en la década de los 80, en la que se inicia la venta comercial de estos sistemas, lo que favoreció su desarrollo y la progresiva generalización de las aplicaciones en distintas disciplinas. Este hecho se vio favorecido por el fuerte crecimiento de la tecnología en el campo de la informática. La gran importancia de la cartografía en todas las disciplinas geológicas hace de los SIG herramientas prácticamente imprescindibles en este campo en la actualidad. En relación con la cartografía de amenazas, los SIG han supuesto una verdadera revolución, si bien no han resuelto algunos problemas esenciales (ver apartado 1.5.1.4).

Las ventajas e inconvenientes del uso de un SIG en comparación con otras técnicas convencionales han sido tratadas de forma amplia por Burrough (1986), Aronoff (1989), Carrara et al. (1990, 1995), van Westen (1993), Soeters y van Westen (1996), etc. Las principales ventajas incluyen:

- La velocidad de cálculo posibilita la realización de numerosos análisis complejos, puesto que el sistema permite cruzar muchos mapas y hacer muchas computaciones, fácil y rápidamente.
- La posibilidad de mejorar modelos, evaluando sus resultados y ajustando las variables. El usuario puede mejorar los resultados en un proceso de ensayo y error, ejecutando el modelo muchas veces.
- La información puede ser rápidamente actualizada.

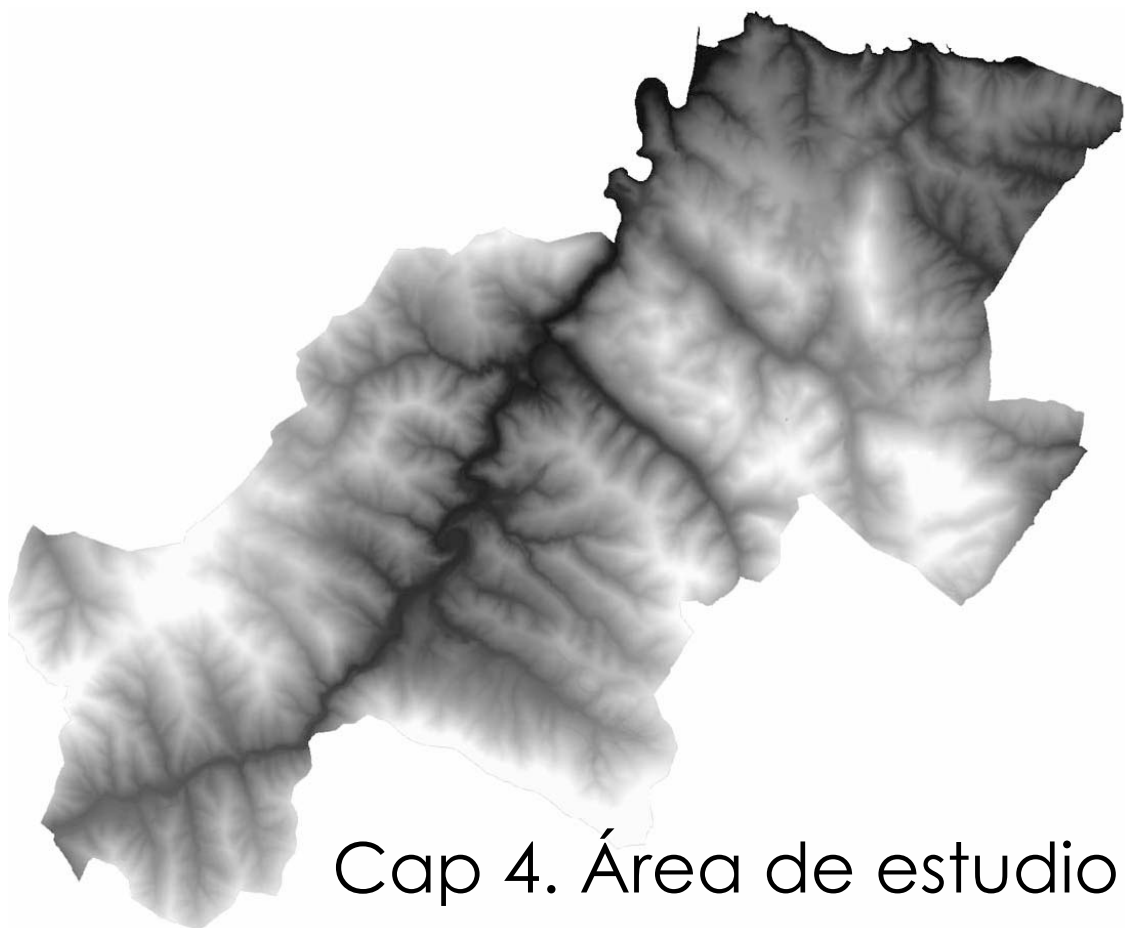
A pesar de las ventajas citadas, su utilización presenta dos grandes inconvenientes:

- El esfuerzo necesario para introducir los datos. El procedimiento más usual hoy por hoy es la digitalización de los mismos, que es un proceso largo y trabajoso.
- El riesgo inherente a la propia capacidad del sistema, que puede hacer que se dedique mucha energía al análisis de los datos, a expensas de la recogida de nuevos datos y del esfuerzo de interpretación de los mismos, basada en criterios y experiencia geomorfológicos.



En este trabajo se han empleado las aplicaciones Arc/Info<sup>®</sup> - ESRI (ESRI, 1994), ILWIS<sup>®</sup> - *Integrated Land and Water Information System* – ITC (ILWIS, 1997) y PCI-EASI/PACE<sup>®</sup> (EASI/PACE, 1997). Las dos primeras son sistemas de información geográfica convencionales, de estructura vectorial y matricial y con las capacidades típicas de los SIG. La tercera, por el contrario, es una aplicación de tratamiento de imágenes, con algunas capacidades vectoriales; sin embargo, es un sistema que gestiona mucho mejor y más rápidamente los modelos matriciales. La utilización de la aplicación “*Spatial Data Integration Software Package for Prediction Models*” (Chung et al., 1998), desarrollada sobre PCI-EASI/PACE, ha permitido generar un gran número de modelos, que con cualquiera de los otros dos SIG hubiera sido una tarea inviable.

En el tratamiento multivariable convencional se ha utilizado un programa SPSS<sup>®</sup> - (SPSS, 1999), que permite realizar todo el tratamiento estadístico necesario para generar una función discriminante.



Cap 4. Área de estudio





## 4. ÁREA DE ESTUDIO

### 4.1 Selección de las zonas de trabajo

Una vez definidos los objetivos del trabajo se ha seleccionado una zona de estudio en la que recoger los datos necesarios y aplicar la metodología de trabajo propuesta. En este capítulo se describe la naturaleza de la zona de estudio, así como de otras zonas (Figura 4.1) en las que se han realizado análisis complementarios, encaminados a contrastar el método o a ensayar su aplicabilidad en condiciones de práctica rutinaria.

La zona principal de estudio corresponde a la parte baja del valle del río Deva (en adelante, Bajo Deva), en concreto los municipios de Deva, Mendaro, Elgoibar y Eibar, en Guipúzcoa, que en total cubren una superficie de 140 km<sup>2</sup> (Figura 4.2). Esta zona constituye el ámbito geográfico en el que se ha desarrollado la mayor parte del trabajo, con la pretensión de obtener resultados en todos los objetivos planteados. Por ello, la recogida de información se ha llevado a cabo con detalle. Tanto el banco de datos, como la mayoría de los análisis y conclusiones que se presentan en esta memoria, se refieren a esta zona de estudio.

Las razones que han llevado a seleccionar esta zona son:

- La gran cantidad de deslizamientos, de diferentes tipos y tamaños, puesta de manifiesto por numerosos estudios previos (Tamés et al., 1986; Duque et al. 1990a, b, 1991) y la existencia de una razonable variedad litológica y de usos del suelo, junto con una estructura geológica relativamente sencilla, facilitan el establecimiento de correlaciones entre tales variables y los procesos de ladera. Eso hace que la zona sea, en principio, muy adecuada para la aplicación de técnicas estadísticas como las propuestas.



- La accidentada orografía de la zona, la alta pluviosidad (en ocasiones con altas intensidades) y la presencia de unidades geológicas y edafológicas proclives a deslizarse, condicionan la existencia de una importante problemática de amenazas en la zona.
- El elevado grado de antropización de la zona, por la que además transcurren las principales comunicaciones entre Vizcaya y Guipúzcoa, implica una situación de riesgo, que conviene evaluar. Además, la presión humana ha crecido extraordinariamente en la segunda mitad del pasado siglo, pudiendo estar influyendo en la dinámica de los procesos.
- La cantidad y calidad de la información cartográfica disponible en formato digital. Esta información ha sido elaborada por la Diputación Foral de Guipúzcoa y por el Gobierno Vasco (Tamés y Silva, 1996).
- La disponibilidad de doce series de vuelos de fotografías aéreas que abarcan desde 1954 a 1997.
- La existencia de cartografía temática previa sobre la zona, elaborada en parte en colaboración con el Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada (DCITIMAC) de la Universidad de Cantabria.

Además de esta zona, los procedimientos desarrollados se han aplicado en otras dos, con fines complementarios entre sí y con la anterior.

La primera de dichas zonas corresponde a parte de la cuenca del río Llobregat, La Pobla de Lillet, en el Pirineo Oriental, con una extensión aproximada de 40 km<sup>2</sup> (Figura 4.3). Esta zona, en la que ha trabajado el grupo de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) para el proyecto GISLYT, se ha utilizado para comparar la fiabilidad de las técnicas de análisis de susceptibilidad. En esta zona y en una parte del Bajo Deva se han aplicado tanto las técnicas de análisis discriminante

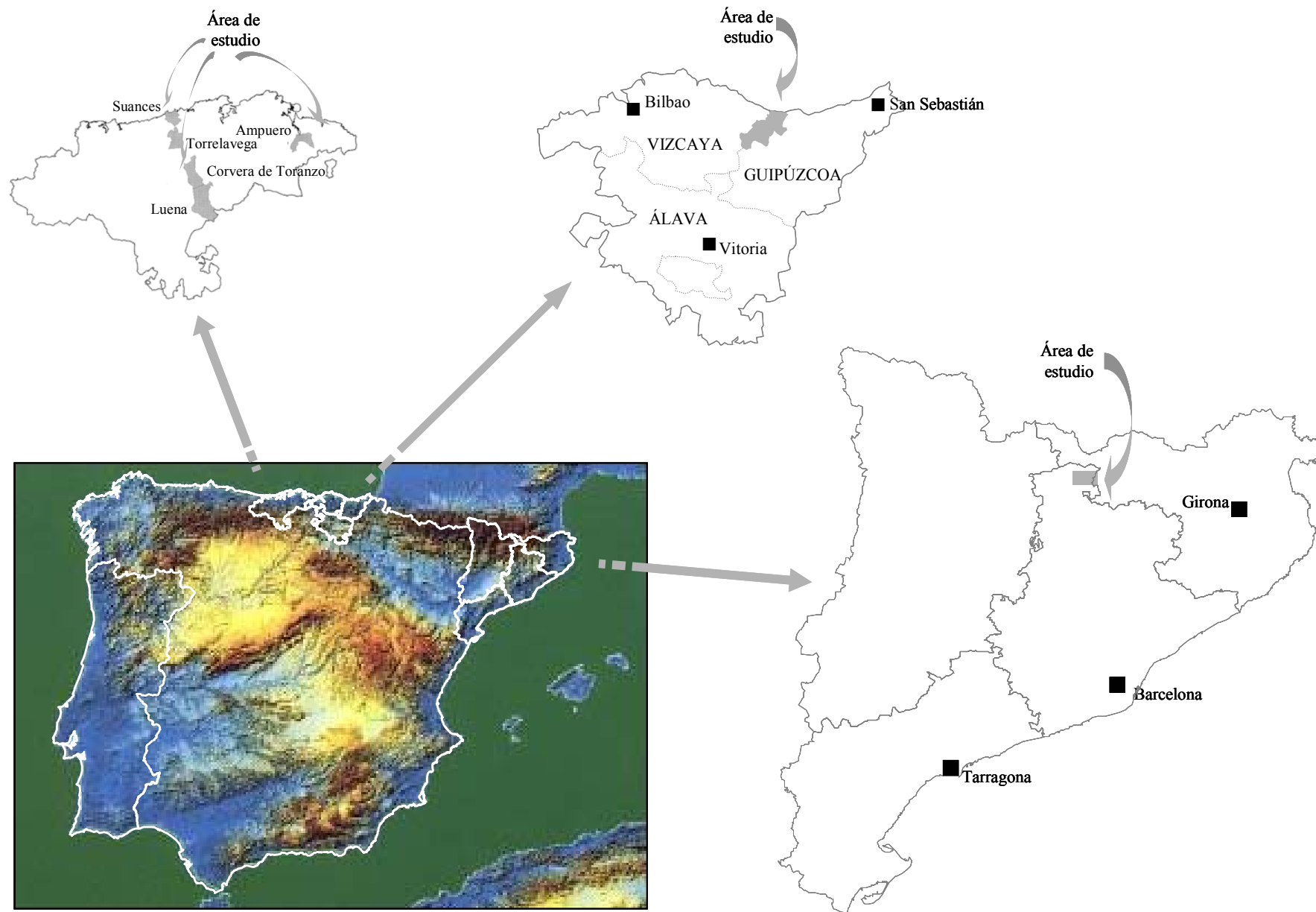
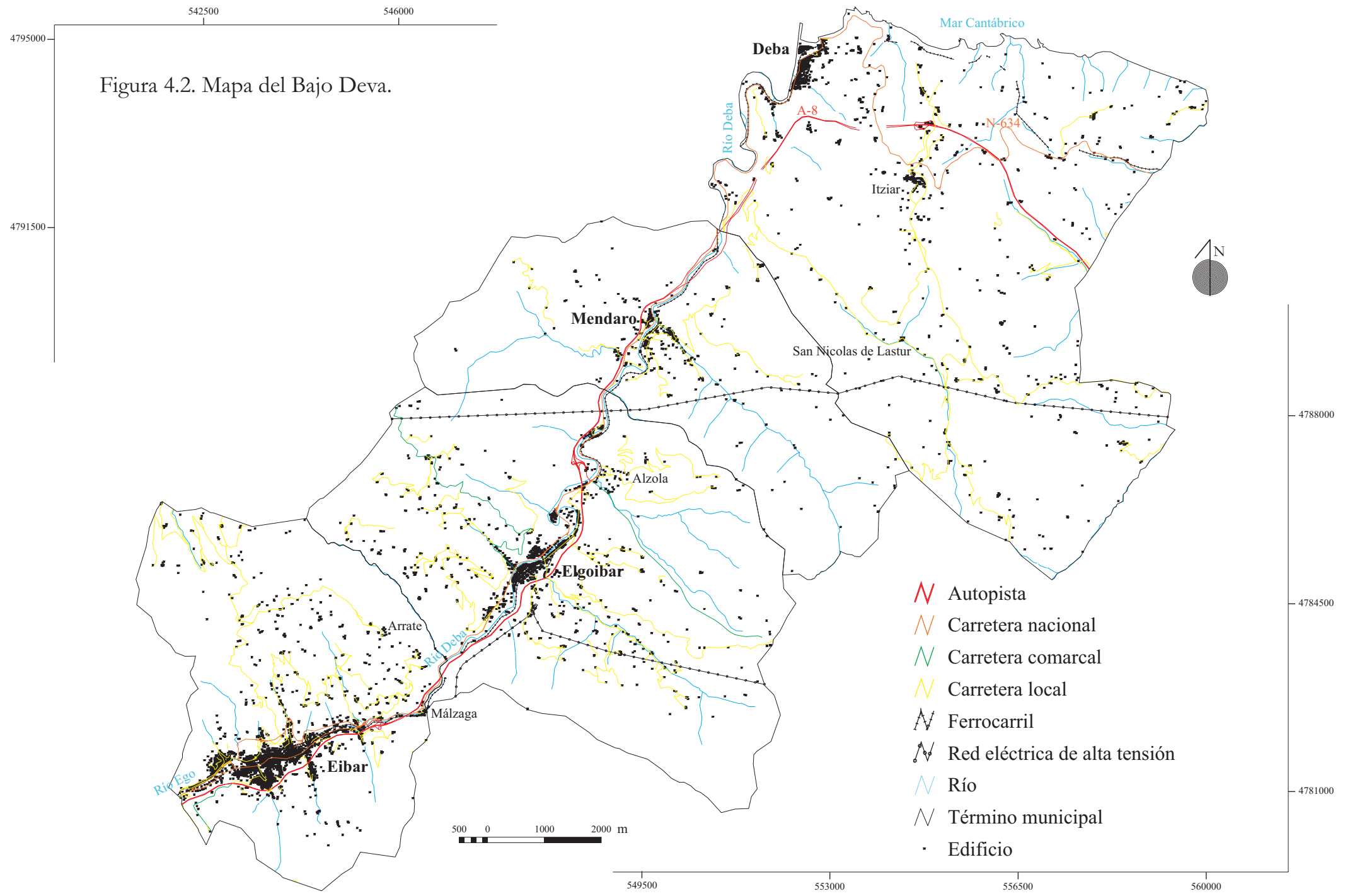


Figura 4.1. Situación de todas las zonas de estudio.

Figura 4.2. Mapa del Bajo Deva.



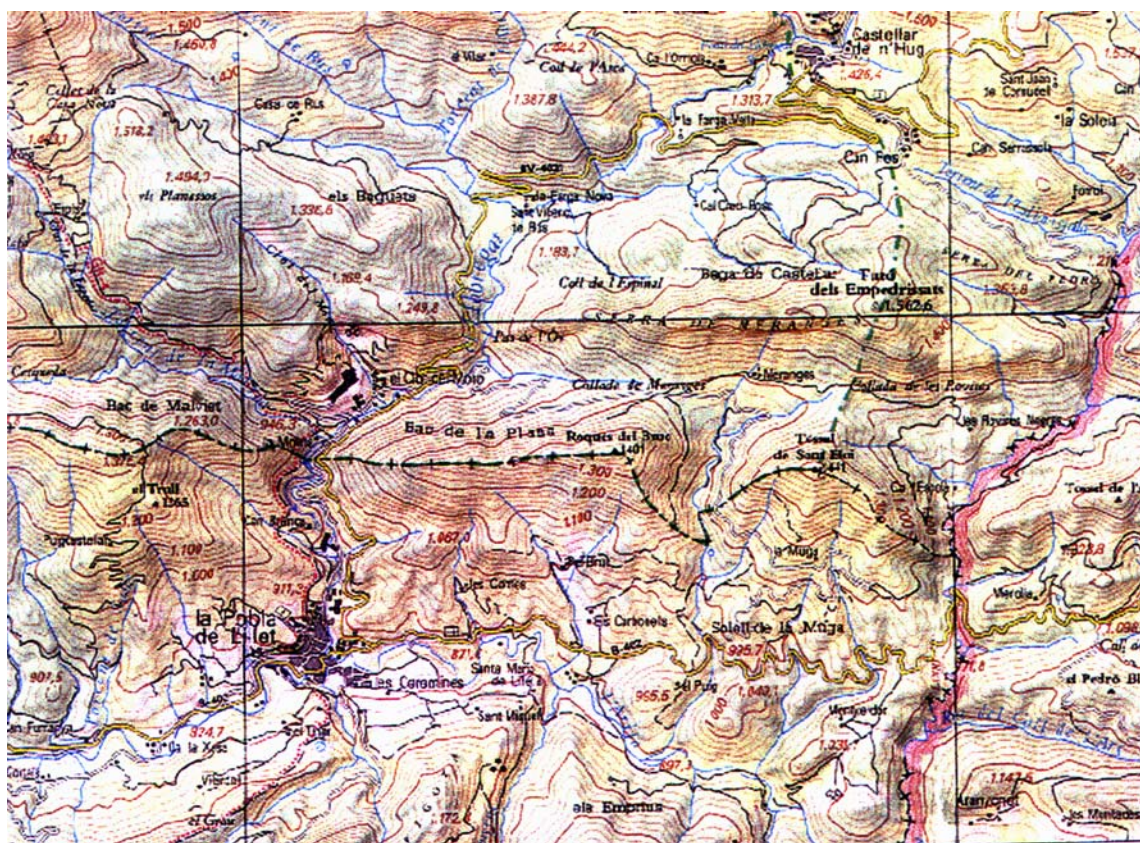


Figura 4.3. Mapa de situación de La Pobla de Lillet.

como las basadas en funciones de favorabilidad, con el fin de determinar la técnica analítica que mejores resultados proporciona.

La segunda zona comprende cinco municipios en diferentes comarcas de Cantabria (Figura 4.4): Corvera de Toranzo (50 km<sup>2</sup>) y Luena (90 km<sup>2</sup>), en el tramo medio del río Pas; Suances (25 km<sup>2</sup>), municipio costero; y Torrelavega (35 km<sup>2</sup>) y Ampuero (32 km<sup>2</sup>), situados en la parte central de la región costera (La Marina). En todos ellos se han realizado mapas de susceptibilidad, a diferentes escalas, mediante funciones de favorabilidad.

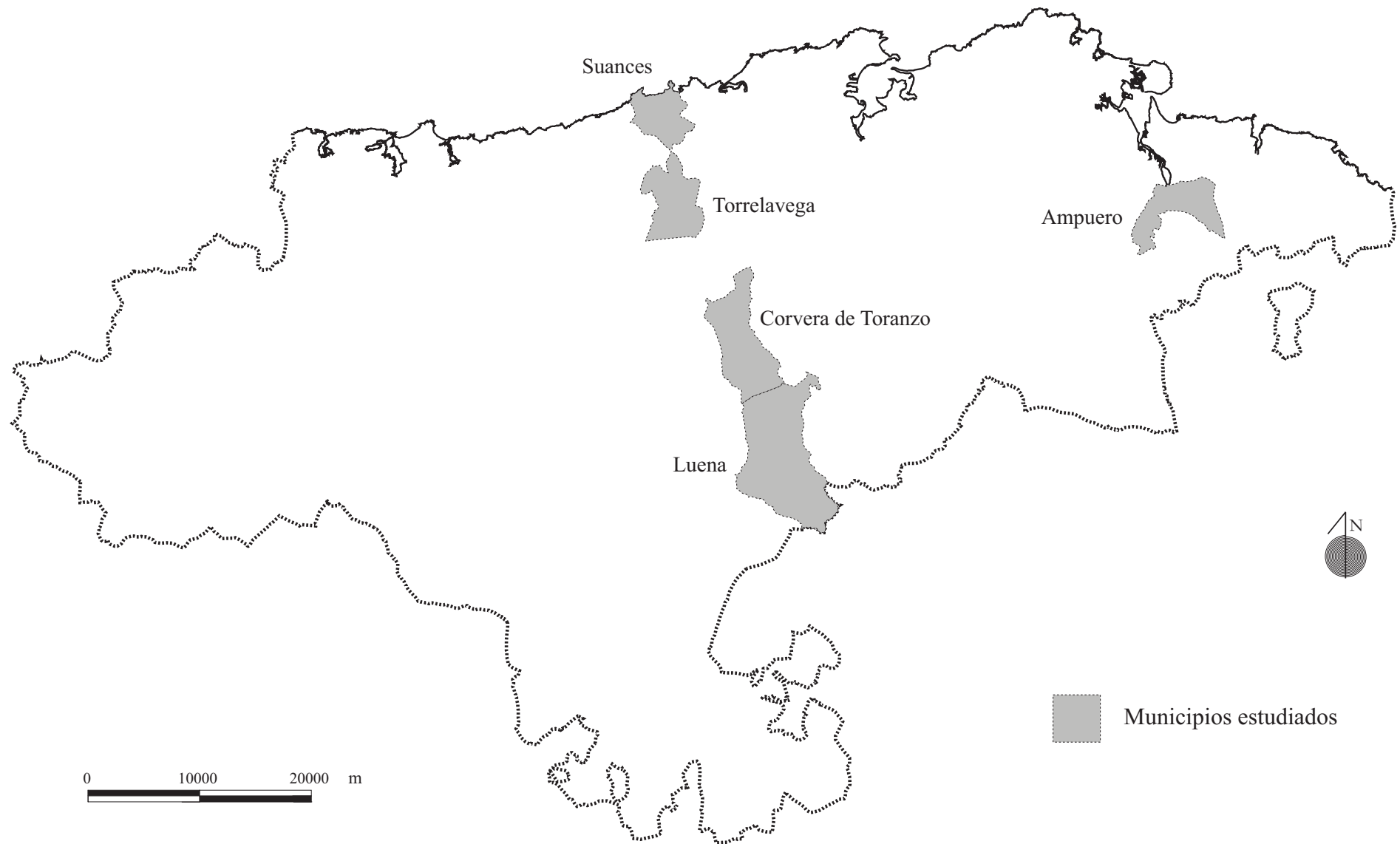
En los dos primeros se contaba con una cartografía de deslizamientos previamente elaborada (González Díez, 1995) y los otros tres, junto con éstos, se utilizaron a modo de área piloto para ensayar lo que pudiera corresponder a una aplicación rutinaria del



método en un proceso de análisis de riesgos que, lógicamente, no puede apoyarse en una recogida exhaustiva de datos, que implicaría un costo y tiempo excesivos.



Figura 4.4. Situación de los municipios estudiados en Cantabria.







## 4.2. Descripción general de las zonas

En este apartado se describen las características generales de las zonas estudiadas. Esta descripción, por razones obvias, es más detallada en el caso del Bajo Deva, en el que se han concentrado los esfuerzos de obtención de datos primarios. Las otras dos zonas, en las que se han realizado análisis parciales, se describen de forma más somera.

### 4.2.1 Bajo Deva

Se describen a continuación las características físicas principales de esta zona, con el fin de proporcionar un marco de referencia inicial. Los rasgos directamente relacionados con la ocurrencia de deslizamientos y que se han utilizado en el análisis, se describen de forma más detallada en el apartado relativo al banco de datos.

#### *Situación geográfica*

Esta área de estudio se encuentra situada en el extremo occidental de la provincia de Guipúzcoa (Territorio Histórico de Guipúzcoa), en el País Vasco y abarca la mayor parte del tramo inferior del valle del río Deva; está comprendida entre las coordenadas UTM 4779306-4795612 de latitud N y 540854-559840 de latitud O, y cubre una superficie de 140 km<sup>2</sup>.

La característica orográfica más destacada del área de estudio es, sin duda, su carácter montañoso. Se trata de una región de baja a media montaña, con cumbres comprendidas entre 400 y 900 m (máxima cota: Monte Iricurucheta, 895 m). La disposición general de las cumbres es ONO-ESE, siguiendo la estructura geológica.

El hecho de que los valles secundarios y los principales se corten en ángulos más o menos rectos, confiere al territorio una característica apariencia de laberinto de valles y



montes. Tanto el valle principal como los secundarios presentan laderas rectilíneas de bastante pendiente y fondos de valle muy pequeños; la pendiente promedio de la zona es de 22°.

La estrecha franja costera, al norte del municipio de Deva, presenta una rasa cortada en la costa por acantilados abruptos, de la que sobresalen colinas de poca altura y en la que se encajan pequeños ríos.

### *Encaadre climático*

La ubicación del área de estudio, a orillas del Mar Cantábrico, en el centro del Golfo de Vizcaya y en el entronque entre las vertientes norte de la Cordillera Cantábrica y los Pirineos, da lugar a unos rasgos climáticos de tipo templado (temperatura media anual de 13°) y húmedo (precipitación media anual de 1.300 mm), con inviernos suaves, veranos relativamente frescos, aire húmedo, abundante nubosidad y lluvias frecuentes en todas las estaciones. Esta condición climática está determinada por el dominio de los vientos del noroeste, norte y oeste, de origen atlántico. La situación típica se ve alterada esporádicamente por vientos procedentes del Sur, Este y Noreste, de origen continental y que implican una disminución de la humedad relativa del aire y variación de las temperaturas. El área quedaría englobada en lo que Capel (1981) denomina “dominio templado-frío” o “dominio oceánico”.

Las características básicas de este dominio son: precipitaciones abundantes durante todo el año, superiores a 1000 mm, con un máximo pluviométrico en otoño- invierno y un mínimo estival; régimen térmico oceánico, con temperaturas suaves y amplitud térmica anual reducida; radiación solar moderada, con presencia de alta nubosidad; aridez prácticamente inexistente o, en todo caso, muy moderada y estacional. Los episodios de lluvias intensas, especialmente importantes en relación con la ocurrencia de deslizamientos, son relativamente frecuentes (las tormentas de 60 y 100 mm/h tienen periodos de retorno, respectivamente de 2,3 y 10 años).

La exposición preferente a los vientos del noroeste juega un papel decisivo en las cantidades de precipitación, velocidad del viento y días de galerna. El factor orográfico determina asimismo la mayor nubosidad por estancamiento y la distribución local de la precipitación. En un estudio sobre el número de días de lluvia al año, se ha calculado que en el Bajo Deva llueve de promedio entre 120 y 180 días/año (Font, 1983).

En el área de estudio existen cuatro estaciones meteorológicas: Alzola, Mendaro, Elgoibar y Eibar. Para el caso de la estación de Eibar existe una serie de datos diarios (temperatura y precipitaciones) que abarcan un periodo superior a 50 años. Todas estas series han sido calibradas con las del observatorio del monte Igueldo (San Sebastián), caracterizado por tener registros continuos desde hace más de 25 años (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1999). Asimismo, en los últimos diez años se han ido instalando sistemas de registro continuo en las cuatro estaciones del área de estudio.

### *Geología*

La zona de estudio se incluye en la denominada Cordillera Vasco-Cantábrica o Pirineo Vasco-Cantábrico, que es una Cadena Alpina situada en el borde septentrional de la Placa Ibérica, prolongación occidental de la Cadena Pirenaica. El zócalo de la Cadena Pirenaica está constituido por un substrato ígneo-metamórfico de edad hercínica, representado en la región del País Vasco por los Macizos de Cinco Villas y Aldudes. La estructura general del Pirineo Vasco-Cantábrico se asemeja a la de un prisma de acreción engrosado hacia el norte, congruente con la existencia de una zona de subducción en el borde norte de la Placa Ibérica (Deregnaucourt y Boillot, 1982) que provoca el hundimiento de la corteza oceánica del Golfo de Vizcaya bajo el margen ibérico septentrional. La Cuenca Vasco-Cantábrica, a la que pertenece el Deva, está constituida por materiales mesozoicos y cenozoicos, entre los que son frecuentes las litologías poco competentes, proclives a sufrir deslizamientos.



Los materiales de la Cadena Vasco-Cantábrica se subdividen según pertenezcan a la rama norte, en la que la vergencia es hacia el norte, o la rama sur con vergencia hacia el sur. La rama norte (Figura 4.5) está representada por los denominados Dominio de Arco Vasco (entre la falla de Bilbao por el sur, y el mar Cantábrico por el norte) y Dominio de la Plataforma Alavesa - Anticlinorio de Bilbao separados ambos por la falla de Bilbao y diferenciados entre sí por criterios estructurales, estratigráficos y sedimentológicos. En el Arco Vasco las series del Cretácico Superior y del Terciario son potentes y corresponden a sedimentos en surcos sedimentarios profundos. En el Bloque Alavés, por el contrario, las series del Cretácico Superior y del Terciario presentan potencias moderadas y representan depósitos de plataforma continental somera (Rat, 1988).

Desde este punto de vista, la zona de estudio se enclava en el Dominio del Arco Vasco (Feuillée y Rat, 1971), en el que afloran dos grandes estructuras: El Sinclinorio Vizcaíno y La Banda Alóctona de Lequeitio-Tolosa. Ambos sectores están separados por la Falla de Azcoitia (entre Elgoibar y Mendaro), de dirección N 125° E (Cuevas et al., 1999).

El Sinclinorio Vizcaíno está constituido por un conjunto de materiales del Cretácico Superior – Eoceno (Figura 4.6), que se extienden entre el anticlinal de Aralar por el sur y la falla de Leiza por el norte. Lateralmente se sigue desde el norte de Bilbao hasta las proximidades de Amezketta, siguiendo las directrices tectónicas regionales (ONO-ESE). El eje del sinclinal cabecea ligeramente hacia el noroeste. El sinclinal (en la zona noroeste de Eibar, ya en Vizcaya) presenta una fuerte asimetría, con el flanco sur verticalizado, laminado, cabalgado y corrido hacia el norte (Figura 4.7). El flanco norte se presenta más horizontalizado y suave, y la secuencia cretácico - terciaria es más completa y representativa. El cierre del sinclinal (desde Eibar a Zumárraga), donde se observa un importante engrosamiento de las capas, está formado por materiales volcánicos y/o volcanoclásticos del Cretácico Superior, y por las series detríticas y carbonatadas del Paleógeno.

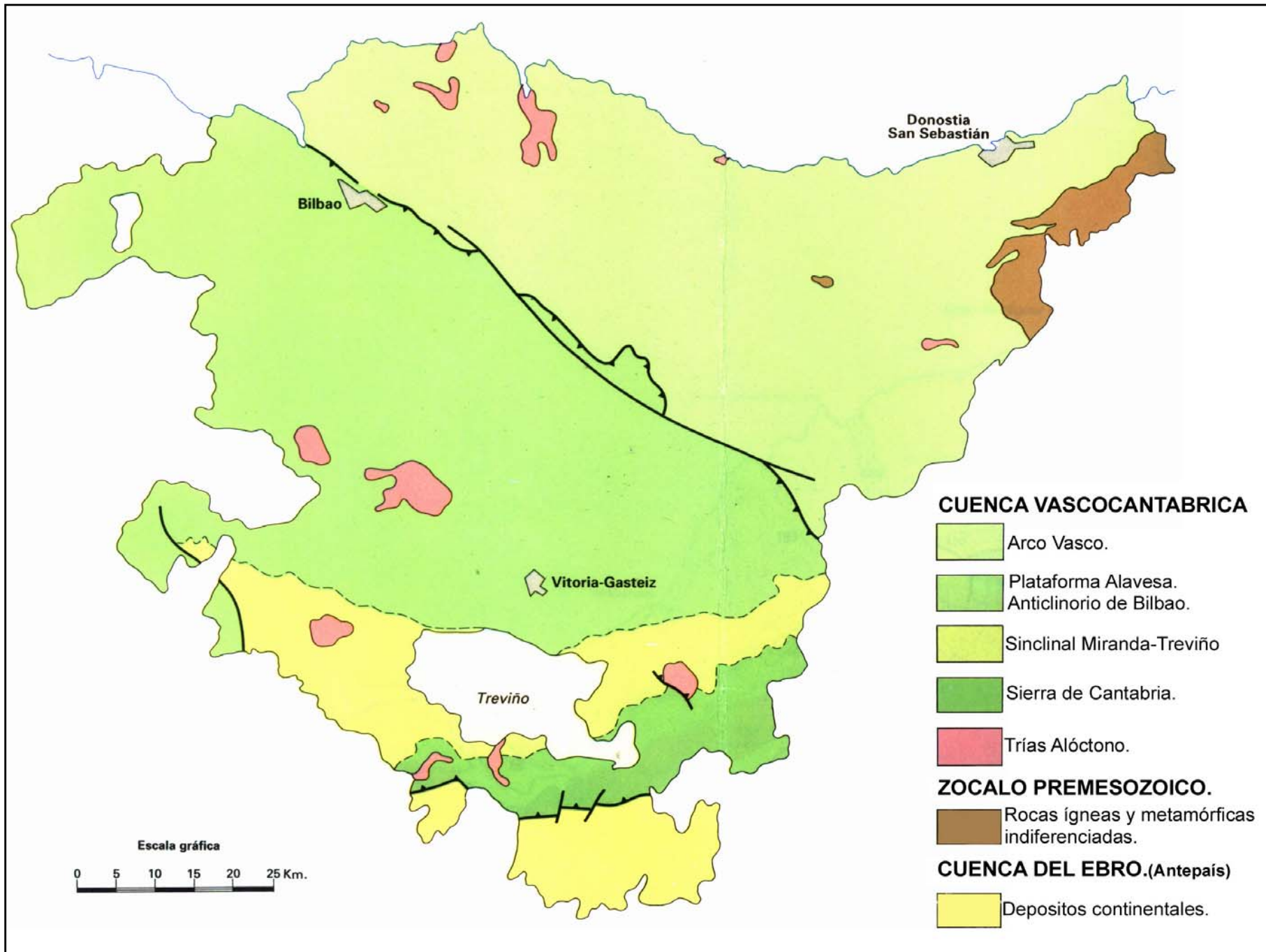


Figura 4.5. Dominios geológicos del País Vasco (EVE, 1995).

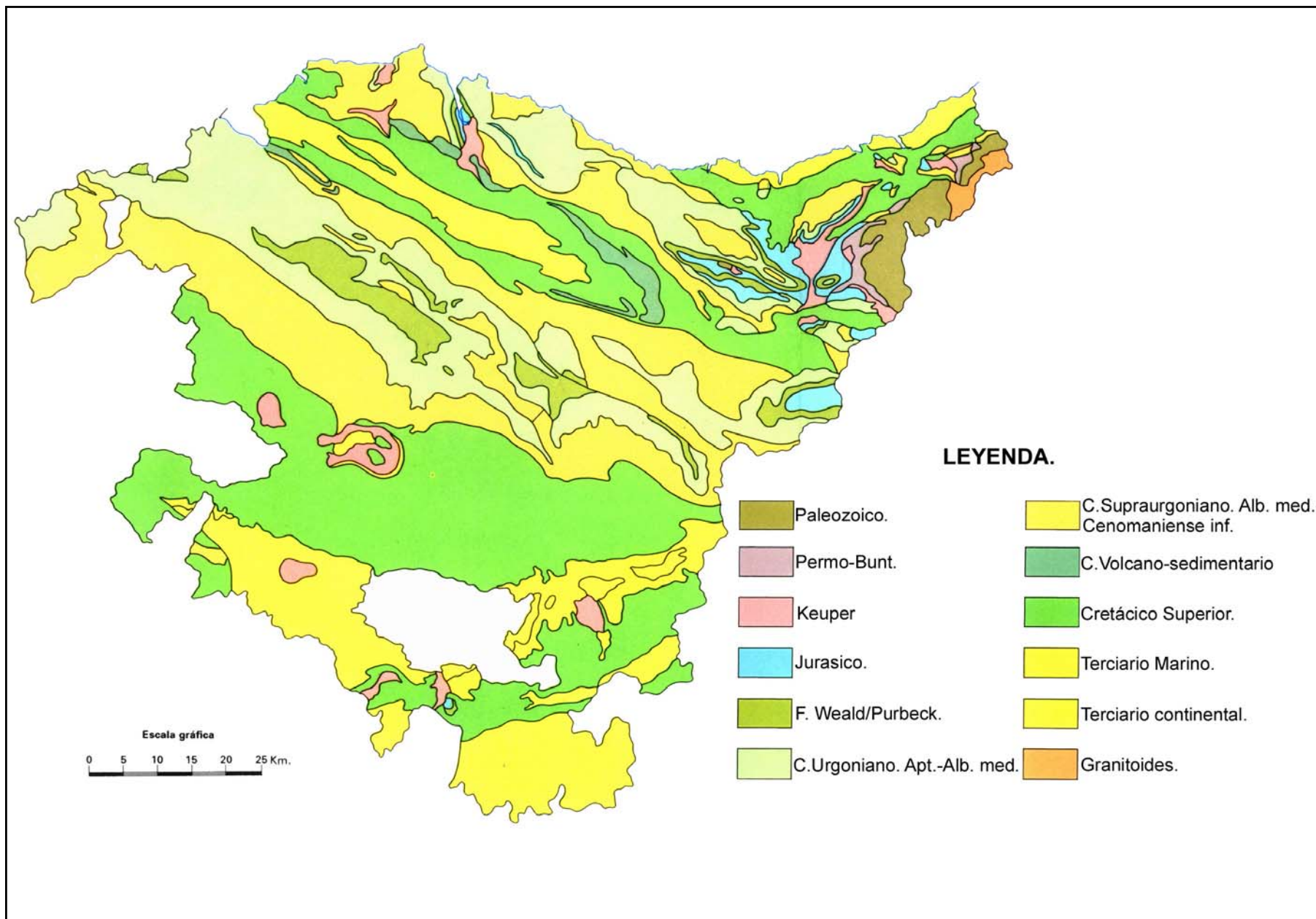


Figura 4.6. Esquema estratigráfico del País Vasco (EVE, 1995).



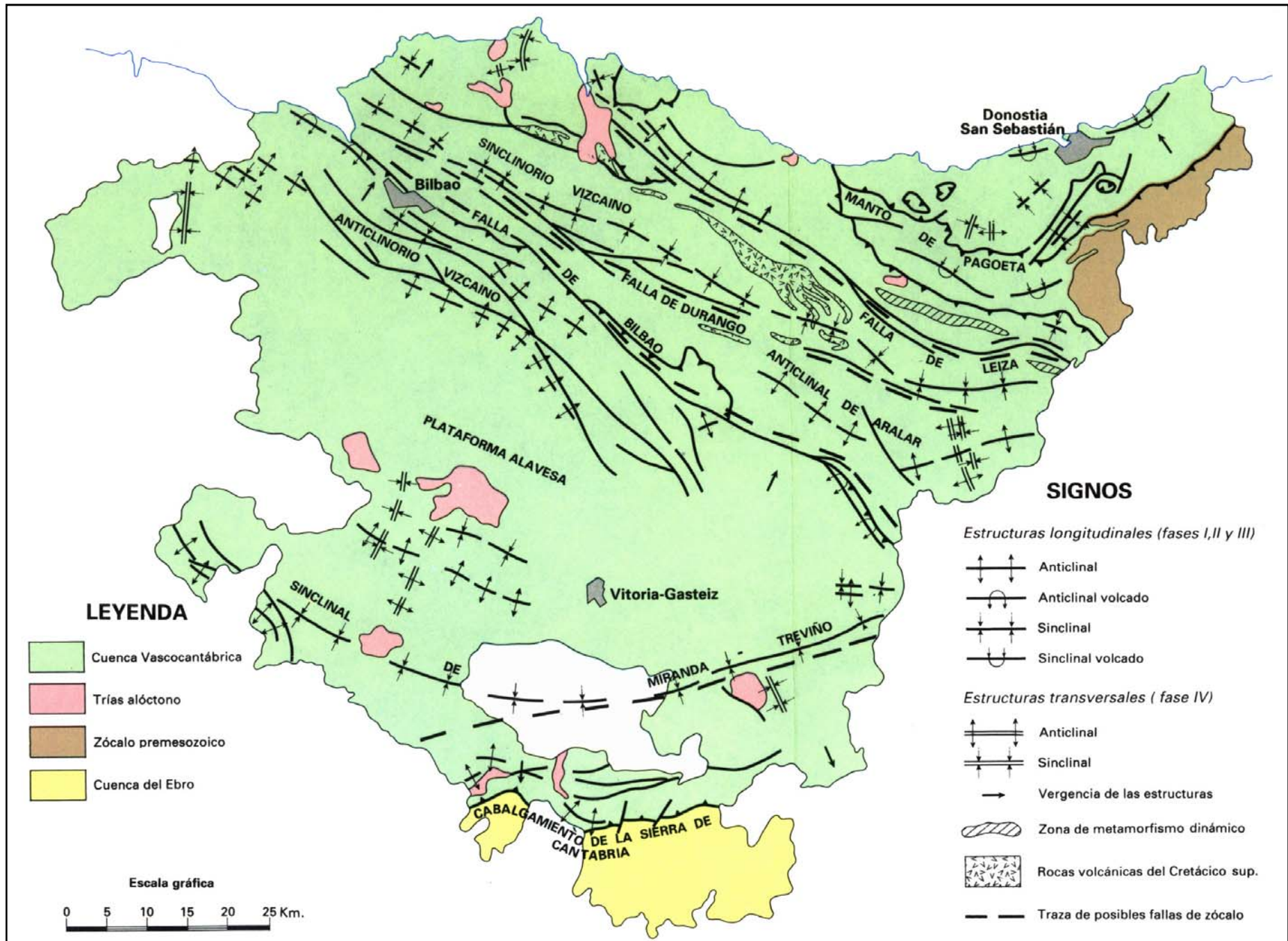


Figura 4.7. Esquema estructural del País Vasco (EVE, 1995).





La banda alóctona de Lekeitio – Tolosa se extiende inmediatamente al norte de la falla de Leiza y en concreto al norte de la rama sur de su prolongación (falla de Azcoitia) que pasa por Elgoibar; está constituida por una serie de unidades tectónicas apiladas hacia el norte. El elemento estructural principal es la falla inversa, continuación del Cabalgamiento de Pagoeta (al NE de Itziar), que posiblemente enraíza en la falla de Leiza. Al sur del frente de cabalgamiento afloran materiales del complejo Urgoniano y Supraurgoniano, que se interpretan como una unidad alóctona desplazada hacia el norte. La estructura de esta unidad es compleja y corresponde, en su conjunto, a un sinclinal isoclinal vergente hacia el norte.

La zona de estudio del Bajo Deva es precisamente donde están mejor representadas las estructuras y sucesiones estratigráficas más significativas del Arco Vasco, con la excepción de que en el área no existe ninguna estructura diapírica (Cuevas et al., 1999). Desde un punto de vista litológico, está constituida por diversos tipos de calizas, margas, areniscas, argilitas, facies de tipo flysch y rocas volcánicas. En la Figura 4.8, se presenta un corte geológico general, aproximadamente perpendicular a la estructura.

Las directrices estructurales predominantes en la zona, tal como se ha indicado, son ONO-ESE. Estas directrices se manifiestan en la morfología general de los valles y las orientaciones predominantes de las laderas, así como en las direcciones de las fracturas que afectan a las diferentes unidades litológicas. Estas fracturas, en principio, pueden constituir factores condicionantes de los deslizamientos; no obstante, dado el carácter superficial de la mayoría de los movimientos encontrados, que normalmente no afectan al substrato, ese factor no parece ser significativo en nuestro caso.

La constitución actual de la Cadena Vasco-Cantábrica responde a una serie de procesos acaecidos durante el Mesozoico y Cenozoico, relacionados con la evolución geodinámica de la Placa Ibérica. Los procesos sedimentarios se relacionan con la deriva de la Placa Ibérica durante la apertura atlántica, y con los movimientos diferenciales de ésta respecto a la Placa Europea. Existen diversos trabajos relacionados con la evolución tecto-sedimentaria de la cuenca, entre los que destacan Rat (1983, 1988) y



García Mondejar (1983). La condición de zona de transición de esta comarca, determinada por la evolución geológica brevemente expuesta, ha dado lugar a la diversidad y complejidad litológicas que presenta.

Descripciones detalladas de las características geológicas de este área se presentan en el Mapa Geológico del País Vasco a Escala 1:100.000 (EVE, 1995), en el Mapa Geológico del País Vasco a Escala 1:25.000 (EVE, 1989a, b, c, 1991) y, en el Mapa Hidrogeológico del País Vasco a Escala 1:100.000 (EVE, 1996).

### *Hidrología*

El río Deva nace en la sierra de Elguea (en el pico Aitzgorri, 1.555 m) y tiene una cuenca de drenaje de 538 km<sup>2</sup>, un recorrido de 62 km y una pendiente media del 13%. La traza del río, en general rectilínea, es perpendicular a la estructura geológica, mientras que la red secundaria es paralela a la misma (red fluvial subsecuente).

De acuerdo con Cruz y Tamés (1983), la relación de bifurcación de la cuenca del río Deva es 4,34 según el método de Horton y 4,6 según el de Schumm-Strahler, lo que indica una torrencialidad moderadamente alta; presenta una baja densidad de drenaje, que se explica por la abundante vegetación y por la existencia de calizas carstificadas muy permeables. El valor de la frecuencia de cauces de primer orden es de 3,02 propio de regiones con disección moderada.

Parte del área de estudio, la banda costera, esta constituida por cuencas de muy pequeño tamaño que vierten directamente al mar, con recorridos no superiores a tres kilómetros.

El régimen de flujo es muy variable, siendo muy caudaloso en épocas invernales y sufriendo fuertes estiajes en verano y principios de otoño, que se ven incrementados por con numerosas captaciones para uso urbano e industrial. Las características

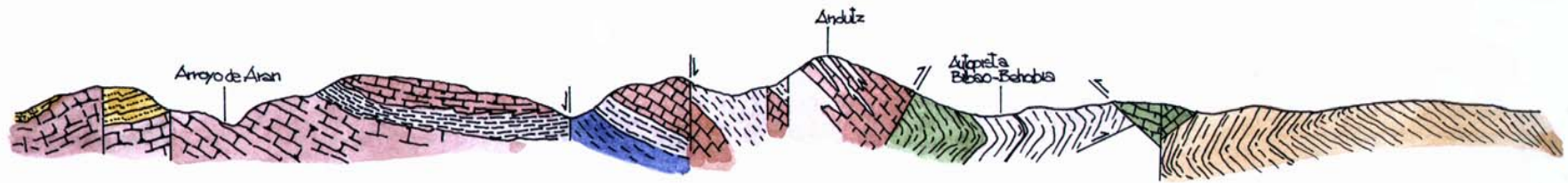
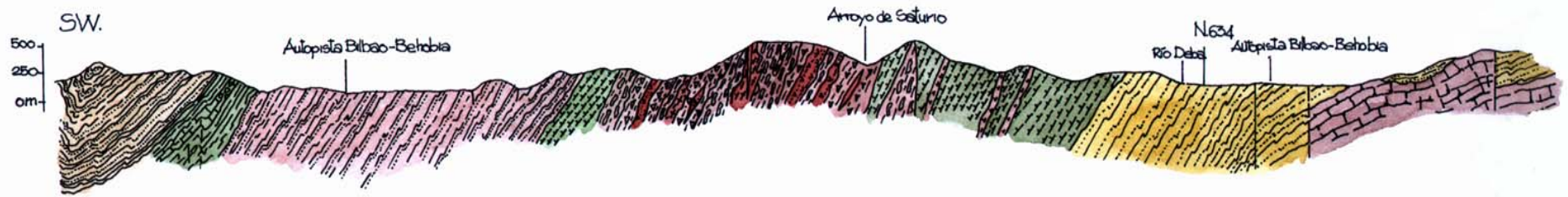


Figura 4.8. Corte geológico general del Bajo Deva.



hidrológicas están marcadas por la fuerte torrencialidad, consecuencia de la elevada precipitación y del predominio de los materiales poco permeables; esto provoca una escasa regulación de los caudales, produciéndose de forma periódica grandes avenidas que ocasionan inundaciones, y épocas de sequía. Aproximadamente el 50% de las precipitaciones pasan a formar parte de los ríos o se infiltran, mientras que el resto se evapora o lo utilizan las plantas (Tamés, Patxi: comunicación personal).

Entre las unidades litológicas que constituyen acuíferos en la zona, tiene interés desde el punto de vista de este análisis la correspondiente al Complejo volcano-sedimentario cretácico-terciario, que se comporta como un acuífero superficial no confinado. Esta unidad, en condiciones próximas a la saturación, experimenta con relativa facilidad deslizamientos superficiales.

Por último, cabe señalar que el río Deva se ha desbordado en diversas ocasiones en las últimas décadas, provocando grandes pérdidas, especialmente en las localidades de Elgoibar, Eibar y Mendaro. Algunos ejemplos de inundaciones en la zona son las de julio de 1977, las de diciembre de 1980 o las de septiembre de 1983 (Ayala et al, 1988). No sorprendentemente, estos episodios coinciden también con la ocurrencia de numerosos deslizamientos superficiales.

### *Suelos*

Las condiciones climáticas de esta zona, expuestas anteriormente, ponen de manifiesto la existencia de una intensa meteorización, que provoca que los procesos de edafización sean muy intensos. Así, de acuerdo con los datos climáticos existentes, el régimen de meteorización corresponde a una alteración química de fuerte a moderada, con acción de las heladas insignificante (Peltier, 1950).

Los suelos en la mayor parte de la zona presentan espesores reducidos, normalmente de unos decímetros para los horizontes A+B. Si se considera también el horizonte C,



el espesor no suele sobrepasar los 2,5 m. Este material es el que constituye el regolito de la mayor parte de la zona; en algunas laderas el regolito, constituido por depósitos de tipo coluvial, presenta espesores mayores, pero esto no es frecuente.

Cuando las pendientes son acusadas, los suelos son muy delgados, llegando a faltar el horizonte B en muchas ocasiones. Con pendientes más suaves, los suelos frecuentemente presentan un drenaje imperfecto, que favorece la erosión por deslizamientos.

Una descripción y cartografía detalladas de los suelos existentes en el área se encuentra en el Estudio Edafológico de Guipúzcoa realizado a escala 1:25.000 (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1987).

#### *Vegetación y usos del suelo*

La vegetación de la zona se encuentra dominada por el componente eurosiberiano (Región Eurosiberiana, Superprovincia Atlántica, Provincia Cántabro Atlántica, Sector Cántabro-Euskaldun; Rivas-Martínez, 1987). Las formaciones que potencialmente cubrirían el área serían los bosques mixtos de frondosas. El área de estudio corresponde al piso colino, en el que se encuentra el bosque mixto, con el roble (*Quercus robur*) como especie dominante, acompañada de otras especies como el fresno y el arce, y el robledal acidófilo de roble pedunculado. En las zonas en las que el substrato rocoso está formado por calizas masivas, aparecen los encinares cantábricos (*Quercus ilex*), adaptados a las condiciones de falta humedad edáfica. Se puede señalar también la existencia de marojales sobre rocas silíceas con escaso desarrollo de suelo y normalmente situados en solana. La vegetación característica de las riberas de los cursos de aguas son las alisedas, mientras que en la zona del estuario aparece la vegetación propia de las marismas.

Sin embargo, la situación actual difiere en gran medida de la potencial. La actividad humana ha transformado el medio, reduciendo la superficie de las formaciones

climáticas e implantando otras formaciones. Así, los robledales casi han desaparecido, habiendo sido sustituidos por praderas, cultivos y pastos. En las últimas décadas han aumentado las plantaciones de coníferas exóticas (sobre todo *Pinus radiata*), instaladas principalmente en terrenos donde se ha abandonado el uso agropecuario y en zonas de alta pendiente sometidas a deslizamientos. Hoy en día (Figuras 4.9 y 4.10) el paisaje vegetal se encuentra dominado por la campiña, formada por un mosaico de praderas y pequeños bosques de pinos, con algunos bosquetes y setos de especies autóctonas; los encinares, por el contrario, sí se han conservado.

En conjunto, nos encontramos con una cobertera vegetal fuertemente transformada a lo largo de las últimas cinco décadas, en las que la vegetación natural, especialmente la parte arbórea, casi ha desaparecido (salvo sobre las calizas) y ha sido sustituida por praderías y pinares. A su vez, en tiempos recientes muchas praderías, especialmente en zonas de pendientes medias o acusadas, han sido sustituidas por pinares. Estos cambios en la cobertera vegetal han influido en la ocurrencia de deslizamientos superficiales, tal como se comenta más adelante.

### *Características geomorfológicas*

Son escasos los estudios geomorfológicos sobre esta zona; el único que se ha encontrado que presenta una cartografía de un cierto nivel de detalle es el Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1986b); una descripción geomorfológica general de la provincia se encuentra en Diputación Foral de Guipúzcoa (1991). Por otro lado, existen una serie de trabajos detallados sobre riesgos naturales que incluyen distintos tipos de análisis sobre los deslizamientos:

- Estudio de Riesgos Naturales del Territorio de Guipúzcoa (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1986a). Se trata de una cartografía de riesgos naturales, por municipios, a escala 1:5.000 y de un inventario de movimientos en masa, originalmente diseñados para la prevención de riesgos a escala municipal.
- Una serie de trabajos de contrastación de los mapas arriba indicados, que incluyen un inventario de movimientos (Duque et al., 1990a,b y 1991). En estos trabajos se



han identificado 72 movimientos en Deva, 35 en Mendaro, 169 en Elgoibar y 46 en Eibar.

- Un trabajo sobre los grandes deslizamientos costeros de la zona (Salazar y Ortega, 1990).
- Un inventario de movimientos en masa del IGME, en el que se han identificado 110 movimientos en masa (Ayala et al., 1988).
- Un trabajo de Del Val et al. (1996) sobre la problemática de los deslizamientos en el País Vasco.

La información contenida en estos trabajos ha servido de punto de partida para el inventario de movimientos realizado en la zona de estudio, en el cual se han identificado más de 2700, la gran mayoría de ellos no registrados previamente.

El rasgo geomorfológico característico de la zona son los valles fluviales medianamente encajados. La red fluvial aparece bastante controlada por la estructura y la litología. El valle principal del Deva presenta vertientes de perfiles bastante rectilíneos, con pendientes que normalmente superan los 25°, escaso desarrollo de la llanura aluvial y casi inexistencia de terrazas. Las laderas son del tipo dominado por el transporte y normalmente presentan recubrimientos que oscilan entre 0,5 y 3 m de espesor. Estas características son todavía más acusadas en el caso de los valles tributarios, en los cuales la llanura aluvial prácticamente no existe y las vertientes, igualmente rectilíneas, presentan gradientes más acusados. Los pequeños valles tributarios presentan en general un cierto salto en su confluencia con el Deva, lo que denota que el último episodio de encajamiento de éste debe ser relativamente reciente, ya que ese encajamiento no se ha manifestado aún en los afluentes.

En conjunto, la evolución del relieve en la zona parece estar determinada por la cadena de procesos encajamiento fluvial – deslizamientos – erosión y arrastre de los materiales movilizados. Es decir, los deslizamientos que afectan a las vertientes parecen ser un mecanismo de denudación fundamental en la zona.





Figura 4.9. Paisaje típico del valle del Deva, dominado por la campiña, formado por un mosaico de praderas y pequeños bosques de pinos.



Figura 4.10. Vista panorámica de todo el Bajo Deva, desde Eibar hasta el mar. Fotografía tomada desde Arrate.



Un rasgo destacable del área próxima a la costa es la presencia de rasas, de las que actualmente sólo se conservan algunos retazos, de alturas que oscilan entre 10 y 200 m sobre el actual nivel del mar (Salazar y Ortega, 1990). El escaso desarrollo que presentan las rasas en comparación con otras zonas del litoral cantábrico, tanto hacia el E como el O, así como el gran desarrollo de la plataforma de abrasión actual en este sector de la costa, son consecuencia de la abundancia de unidades litológicas fácilmente erosionables como es el caso del flysch cretácico-eoceno. Ese mismo condicionante litológico determina la aparición de grandes deslizamientos profundos en la zona costera. Dichos deslizamientos, propiciados por el socavamiento por acción del oleaje, presentan una alta actividad y son bien conocidos los problemas que originan, prácticamente todos los años, en las vías de comunicación. Según del Val et al. (1996), la carretera N-I, a lo largo del curso del Deva, especialmente entre las poblaciones de Deva y Mendaro, así como los dos primeros kilómetros de la GI-2636, entre Elgoibar y Marquina, están entre los puntos más conflictivos del País Vasco, en cuanto a riesgos de deslizamientos.

En la parte norte de la zona, sobre calizas urgonianas, aparecen ampliamente desarrolladas formas cársticas superficiales y subterráneas. Asimismo, en las áreas con predominio de litologías volcánicas, son frecuentes las superficies estructurales debidas a la resistencia diferencial a la erosión.

En conjunto, el proceso geomorfológico más activo en este valle son los movimientos en masa, en particular los que afectan al regolito. La amplia distribución y frecuencia de estos pequeños movimientos están determinadas por los factores más arriba descritos: presencia de litologías poco competentes, procesos de meteorización intensos y cobertera de regolito generalizada, alta pluviosidad con frecuentes episodios de elevada intensidad, encajamiento de la red fluvial, cambios recientes en la cobertera vegetal, etc. Estas características se reflejan, por ejemplo, en el hecho de que esta zona aparezca en los análisis de peligrosidad y riesgo para este proceso presentados por Ayala et al. (1987) como de riesgo “moderado” (nivel 3 de 4).



### 4.3. La Pobla de Lillet

Esta zona de estudio corresponde a un área de la cuenca alta del río Llobregat (Comarca del Berguedà), situada geográficamente en el sector meridional del Prepirineo Oriental, cubriendo una extensión de aproximadamente 40 Km<sup>2</sup>.

Las litologías que afloran en el área son de carácter eminentemente carbonatado, con edades que van desde el Devónico Medio hasta el Eoceno Medio; éstas se distribuyen en diferentes unidades estructurales (Unidad del Cadí y Manto del Pedraforca) caracterizadas por una tectónica alpina, con direcciones E-O.

Los materiales presentes en esta zona son los siguientes (ITGE, 1994; Busquets, 1981; Clotet, 1984):

- Devónico Medio-Superior: es un conjunto carbonatado, formado por una alternancia de calizas (micríticas y nodulosas) y lutitas carbonatadas.
- Pérmico: constituido por lutitas rojas, areniscas y conglomerados de origen continental.
- Triásico (Germánico): está representado por conglomerados, areniscas y lutitas en facies Buntsandstein.
- Cretácico Superior-Paleoceno (Garumniense): sucesión continental formada por arcillitas, limolitas y areniscas rojas con intercalaciones de calizas lacustres.
- Eoceno Inferior: formado por una unidad detrítica de calizas y areniscas carbonatadas, margas y limolitas (Fm. Coronas inferior y media), y una unidad de calizas micríticas (Fm. Coronas superior). Por encima de éstas aparece una de las formaciones mejor representadas en la zona (Fm. de Armànçies) compuesta por margas nodulosas con intercalaciones calcáreas.
- Eoceno Medio: constituido por margas azuladas, niveles de areniscas de tipo turbidítico y lentejones de yesos.

- Pleistoceno-Holoceno: Los materiales cuaternarios que recubren parcialmente la zona de estudio, son depósitos de origen fluvial o ligados a procesos de ladera. Los materiales coluviales se caracterizan por ser depósitos heterométricos de bloques y gravas con abundante matriz limo-arcillosa.
- La distribución de los deslizamientos en esta zona está controlada por la morfología, las condiciones hidrológicas (en parte dependientes de la anterior) y la litología.

Los deslizamientos superficiales objeto de estudio afectan sobre todo a las formaciones cuaternarias de tipo coluvial y, en menor medida, a los niveles meteorizados de las argilitas del Permotriás y del Cretácico Superior y a las turbiditas del Eoceno.

Descripciones más detalladas de esta zona se han presentado por Corominas y Baeza (1991), Baeza (1994) y Santacana et al. (2001). El análisis realizado en esta zona y que se presenta más adelante se ha llevado a cabo utilizando datos de estos autores.



## 4.4. Municipios de Cantabria

En Cantabria se han estudiado cinco municipios: Suances, Ampuero, Corvera de Toranzo, Luenta y Torrelavega. Todos ellos se caracterizan por estar afectados intensamente por riesgos naturales, bien sea por la naturaleza del proceso, bien por su alta densidad de población. En conjunto son representativos de la problemática en cuanto a riesgos naturales en la región.

Los municipios de Corvera de Toranzo y Luenta están situados en la parte alta del valle del río Pas, correspondiente a la zona montañosa del interior de la región, con laderas de fuertes pendientes, mientras que los demás municipios se encuentran en la zona costera, por lo que presentan pendientes mucho más suaves; Torrelavega y Suances, se localizan en el tramo bajo del río Saja-Besaya y Ampuero en la parte baja del río Asón. Todos estos ríos tienen una dirección perpendicular a la estructura geológica y circulan en sentido S-N.

Desde el punto de vista climatológico, geológico, edafológico, de vegetación y usos del suelo, las características de estos municipios son, en conjunto, bastante similares a las descritas para el área del Bajo Deva.

De acuerdo con ITGE (1990) los materiales son fundamentalmente del Cretácico, predominando las areniscas y lutitas de la Facies Weald (Corvera, Luenta, Torrelavega y Ampuero) y las calizas urgonianas (Ampuero, Torrelavega). El municipio de Suances está constituido por margas, calizas, areniscas y lutitas del Cretácico Superior. Los depósitos superficiales, fundamentalmente de origen fluvial, ocupan las llanuras aluviales, generalmente de gran extensión, como sucede en el municipio de Torrelavega. Otros tipos de depósitos y regolitos de alteración cubren la práctica totalidad del terreno.

Los prados y pastos, el matorral, los eucaliptales de repoblación, y los robledales y encinares constituyen la vegetación predominante. La actividad humana es relativamente intensa en los municipios de la zona costera (especialmente en el caso de Torrelavega), mientras que es más limitada en los del interior.

Luna y Corvera de Toranzo están intensamente afectados por grandes movimientos en masa (González Díez, 1995). Por el contrario, en el resto de los municipios predominan los deslizamientos superficiales (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 1999).









Cap. 5 Datos utilizados



## 5. DATOS; SELECCIÓN E INVENTARIO

En este capítulo se comentan los factores que influyen en la inestabilidad y, a partir de ellos, la selección de los parámetros utilizados en los diferentes análisis llevados a cabo. Igualmente se explica la estructura y contenido del banco de datos. La información detallada sobre los datos relativos a dichos parámetros se presenta en el Anexo I para el caso del Bajo Deva y en el Anexo II para La Pobra de Lillet; las características del banco de datos de los cinco municipios de Cantabria se describen en el estudio “Análisis, evaluación y zonificación de riesgos naturales en municipios de Cantabria” (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 1999).

### 5.1. Consideraciones previas

De acuerdo con Costa y Baker (1981), para analizar la estabilidad del terreno es necesario entender todos los factores que influyen en el proceso de deslizamiento, y éstos deben quedar integrados en el análisis, por lo que el estudio de las roturas ya ocurridas en un área resulta de gran utilidad. Ahora bien, en los análisis de la susceptibilidad debida a movimientos en masa aplicado a zonas grandes es imposible, en la práctica, tener en cuenta todos los posibles factores, por limitaciones en la disponibilidad de datos, económicas o de tiempo; por tanto, es necesario limitar el número de factores a considerar. Por ello, todos los modelos son simplificaciones de la realidad y han de considerarse como aproximaciones.

En general, los estudios de tipo geotécnico, orientados a problemas específicos y locales, no suelen tener en cuenta los aspectos espaciales y temporales del entorno. Por el contrario, en las evaluaciones de tipo regional, sí se tienen en cuenta estos aspectos, pero se analizan insuficientemente algunos factores subsuperficiales (Hutchinson, 1995). Además, no todos los factores, sean internos o externos, pueden ser evaluados



con criterios de campo o de fotointerpretación. En ocasiones se necesitan otro tipo de aproximaciones.

A continuación se analizan someramente los factores condicionantes y desencadenantes de los deslizamientos y se relacionan con las condiciones de la zona de estudio. Igualmente se analiza el modelo de rotura correspondiente a los deslizamientos más frecuentes de la zona. A partir de lo anterior, se seleccionan los parámetros a incluir en la base de datos y la forma de incorporar los mismos.

## 5.2. Causas de los deslizamientos

Los factores que afectan a la estabilidad de las laderas son muchos y variados, e interactúan de forma compleja y con frecuencia sutil. La fuerza común que genera los movimientos en masa es la gravedad, por lo que, en general, cuanto mayor es la pendiente mayor es la tendencia a que el deslizamiento ocurra. Obviamente, no hay un valor límite universal para este ángulo porque depende, además, de otros factores; de ahí la importancia de establecer la combinación de factores apropiada (Bell, 1998). Por otro lado, los procesos, factores o variables implicados difieren dependiendo del mecanismo de rotura de los movimientos analizados.

Terzaghi (1950) agrupa las causas que originan los deslizamientos en dos categorías: causas internas o mecanismos dentro de la masa, que producen una reducción en la resistencia de la misma a la rotura (meteorización en sentido amplio); y causas externas, que aumentan las fuerzas que actúan (aumento de la presión intersticial y de las tensiones). Esto sería equivalente a lo que Alexander (1993) denomina causas exógenas y endógenas.

El incremento de las fuerzas que conducen al deslizamiento es cíclico, como resultado de eventos de lluvia o sacudidas sísmicas, mientras que la pérdida de resistencia de la roca es progresiva y se manifiesta a lo largo de periodos largos (Figura 5.1). En este sentido, tal y como señala Sheko (1988), unos factores cambian de forma lenta y otros rápidamente. En general, los factores que varían lentamente se conocen como condicionantes y los que lo hacen de forma rápida como desencadenantes. Por ello, los factores condicionantes también se han denominado factores estáticos, determinando los lugares donde ocurrirán los deslizamientos; los factores desencadenantes, que influyen en el momento de producción de los mismos, se han denominado factores dinámicos (Hansen, 1984b; Cendrero y Dramis, 1996).



La ecuación del modelo unidimensional de ladera infinita (Graham, 1984) expresa la relación entre los diferentes factores que influyen en la producción de deslizamientos superficiales traslacionales.

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w) z \cos^2 \beta \tan \varphi'}{\gamma z \operatorname{sen} \beta \cos \beta}$$

donde:

$F$  = factor de seguridad

$c'$  = cohesión efectiva (KPa)

$\gamma$  = peso específico del suelo (KN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_w$  = peso específico del agua (KN/m<sup>3</sup>)

$z$  = profundidad de la superficie de rotura (m)

$z_w$  = altura de la lámina de agua por encima de la superficie de rotura (m)

$\beta$  = inclinación de la superficie del terreno (°)

$\varphi'$  = ángulo efectivo de fricción o de rozamiento interno (°)

$m$  = relación entre la altura del nivel freático y el espesor del suelo  $z_w/z$  (adimensional)

Según se puede apreciar, ciertos parámetros como  $\gamma$  y  $\beta$  se refieren o dependen de características del terreno razonablemente permanentes (para la escala temporal considerada en este trabajo), mientras que otras pueden presentar variaciones marcadas en el tiempo, fundamentalmente a consecuencia del agua.

Entre las numerosas formas de clasificar los factores que influyen en el proceso de deslizamiento (a través de los parámetros que intervienen en la ecuación anterior) cabe citar a Jahns (1978) quien considera: las condiciones inherentes o básicas que afectan a la estabilidad; y los procesos o factores que producen cambios desfavorables que pueden conducir a la rotura.

En la Tabla 5.1 se muestran los principales procesos que inducen a la rotura del terreno. Evidentemente, todos ellos funcionan como agentes desencadenantes del

proceso y su análisis es esencial para el estudio de movimientos individuales. Sin embargo su expresión espacial y evolución en el tiempo es incierta, por lo que es muy difícil que puedan ser considerados, al menos de forma detallada, en los estudios de carácter regional.

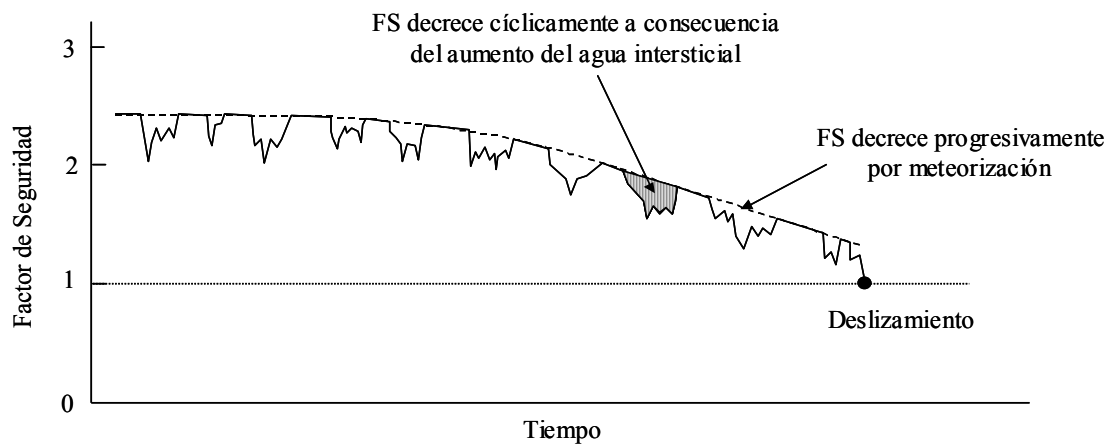


Figura 5.1. Esquema conceptual de pérdida de resistencia de la roca (modificado de Terzaghi, 1950).



Tabla 5.1. Procesos que inducen deslizamientos (Bell, 1998; basado en Terzaghi, 1950).

Agente	Proceso o evento que pone al agente en funcionamiento	Modo en el que actúa el agente	Materiales de la ladera más sensibles a la acción	Naturaleza física de las acciones significativas del agente	Efectos en las condiciones de equilibrio de la ladera
Transporte	Operaciones de construcción o erosión	Incremento en altura o en el ángulo de la ladera	Todos los materiales	Cambios en el estado de esfuerzos de los materiales de la ladera	Se incrementa el esfuerzo de cizalla
			Arcillas poco plásticas fisuradas y pizarras	Cambios en el estado de esfuerzos y causa apertura de juntas	Se incrementa el esfuerzo de cizalla y se inicia el proceso
Esfuerzos tectónicos	Movimientos tectónicos	Deformaciones de la corteza de gran escala	Todos los materiales	Incremento del ángulo de la pendiente	Se incrementa el esfuerzo de cizalla
Esfuerzos tectónicos o explosivos	Terremotos o Explosiones	Vibraciones de alta frecuencia	Todos los materiales	Produce cambios transitorios en el esfuerzo	Se incrementa el esfuerzo de cizalla
			Loes, arenas y gravas ligeramente cementadas	Daña los enlaces Inter.-granulares	Se reduce la cohesión y se incrementa el esfuerzo de
			Arenas medias o finas en estado saturado	Inicia el reajuste de los granos	Liquefacción espontánea
Peso del material que forma la ladera	Proceso que creó la ladera	<i>creep</i> en la ladera	Arcillas poco plásticas fisuradas y pizarras producto de antiguos deslizamientos	Apertura de juntas y producción de juntas nuevas	Se reduce la cohesión, se acelera el proceso
		<i>creep</i> en estratos poco competentes por debajo del pie de la ladera	Materiales rígidos sobre materiales plásticos	Apertura de juntas y producción de juntas nuevas	Se reduce la cohesión, se acelera el proceso



Agente	Proceso o evento que pone al agente en funcionamiento	Modo en el que actúa el agente	Materiales de la ladera más sensibles a la acción	Naturaleza física de las acciones significativas del agente	Efectos en las condiciones de equilibrio de la ladera
Agua	Precipitaciones o deshielo	Desplazamiento de aire en los poros	Arena húmeda	Incrementa la presión de poros	Se reduce la resistencia de fricción
		Desplazamiento de aire en juntas abiertas	Pizarras con muchas juntas	Incrementa la presión de poros	Se reduce la resistencia de fricción
		Reducción de la presión capilar asociada con la dilatación	Arcillas poco plásticas fisuradas y algunas pizarras	Causa abultamiento	Se reduce la cohesión
		Meteorización química	Roca de cualquier tipo	Debilita las uniones inter-granulares (meteoriz. química)	Se reduce la cohesión
	Helada	Expansión del agua por congelación	Rocas con juntas	Ensancha las juntas preexistentes y produce juntas nuevas	Se reduce la cohesión
		Formación y posterior descongelación de niveles de hielo	Limos y arenas limosas	Incrementa el contenido en agua del suelo por encima de la parte helada	Reducción de la resistencia de fricción
	Periodo seco	Contracción	Arcilla	Produce grietas de contracción	Decrece la cohesión
	Bajada rápida	Infiltración hacia el pie de la ladera	Arena fina, limo bien drenados	Produce un exceso de la presión de poros	Reducción de la resistencia de fricción
	Aceleración en el ascenso del nivel freático	Se inicia el reajuste de los granos	Arena media y fina en estado saturado	Incremento repentino de la presión de poros	Liquefacción espontánea



<b>Agente</b>	<b>Proceso o evento que pone al agente en funcionamiento</b>	<b>Modo en el que actúa el agente</b>	<b>Materiales de la ladera más sensibles a la acción</b>	<b>Naturaleza física de las acciones significativas del agente</b>	<b>Efectos en las condiciones de equilibrio de la ladera</b>
Agua	Ascenso del nivel freático en un acuífero distante	Ascenso de la superficie piezométrica	Limos y arenas interestratificados entre niveles de arcilla	Incremento de la presión de poros	Reducción de la resistencia de fricción
	Infiltración de una fuente artificial (presa o canal)	Infiltración hacia la ladera	Limos saturados	Incremento de la presión de poros	Reducción de la resistencia fricción
		Desplazamiento del aire en los poros	Arena fina húmeda	Elimina la tensión de la superficie	Decrece la cohesión
		Elimina los enlaces solubles	Loes	Destruye uniones inter-granulares	Decrece la cohesión
		Erosión de la superficie	Arena fina o limo	Socava la ladera	Se incrementa el esfuerzo de cizalla

### 5.2.1. Condiciones básicas que afectan a la estabilidad

#### *Geología*

La litología incluye la composición, fábrica, textura y otros atributos que influyen en el comportamiento físico o químico de rocas y sedimentos. Estos atributos condicionan en gran parte la cohesión ( $c$ ), el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ), la permeabilidad, la susceptibilidad a la meteorización física o química, etc. Puesto que la mayoría de los movimientos de ladera del área de estudio son superficiales, involucrando sólo algunos metros de la formación superficial, se deben estudiar con especial cuidado los depósitos y procesos que los produjeron.

A pesar de que la geología es un factor que se considera en prácticamente todas las cartografías de amenaza debida a deslizamientos, los mapas publicados difieren mucho en la forma en que la información geológica es utilizada para la evaluación de la susceptibilidad. Lo más simple es el mapa geológico de formaciones litoestratigráficas convencionales. En un esquema más útil, las unidades se agrupan en grupos litológicos. Un modelo más refinado consiste en subdividir la zona en unidades litotécnicas (substrato y formaciones superficiales), tal y como se ha hecho en este trabajo.

La estructura incluye los rasgos de discontinuidad y heterogeneidad de rocas y suelos, incluyendo, secuencias estratigráficas, disposición de las capas, cambios en litología, planos de estratificación, juntas, fallas y pliegues. La estructura en relación con la ladera, es un factor importante en algunas situaciones geológicas. En los análisis regionales, sería conveniente realizar cartografías que reflejaran la estructura (Briggs, 1974), aunque esto, en la práctica, resulta imposible en la casi totalidad de los casos. Las diferencias entre las relaciones topografía-estructura, en distancias bastante cortas, son tales que no se pueden hacer observaciones que permitan reflejar aquellas de



forma fiable en un mapa, especialmente en zonas con gran desarrollo de la cobertera, como es este caso. Se han realizado algunos intentos de incorporar este rasgo en estudios previos sobre la zona (Cendrero et al., 1987a) pero los datos obtenidos fueron poco satisfactorios. En cualquier caso, este factor es poco relevante en deslizamientos superficiales que afectan fundamentalmente al regolito; lo más significativo en este caso, es el espesor de la capa meteorizada, ya que en la gran mayoría de los casos la rotura se produce a lo largo de la superficie de contacto entre regolito y substrato.

Litología (substrato y cobertera) y espesor del regolito son los parámetros que se han seleccionado para representar este factor.

### *Morfología*

Los deslizamientos existentes, la inclinación ( $\beta$ ) y orientación de la ladera y otras características geométricas de la misma condicionan en gran medida el que aparezcan o no deslizamientos en el futuro (Carrara et al, 1978). Sin embargo, debe recordarse que la interrelación entre pendiente y estabilidad no es simple y que las laderas más inclinadas pueden no ser siempre las más proclives a romperse. Muchas pendientes acusadas de rocas competentes son más estables que pendientes suaves de materiales débiles.

Las variaciones en el perfil de las laderas, la desaparición del soporte lateral o inferior (por socavamiento), las sobrecargas (construcción, relleno, deslizamiento) y las variaciones de detalle en el gradiente pueden ser de gran importancia para determinar la localización de una ruptura. De ahí la conveniencia de analizar parámetros tales como la curvatura o la rugosidad.

Los parámetros morfológicos seleccionados incluyen: pendiente, rugosidad, curvatura y orientación.

### *Condiciones hidrológicas y climáticas*

Los tipos y frecuencia de las roturas varían mucho de una región a otra en función de las características climáticas (temperatura y precipitación) y de los tipos de meteorización sobre los materiales, característicos de cada clima. La identificación del origen del agua, su movimiento, cantidad, presión de poros, etc., es tan importante como la litología (Sowers y Royster, 1978).

Para trabajos regionales, las series de precipitación suelen ser incompletas y es escasa la información sobre los niveles piezométricos y sus fluctuaciones. Por eso, es necesario tener un buen conocimiento indirecto de las condiciones hidrológicas, a partir de la litología, estructura, suelos, topografía, vegetación, clima y por los mismos movimientos en masa. Siempre es posible, también, observar los manantiales localizados y las condiciones superficiales, y las series de precipitación pueden ser correlacionadas con la ocurrencia de deslizamientos.

Las condiciones climáticas actúan de forma muy variada en la ocurrencia de movimientos, siendo la lluvia el factor climático más influyente en la inestabilidad. El aumento de precipitaciones es causa de la ocurrencia de deslizamientos tanto a escala temporal corta (Onodera et al., 1974, Brand, 1985; Naden et al., 1991; Corominas, 1993), como a escala “geomorfológica” (González-Díez, 1995; González-Díez et al., 1996; 1999). Esto se debe al aumento de la presión de poros y disminución del ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ).

Como valor orientativo para el desencadenamiento de movimientos en masa superficiales en climas húmedos, puede tomarse una precipitación diaria de 100 mm (Gostelow, 1991). Estas situaciones se producen con cierta frecuencia tanto en el área del Bajo Deva (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1999) como en el Pirineo oriental (Corominas, 1993). En este sentido, el fenómeno meteorológico denominado “gota fría” es capaz de originar precipitaciones muy intensas; baste señalar que en las



inundaciones del País Vasco de agosto de 1983 se registraron precipitaciones de más de 500 mm en poco más de un día (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1986a).

Uno de los procedimientos más prometedores para la predicción de deslizamientos incluye la identificación de las condiciones desencadenantes (meteorológicas, hidrológicas, etc.) de los movimientos de ladera en un área particular. Así, Campbell (1975) sugiere que, mediante el uso combinado de mapas de pendiente y registros de lluvia medidos a distancia, podría establecerse alarmas en áreas amenazadas, durante tormentas reales. Si bien es cierto que estos sistemas de alerta resultarían útiles para evitar algunos de los problemas que ocasionan los deslizamientos, no resuelven del todo las consecuencias del proceso.

Como parámetros que pueden reflejar indirectamente las condiciones hidrológicas subsuperficiales se han seleccionado una serie de variables relacionadas con la capacidad de concentrar agua dentro de la cuenca vertiente.

### *Vegetación*

El efecto de la vegetación en la inestabilidad es complejo y depende del espesor del suelo, de su inclinación y del tipo de vegetación (Varnes, 1984). La cubierta vegetal en algunos casos favorece claramente la estabilidad, pero en otros no.

La influencia de la vegetación en la estabilidad de las laderas ha sido estudiada por muchos autores y sus efectos quedan resumidos en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Efectos de la vegetación en la estabilidad de las laderas (a partir de Greenway, 1987).

<b>FACTORES HIDROLÓGICOS</b>	<b>Influencia sobre la estabilidad</b>
Intercepción de la lluvia por el follaje. Se reduce la lluvia útil para la infiltración por absorción y evaporación de las hojas y ramas	Beneficiosa
Las raíces y troncos incrementan la rugosidad del suelo y la permeabilidad, favoreciendo la capacidad de infiltración	Adversa
Las raíces extraen la humedad del suelo que se transmite a la atmósfera vía transpiración, haciendo que disminuya la presión de poros	Beneficiosa
La disminución de la humedad del suelo puede acentuar el agrietamiento del mismo, aumentándose la capacidad de infiltración	Adversa
<b>FACTORES MECÁNICOS</b>	
Las raíces refuerzan el suelo, incrementando la resistencia de cizalla	Beneficiosa
Las raíces de los árboles pueden sujetarse en substratos firmes, proporcionando sujeción al manto de suelo	Beneficiosa
El peso de los árboles sobrecarga la ladera, incrementando las componentes de fuerza normal y hacia abajo	Adversa / Beneficiosa
La vegetación expuesta al viento transmite la fuerza dinámica a la ladera	Adversa
Las raíces unen las partículas del suelo en la superficie, reduciendo su susceptibilidad a la erosión	Beneficiosa

El desmantelamiento de la vegetación altera las condiciones hidrológicas de las laderas e incrementa la erosión y la probabilidad de deslizamientos y flujo (Lee, 1985).



Prandini et al. (1977) señalan los efectos estabilizadores de la cobertera forestal. En conjunto, el bosque reduce la acción de los agentes climáticos, favoreciendo la estabilidad porque:

- Intercepta y protege de la acción del sol, viento y lluvia.
- Retiene el agua de lluvia que queda atrapada en la superficie de los árboles, y la elimina en forma de vapor.
- Elimina una gran cantidad de agua por evapotranspiración.
- Los restos vegetales que quedan en el suelo inmovilizan una gran cantidad de agua, evitando que se infiltre y reduciendo la erosión.
- El sistema de raíces incrementa el ángulo de fricción ( $\phi'$ ) y crea una presión de poros negativa, que incrementa la cohesión del suelo ( $c'$ ).

Por la otra parte, está el aumento del peso debido a los árboles, la acción mecánica del viento transmitida al suelo por los árboles, la caída de árboles y propagación de las roturas y la acción de cuña de las raíces, que crea fracturas y facilita la infiltración y meteorización.

Por todo ello, resulta de interés tener en cuenta la cobertera vegetal como uno de los parámetros a considerar y, si es posible, los cambios que haya podido experimentar en el tiempo, para tratar de analizar su influencia en la ocurrencia de deslizamientos.



## 5.2.2. Factores que producen cambios desfavorables en las condiciones

### *Estado de esfuerzos*

Los esfuerzos raramente son constantes a lo largo de periodos de tiempo largos. Las fluctuaciones pueden ser muy lentas, como la erosión gradual, o rápidas como vibraciones sísmicas. Por eso, el análisis de la peligrosidad, no sólo debe limitarse al estado de los esfuerzos en las laderas del presente, sino, también, a los posibles cambios pasados. De aquí la importancia del estudio del proceso en un periodo de tiempo suficientemente largo.

Es esencial conocer las condiciones tectónicas del presente y del pasado y la evolución geomorfológica del área (Varnes, 1984). En este sentido la zona del Bajo Deva se caracteriza por presentar un relieve relativamente joven, con una incisión fluvial que no ha alcanzado aún el equilibrio (ver apartado 4.2 Descripción general de las zonas; Bajo Deva). Además, el descalce lateral producido por actividades humanas directas o indirectas, en carreteras, casas, excavaciones, canteras, etc., así como las acumulaciones en distintas zonas, favorecen la inestabilidad.

Por último, los deslizamientos ya ocurridos alteran la geometría de las laderas, con frecuencia de forma desfavorable, aumentando el peso hacia abajo, y creando laderas más pendientes hacia arriba.

### *Resistencia de los materiales*

La reducción de la resistencia de los materiales puede producirse por meteorización y por otros procesos físicos y químicos, si bien este proceso puede durar décadas (Chandler, 1974). El agua juega un papel importante en esta meteorización; cuando el



material presenta fracturas estrechas pero abiertas o es poroso, los pequeños incrementos en el contenido en agua debidos a precipitaciones, pueden incrementar el nivel de agua en las fracturas y poros, y hacer decrecer el esfuerzo efectivo interno y la resistencia del material ( $c'$ ). Por ello, no es de extrañar el hecho tantas veces comprobado de que las inestabilidades gravitatorias acompañan a las avenidas, apareciendo el agua como elemento común en los dos procesos (Trilla, 1988).

Aparte de las variaciones en las precipitaciones de corto alcance, puede haber modificaciones producidas por el hombre, como la construcción de infraestructuras o los cambios del uso del suelo, que pueden alterar sensiblemente las condiciones hidrológicas locales.

El efecto producido por un movimiento en masa sobre las áreas adyacentes consiste en un debilitamiento de las mismas, especialmente en la zona de la corona, mediante la creación de fracturas que reducen la resistencia tensional (o de cizalla) y permiten la entrada de agua, lo que debilita a su vez el material,  $c'$  (Varnes, 1984). Otro efecto menos evidente es el causado por el movimiento dentro de rocas esquistosas o arcillosas, muy frecuentes en el área de estudio. La resistencia de cizalla de tales depósitos queda muy afectada por los desplazamientos, que se traducen en una fábrica ordenada y más débil, mientras que originalmente era desordenada. Por esta razón y de acuerdo con Skempton and Hutchinson (1969), es importante distinguir entre deslizamientos ocurridos por primera vez y deslizamientos ocurridos sobre materiales ya movidos (esto es más bien aplicable a grandes deslizamientos).

Otro mecanismo de debilitamiento de las fuerzas de resistencia es el *piping* (sifonamiento/tubificación), proceso muy común en las formaciones superficiales de la zona del Bajo Deva. Se produce generalmente en la zona de contacto entre la roca del sustrato y el material alterado o sedimentado y es el principio de muchos de los deslizamientos que ocurren en el área.

La cantidad de agua presente en el material es quizás el factor más importante en la estabilidad (Olivier et al, 1994). Es incorrecto pensar que el agua es un lubricante a la hora de generar movimientos en masa. De hecho, el agua en contacto con partículas de calcita y cuarzo actúa como “antilubricante” (Terzaghi, 1950). Su principal contribución a la inestabilidad es el incremento en el peso causado por la presencia de agua, y el incremento en la presión hidrostática de poros. En consecuencia, el esfuerzo efectivo se traduce en una disminución grande de la resistencia ( $\phi'$ ), a pesar de que el ángulo de fricción interna no cambie. La elevación del nivel freático y el subsiguiente aumento en la presión de poros constituye el mecanismo principal sobre la estabilidad del agua infiltrada; el aumento del peso específico desarrolla, en este caso, un papel secundario.

La presión de poros dentro del material, causada por el agua, produce una reducción en la resistencia efectiva. De hecho, generalmente se considera que en la mayoría de los deslizamientos el agua intersticial constituye el factor desencadenante más importante. Por consiguiente, es importante identificar el origen y la cantidad de agua, su circulación y el desarrollo de presiones de poros altas (excesivas). Aumentos de la cantidad de agua debidos a lluvias muy intensas de corta duración, o lluvias poco intensas pero persistentes, son las mayores causas de deslizamientos (Brand et al., 1984; Bell, 1994). La correlación entre periodos de aumento de las precipitaciones y ocurrencia de deslizamientos ha sido puesta de manifiesto por González-Díez et al. (1999). Según Brand et al (1984) para el área de Hong Kong, las lluvias intensas tienden a producir deslizamientos superficiales, mientras que las precipitaciones antecedentes constituyen un factor importante para los movimientos más profundos. En ocasiones, el nivel freático puede coincidir con la superficie de ruptura.

Otro factor que influye en la saturación es la baja permeabilidad del material, lo que implica un aumento muy rápido de la presión de los poros, ya que el material necesita mucho tiempo para ajustarse a nuevas condiciones hidrológicas (Vaughan y Walbanke, 1973). De hecho, en los suelos cohesivos impermeables, el factor más importante es el hinchamiento.



En materiales arcillosos se pueden producir cambios importantes en el volumen, además de debilitar el material por la formación de grietas de desecación. En suelos granulares las fuerzas de infiltración pueden producir una reducción en la resistencia del material, por la reducción del número de contactos entre los granos (Bell, 1998). El agua también puede debilitar el material, alterando los minerales o disolviéndolos.

En los análisis de susceptibilidad de grandes áreas, aunque la zona de estudio sea pequeña, no es posible tener datos precisos sobre las diferentes formas de aparición del agua en el suelo y el subsuelo y, mucho menos, sobre sus variaciones espaciales y temporales. Por ello, la incorporación del agua al conjunto de parámetros utilizados en el análisis ha de hacerse de manera indirecta. En este trabajo, esta incorporación se ha realizado teniendo en cuenta la red de drenaje y ciertos rasgos geométricos que condicionan la concentración de agua en el terreno.

El efecto mecánico de los terremotos es quizás la más importante fuente de incremento transitorio del esfuerzo de cizalla en las laderas. El efecto primario es la aceleración del terreno. La fuerza adicional es igual a la masa del deslizamiento potencial por la aceleración sísmica. La aceleración sísmica puede superar 0,5 veces la aceleración de la gravedad. Debido a que esta fuerza puede actuar en varias direcciones, puede ser la causa del inicio del movimiento por el incremento del esfuerzo de cizalla. La aceleración producida por los terremotos también influye indirectamente en la estabilidad a través de sus efectos en la cohesión del material. Algunos materiales, son particularmente susceptibles a perder resistencia de cizalla debidos a vibraciones del terreno; en este sentido, el efecto más espectacular es la licuefacción.

El posible papel de los terremotos, así como el de las precipitaciones o la actividad humana, no se han considerado para la evaluación de la susceptibilidad por su carácter “desencadenante” en vez de “condicionante”, pero se ha tenido en cuenta al analizar los agentes causales y la evolución temporal del proceso.

### 5.3. Modelo de rotura

Los factores que condicionan y desencadenan la aparición de movimientos superficiales son distintos de los que causan los movimientos profundos, a la vez que estos últimos requieren métodos de análisis también distintos. En el presente trabajo se consideran únicamente movimientos con morfologías simples, como son los deslizamientos superficiales.

La naturaleza de los deslizamientos superficiales permite analizar la susceptibilidad a partir de un modelo simple de rotura. Estos deslizamientos son roturas por cizalla que tienen lugar a lo largo de una o varias superficies que generalmente se desarrollan en el contacto entre la formación superficial y el substrato, siendo paralelas a la superficie de la ladera. La masa que se desplaza se puede asimilar a un bloque rígido, aunque puede llegar a fragmentarse. La mayoría de los deslizamientos identificados corresponden a deslizamientos traslacionales y superficiales (*debris slide*) que afectan a materiales de alteración y de coluvión; por este motivo tienen carácter superficial. En muchos casos, los *debris slides* evolucionan a flujos (*debris flows*), esto ocurre cuando hay una gran cantidad de agua y las condiciones morfológicas favorecen su concentración.

De acuerdo con Del Val et al. (1986), las precipitaciones intensas y las actuaciones humanas son los principales factores desencadenantes de movimientos en masa en el País Vasco. Las actuaciones humanas son causa normalmente directa - y a veces indirecta - de la mayor parte de las inestabilidades producidas; por el contrario, la precipitación actúa como un factor necesario pero no suficiente.

Para tratar de reflejar los parámetros que caracterizan las laderas y que condicionan la estabilidad de las mismas, se parte de un modelo de ladera simple con las siguientes características:



- Sobre el substrato de las laderas existen formaciones superficiales permeables (regolito de alteración o depósitos fundamentalmente de coluvión) que presentan un pequeño espesor, generalmente no superior a 2 metros. Estas formaciones determinan la existencia de deslizamientos superficiales, cuya superficie de rotura suele situarse en el límite entre ellas y el substrato.
- Un factor determinante muy importante es el agua de lluvia que cae en la cuenca y se infiltra en la formación superficial. El aumento de las presiones de agua en los poros, responsable de la reducción de la resistencia al corte y de la rotura de la ladera, viene determinado, sobre todo, por la concentración del agua de escorrentía en determinados lugares y su infiltración.

De acuerdo con esto, las laderas sin formación superficial no deberían presentar roturas. Asimismo, cuanto mayor sea la extensión y profundidad de la formación superficial, mayor será la posibilidad de que se generen presiones de poros elevadas. La fuerte pendiente de las laderas, en muchos casos cercana al límite de equilibrio, es responsable de que las formaciones superficiales sean muy sensibles a pequeños cambios en la cohesión o en la presión de agua en los poros, aumentando las tensiones de corte en las superficies potenciales de rotura. El tipo de material de la formación superficial condiciona también de forma importante la rotura, ya que determina la cohesión y la resistencia de cizalla. La vegetación, si bien puede jugar un doble papel, generalmente protege las formaciones superficiales de deslizamientos, al atravesarlas con sus raíces y anclarse en el substrato, aumentando la cohesión y la resistencia. Las características hidrológicas en cada punto de la ladera condicionan de forma decisiva la estabilidad. Puesto que no es viable obtener datos hidrológicos precisos para zonas extensas, este factor debe quedar reflejando mediante una serie de parámetros indicadores, al menos en parte, de tales condiciones. Esto es posible a partir de variables del terreno que indiquen la capacidad de concentración de agua.

## 5.4. Parámetros a considerar

De acuerdo con los mecanismos de rotura anteriormente descritos, se ha seleccionado un conjunto de variables que recogen las características de los materiales, características geométricas de las laderas, condiciones hidrológicas y de la vegetación. Idealmente deberían seleccionarse todas las variables que reflejan las condiciones que influyen en la inestabilidad de la forma que anteriormente se ha descrito, obviamente la dificultad de obtener muchas de estas variables idóneas, en un tiempo y a un coste razonables, hace necesario que algunas sean sustituidas por otras con significado similar, o próximo, y de más fácil obtención.

En conjunto, son variables fáciles de obtener, objetivas y universales. Por tanto, las conclusiones que se extraigan por medio del análisis de las mismas, pueden resultar útiles para aplicaciones generalizables.

El banco de datos consta, básicamente, de dos grupos de informaciones:

- Atributos asociados a los deslizamientos, obtenidos directamente en el campo o mediante fotointerpretación.
- Mapas temáticos de los factores causales.

Por otra parte, se han incluido algunos otros parámetros que resultan de utilidad para conocer mejor la evolución del proceso en los últimos años, su contribución a la evolución del relieve, y sus efectos sobre el hombre y sus actividades. La relación de variables utilizadas se presenta en la Tabla 5.3.



## 5.5. Preparación del banco de datos cartográficos

Una vez identificados los parámetros a incorporar para la realización del análisis propuesto, es necesario tener en cuenta las condiciones que debe reunir un banco de datos que permita la utilización de los mismos para el fin que se persigue. En este apartado se comentan el procedimiento y los criterios seguidos en la elaboración del banco de datos y en los Anexos I y II se describe con detalle los bancos de datos correspondientes al Bajo Deva y La Poblá de Lillet, respectivamente.

La creación de un banco de datos en un entorno SIG puede dividirse en una serie de etapas:

- 1º Diseño del banco de datos cartográfico digital. Estructura del banco de datos.
- 2º Captura de datos y digitalización.
- 3º Corrección de errores.
- 4º Establecimiento de la topología.
- 5º Creación de mapas derivados.
- 6º Preparación del banco de datos para el análisis.

El tiempo que se requiere para la construcción de un banco de datos de características semejantes a las de este trabajo, puede oscilar entre uno y doce meses de dedicación, dependiendo fundamentalmente de la cantidad, formato y estado de la información disponible. Las tareas arriba señaladas ocuparían el 10%, 50%, 23%, 2%, 5% y 10%, respectivamente, del tiempo empleado.

### 5.5.1. Estructura del banco de datos.

Teniendo en cuenta las variables que van a ser utilizadas en el análisis y con la pretensión de resolver los objetivos planteados, se ha diseñado un banco de datos,



tratando de que los mapas sean sencillos y evitando las redundancias de información, pero que satisfagan las necesidades del estudio.

La organización digital de los objetos espaciales representables en un mapa puede llevarse a cabo, básicamente, a partir de dos modelos o formatos: vectorial y matricial (Figura 3.8).

En el modelo vectorial los elementos son puntos, líneas y polígonos que normalmente son incompatibles entre sí (generalmente no pueden estar presentes en la misma capa, aunque se pueden visualizar varias capas a la vez). Son incompatibles porque el sistema informático guarda los datos de forma distinta en cada caso. Así, de los puntos el sistema guarda las coordenadas  $x$  e  $y$ , y un ID (identificador numérico interno o cualidad de ese punto); en el caso de líneas, almacena las coordenadas de todos los puntos que definen la línea y un ID; en el caso de los polígonos guarda las coordenadas de las líneas que limitan al polígono y un ID; o bien se utiliza una estructura más compleja.

En el modelo matricial (o raster) los objetos quedan definidos por una celda o conjunto de ellas con el mismo valor. Cada celda (o píxel), en general cuadrada, representa un área, y el conjunto de celdas todo el mapa. La estructura espacial de todo el área viene determinada por las coordenadas de al menos una de esas celdas (normalmente de dos extremas y opuestas), por el número de columnas y de filas y por el tamaño de las celdas. Con ello el sistema tiene una organización de todos los objetos en el espacio.

La estructura general del banco de datos es de tipo “vertical”, en el sentido de que para cada parámetro (variable) específico se ha elaborado un mapa o capa independiente que puede superponerse verticalmente. Cada uno de estos mapas está constituido por una parte gráfica (los elementos representados), de unos atributos básicos (que definen los elementos) y de otros atributos asociados, ambos en forma de códigos numéricos o alfanuméricos.



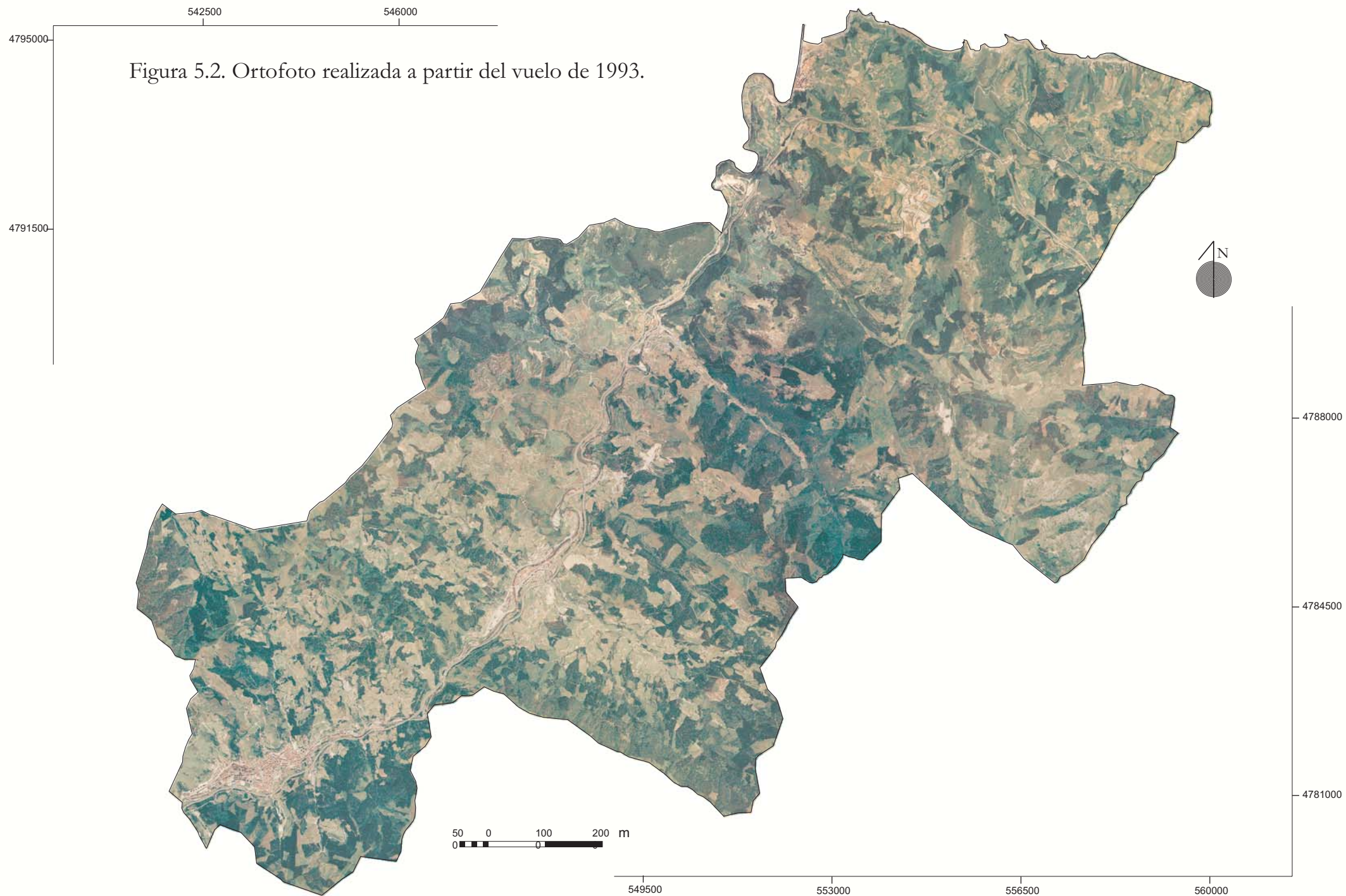
Todos los mapas temáticos que describen el medio se han elaborado con un formato vectorial, si bien los modelos digitales de terreno se han construido en formato matricial. Asimismo, para el análisis de la susceptibilidad, los mapas originalmente vectoriales han sido transformados a un modelo matricial.

### 5.5.2. Captura de datos y digitalización

Es el proceso de introducción de toda la información en un soporte informático. La digitalización comenzó a aplicarse hace unos treinta años en el campo de la prospección minera con la utilización de formatos matriciales y celdas de baja resolución, (Bonham-Carter, 1991). Hoy en día es un proceso generalizado y extendido a cualquier sistema, tanto matricial como vectorial. La digitalización de documentos cartográficos puede hacerse de dos formas: manualmente, mediante una mesa o tableta digitalizadora, o automáticamente, mediante sensores ópticos (*scanners*). Las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos métodos dependen, básicamente, del tipo de información original y de la que se desee obtener (Masip, 1987).

Parte de la información sobre la zona de estudio estaba disponible en forma digital, en diferentes formatos; esta información fue importada y adaptada a los dos sistemas de información geográfica utilizados, dependiendo del formato original. Otros datos, por el contrario, estaban en formato papel, por lo que hubo que digitalizarlos manualmente (mesa de digitalización) o automáticamente (*scanner*). Por último, todos los datos asociados a los deslizamientos (atributos) fueron digitalizados manualmente. Para readaptar todos los mapas a una base topográfica común y para la actualización de los mismos y la corrección de errores, se utilizó una ortofoto realizada con el vuelo de 1993 (Figura 5.2), con el que además se restituyó la topografía a escala 1:4.000; el proceso se realizó directamente en pantalla.

Figura 5.2. Ortofoto realizada a partir del vuelo de 1993.





Generalmente, la cartografía se almacena en origen de forma fragmentada, dividiendo una determinada capa temática, por ejemplo, en hojas del mapa topográfico, o en cuadrículas de 2 x 2 Km, como hace el Servicio de Información Territorial de la Diputación Foral de Guipúzcoa. Esta división “horizontal” es necesaria para gestionar grandes volúmenes de información. Por ello, una vez importada la información a un determinado SIG hay que reconstruir la topología y, si es necesario, eliminar los límites de las subdivisiones.

### 5.5.3. Corrección de errores

Los errores derivados del proceso de digitalización manual son los debidos a la generalización de líneas cartográficas mediante un conjunto de puntos que definen segmentos rectos, los derivados del inexacto posicionamiento del cursor al digitalizar cada punto, etc. (Veregin, 1989). La corrección de errores debe hacerse visualmente en la mayoría de los casos, si bien los errores de conexión, etiquetado, etc. pueden solucionarse automáticamente. Este fue el proceso seguido en este trabajo.

### 5.5.4. Establecimiento de la topología

El establecimiento de la topología supone definir explícitamente las relaciones espaciales existentes entre los distintos elementos que constituyen una representación gráfica. En el caso de los SIG el principal propósito de la definición de estas relaciones entre objetos es aumentar la capacidad de análisis espacial (Egenhofer y Herring, 1991). La topología define y maneja relaciones referidas a la conectividad y contigüidad, es decir, describe qué líneas están conectadas a otras, qué sentido tiene una línea y cuáles son los elementos situados a su lado derecho e izquierdo. Las relaciones de este tipo son obvias, de forma intuitiva, pero en un sistema informático no pueden ser determinadas sin la construcción explícita de la topología (McGregor, 1988).



La estructura vectorial utilizada en este trabajo es la denominada *arco-nodo*, en la que los elementos geométricos fundamentales son los siguientes:

- Arcos o líneas: definidos por una sucesión de pares de coordenadas (x,y). Cada línea tiene definida su longitud y su sentido.
- Vértices: los puntos (par de coordenadas) que definen el trazado de una línea.
- Nodos: los vértices inicial y final de un arco. A su vez, éstos definen el sentido de la línea.
- Polígonos: elementos areales definidos por una serie de arcos conectados que constituyen un perímetro.
- Etiquetas o puntos: localizaciones (x,y), sin valor de longitud ni de área, utilizadas para representar información de tipo puntual y para asignar identificadores a los polígonos.
- *Tics*: puntos de control geográfico asociados al mapa, que son utilizados en las operaciones de superposición de información o entre mapas adyacentes.

Los problemas más frecuentes que surgen al definir las relaciones topológicas (errores de tipo gráfico) son: la existencia de polígonos con varias etiquetas o sin etiqueta; arcos demasiado largos o cortos, polígonos abiertos; nodos inexistentes; elementos mal digitalizados; etc. Algunos de estos problemas se pueden corregir de forma automática estableciendo una tolerancia. Flowerdew (1991) define el concepto de tolerancia para los SIG como la mínima distancia por debajo de la cual dos posiciones espaciales se consideran idénticas. Generalmente es difícil definir los valores de tolerancia apropiados, de forma que un valor muy bajo puede no corregir muchos de los errores, mientras que un valor muy alto puede asimilar como iguales posiciones espaciales que realmente no lo son. El valor de tolerancia debe ser elegido en función de la escala a la que se trabaje y de la precisión de los datos. En este trabajo los valores de tolerancia utilizados han sido generalmente de 1 m, no habiendo superado en ningún caso los 2 m, tanto en polígonos, como en arcos o puntos.

Al construir la topología de una determinada capa, se crea de forma automática una tabla de atributos, diferente en el caso de arcos, polígonos y puntos. En el caso de los arcos se calcula su longitud y se fijan los nodos de inicio y fin. En el caso de los polígonos, se calcula el área y el perímetro de cada elemento. La tabla de atributos de los elementos puntuales tiene la misma estructura que la de polígonos, pero los campos perímetro y área toman valor cero. Todas las tablas de atributos tienen un campo en el que se describen, mediante un número de identificación (identificador), los distintos elementos gráficos. Este identificador asegura la conexión entre la información gráfica y la descriptiva, y sirve de enlace para los atributos asociados.

Aparte de los campos generados en la construcción de la topología, se han introducido manualmente todos los atributos asociados necesarios para la descripción de los elementos. Los atributos asociados se pueden introducir en un campo creado a tal efecto en la tabla de atributos, o bien se puede crear una nueva tabla de atributos asociados, relacionada con la tabla de atributos básicos a través de un identificador; este es el caso de la ficha de campo asociada a los deslizamientos.

### 5.5.5. Creación de mapas derivados

Ha sido necesario construir mapas temáticos adicionales, algunos de forma automática, a partir de un modelo digital de terreno (pendientes, orientaciones, tiempo de insolación, etc.). Otros mapas, por el contrario, han sido confeccionados a partir de la fotointerpretación y del trabajo de campo y, posteriormente, digitalizados (litología, espesor de las formaciones superficiales, etc.).

Con la información topográfica que existe en formato vectorial se han generado diversos modelos digitales de terreno, MDT, (MD de elevaciones, MD de tiempo de insolación, MD de líneas de flujo, MD de cuencas vertientes, etc.) a partir de los cuales ha sido posible elaborar varios mapas temáticos (pendientes, orientaciones, tiempo de insolación, etc.) necesarios para construir modelos predictivos de susceptibilidad. En





efecto, el MDT permite analizar variables descriptivas de la superficie topográfica, cuyo estudio no sería posible sin un modelo digital del terreno. Los SIG y los MDT abren así la posibilidad de nuevos tipos de análisis geomorfológicos, a través de la consideración de la micromorfometría a nivel muy detallado.

El término modelo ha sido definido por Joly (1988) como “una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades”. Un Modelo Digital del Terreno puede ser definido como “un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una característica del territorio (Doyle, 1978). Felicísimo (1994, 1999) propone una definición más precisa: “Estructura numérica de datos espacialmente referenciados que representa la distribución de una variable cuantitativa y continua en una zona geográfica”. De la definición se deduce que en el modelo sólo se representa una de las variables que caracterizan el sistema original, y en la segunda definición se precisa que la variable debe ser cuantitativa y de distribución continua, como por ejemplo la altitud, la pendiente o la insolación. En un MDT existe una posición y unas relaciones espaciales para todos los datos, generalmente referenciadas a un sistema de proyección geográfica, en el que cada uno de los puntos queda definido por un par de coordenadas (x, y), y por supuesto por el atributo que representa una realidad determinada. Según Felicísimo (1999) los modelos digitales de terreno contienen información de dos tipos diferentes:

- información explícita, recogida en los datos concretos del atributo del modelo.
- información implícita, relativa a las relaciones espaciales entre los datos, como la distancia o la vecindad, lo que hace posible obtener modelos derivados.

El calificativo digital implica que la variable representada está codificada, por lo que su almacenamiento y manejo se realiza a partir de una representación de tipo numérico, que permite el tratamiento informático. En contraposición a este tipo de modelos tendríamos los modelos analógicos, como por ejemplo un mapa topográfico convencional, que no permite un manejo informático inmediato.



El término terreno alude a la realidad u objeto representado en el modelo. Las primeras definiciones de MDT incluían sólo la altitud como variable representada en los mismos (Miller y Laflamme, 1958). En trabajos más recientes se establece la diferencia entre modelo digital del terreno y modelo digital de elevaciones. El MDT se define como un modelo en el que es posible representar diferentes variables referidas a la superficie del terreno, como la pendiente, la orientación, etc., por lo que es un concepto más amplio. El MDE sería un tipo específico de MDT en el que la variable representada es la altitud topográfica (Carte, 1988).

Tal y como se ha dicho anteriormente, partir del MDE se pueden calcular otros modelos digitales del terreno. Moore et al. (1991) dividen los atributos de la topografía derivados del MDE en primarios y secundarios. Los atributos primarios son los calculados de forma directa a partir de los datos de elevaciones (pendiente, rugosidad, orientación, etc.). Los atributos secundarios o compuestos se construyen mediante combinaciones de atributos primarios junto con otros parámetros como geología, vegetación, etc. Ejemplos de este último tipo son el modelo de área de la cuenca con formación superficial que drena a cada píxel, o los modelos de susceptibilidad de deslizamientos.

En un MDT los datos quedan definidos por su posición, por sus relaciones espaciales y por el atributo que define la variable. La referenciación espacial se realiza normalmente respecto a un sistema de coordenadas geográficas.

Para la construcción del modelo digital de elevaciones se han utilizado dos técnicas distintas con la ayuda de sendas herramientas SIG: Arc/Info® (ESRI, 1994) e Ilwis® (ILWIS, 1997).

En Arc/Info se ha utilizado la función *topogrid*, que constituye un método de interpolación diseñado para la creación de modelos digitales de elevaciones en los que haya una perfecta conexión hidrológica, a partir de un número relativamente pequeño de puntos de cota y de líneas hidrológicas, (algo necesario para obtener



posteriormente algunos de los modelos digitales derivados como ACUENCA, AFS, LONG y LFS que se describen más adelante), sacando el máximo partido de los datos de los que comúnmente se dispone (Hutchinson, 1989; 1996). El método combina técnicas como la del inverso de la distancia ponderada (de forma puntual) y técnicas de interpolación global como el *kriging* y *splines*, lo que permite mantener la continuidad de las superficies y que el modelo resultante se ajuste a los cambios bruscos del terreno. Otra característica del método es que se pueden eliminar de forma automática las pequeñas depresiones resultantes que normalmente no corresponden con la realidad, siempre que no contradigan, dentro un cierto margen, los datos de entrada. El procedimiento comienza con una malla gruesa en la que se calculan los rasgos más sobresalientes del relieve, y progresivamente se va reduciendo la malla hasta alcanzar el tamaño prefijado. En este proceso de “*zoom-in*” se van calculando progresivamente los detalles del relieve. Las líneas hidrológicas (ríos, arroyos y vaguadas) deben concordar con las curvas de nivel y los puntos de cota auxiliares, y el sentido de las líneas debe ser coherente.

El programa Ilwis utiliza el *Borgefors distance transform* (Borgefors, 1986; Gorte y Koolhoven, 1990), que requiere rasterizar previamente toda la información vectorial.

Algunos autores (van Westen, 1992b; Luzi, 1996a) han utilizado mapas de distancias (a cursos de agua, carreteras y fallas) como variables que favorecen la inestabilidad. En el presente trabajo se realizaron dos mapas de distancias: a cursos de agua y a vías de comunicación. Los ensayos efectuados utilizando dichos mapas pusieron de manifiesto que esas variables no contribuyen a la inestabilidad de manera significativa para la escala de análisis realizado, por lo que se abandonaron.

El modelo digital de elevaciones obtenido debe validarse para asegurar que la superficie modelizada se ajuste a la real. Hay muchas maneras de evaluar la calidad del modelo resultante, dependiendo del tipo de datos que se hayan utilizado para crear el modelo. El procedimiento más sencillo consiste en crear curvas de nivel a partir del modelo y compararlas con las curvas de nivel originales, lo que puede ayudar a

identificar errores de interpolación. Otro método de contrastación visual consiste en comparar la cobertura de líneas de drenaje que opcionalmente se puede generar en el proceso de interpolación, con líneas de drenaje originales. Si se han usado líneas de drenaje para generar el modelo, como en este trabajo, ambas son prácticamente idénticas. Otra posibilidad para evaluar la calidad del modelo generado consiste en no utilizar una parte de los datos de entrada, previamente al proceso de interpolación. Una vez generado el modelo, se puede comparar con las elevaciones no utilizadas en la interpolación. Esta comparación puede usarse para medir el error del modelo, por ejemplo mediante el error cuadrático medio (RMS).

#### 5.5.6. Validación del banco de datos

Como paso previo al análisis de la información del banco de datos, es necesario que la misma este en perfecto estado y que se hayan depurado la mayor parte de los errores.

Los datos incluidos en la tabla de atributos asociada a los deslizamientos, elaborada fundamentalmente con datos tomados en el campo, pueden usarse como muestreo de control para contrastar variables contenidas en las distintas coberturas. De esta forma, se pueden estimar los errores de los mapas de variables que van a ser utilizados en el análisis de la susceptibilidad. Para ello se han tomado datos sobre formaciones superficiales, vegetación, litología, pendientes, orientaciones, etc. Al menos 800 deslizamientos, del total de 2.072 incluidos en el banco de datos, presentan información sobre todos los atributos considerados y permiten hacer este tipo de validación.

En el caso de las variables derivadas del MDT se contempla la contrastación de las coberturas de orientaciones y pendientes. En estos casos se dispone además de varios modelos digitales que pueden servir para la comparación, no tanto de la calidad de los modelos en sí, sino de la posible influencia que los modelos pueden ejercer en el análisis de la susceptibilidad final.



### **5.5.7. Preparación del banco de datos para el análisis**

Para efectuar el análisis de susceptibilidad, todos los mapas de variables deben estar en formato matricial. Teóricamente, muchos de los análisis se podrían llevar a cabo en formato vectorial, pero tanto porque la mayoría de los mapas tienen formato matricial (todos los modelos digitales de terreno), como por motivos de facilidad de análisis, se ha utilizado el modelo raster como base.

Para convertir los datos vectoriales en matriciales se utiliza la rasterización automática, que es un proceso básico en cualquier SIG. El procedimiento es muy sencillo y lo único que hay que tener en cuenta es que todos los mapas tengan el mismo tamaño de celda y que tanto el número de filas y columnas, como las coordenadas extremas sean idénticas en todos los casos; esto es necesario para poder superponer “verticalmente” toda la información necesaria.

El banco de datos, en resumen, contiene la información geométrica y alfanumérica sobre las diferentes capas temáticas utilizadas para representar y describir el terreno y proporciona las bases, no solamente para el análisis de la susceptibilidad y su validación, sino para otra serie de análisis, como más adelante se muestra.

## **5.6. Descripción del banco de datos**

De acuerdo con lo comentado más arriba se han elaborado una serie de mapas que constituyen el banco de datos de la zona del Bajo Deva (municipios de Deva, Mendaro, Elgoibar y Eibar). La descripción detallada de los mismos (Anexo I) incluye la definición de las variables cartografiadas, su codificación y en su caso la correspondencia con unidades formales, y el procedimiento de elaboración (precisión y limitaciones del mapa); es decir, se describen los datos y los metadatos.

El modelo de rotura de los deslizamientos que se analizan en este trabajo determina los factores que condicionan y desencadenan la inestabilidad del terreno (ver apartados anteriores) y, por consiguiente, el contenido que debería constituir el banco de datos; es decir, idealmente el banco de datos debería incluir todos los factores que determinan la ocurrencia del tipo de deslizamientos superficiales estudiados.

Una de las premisas de este trabajo es la utilización de variables que comúnmente existen o que sean fáciles de obtener. Por ello, se ha tratado de elaborar el mayor número posible de mapas de variables de forma automática o semiautomática. A partir del Modelo Digital de Elevaciones es posible derivar una serie de modelos de variables relacionados con la geometría de las laderas y con el flujo superficial del agua. Por el contrario, un número pequeño de variables debe ser obtenido mediante técnicas cartográficas convencionales, de fotointerpretación y de campo.

Las variables utilizadas se han clasificado, según su sentido físico, en los siguientes grupos:

- Localización de la rotura
- Características generales de la ladera
- Características geométricas de la ladera
- Características de la cuenca vertiente
- Formaciones superficiales
- Cobertura vegetal – uso del suelo
- Litología

En la Tabla 5.3 se presenta una lista de las variables utilizadas.



Tabla 5.3. Resumen de las variables utilizadas en el análisis, agrupadas en categorías.

Para su descripción ver Anexo I.

<b>CÓDIGO</b>	<b>VARIABLE</b>
<i>MOVIMIENTOS EN MASA</i>	
MOVPT (10 mapas)	<i>Movimientos en masa</i>
<i>CARACTERÍSTICAS GENERALES</i>	
MDE I y II	<i>Modelo digital de elevaciones</i>
ORIENT	<i>Modelo digital de orientaciones</i>
INSOL	<i>Modelo digital de insolación</i>
PRECIP	<i>Intensidades de precipitación</i>
<i>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS</i>	
PEND I y II	<i>Modelo digital de pendientes</i>
RUGOS	<i>Modelo digital de rugosidad</i>
CURVAR	<i>Modelo digital de curvatura</i>
PERFIL	<i>MD de curvatura según la dirección de la máxima pendiente.</i>
PLA	<i>MD de curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente.</i>
<i>CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA VERTIENTE</i>	
ACUENCA	<i>Modelo digital de superficie de la cuenca vertiente</i>
LONG	<i>Modelo digital de longitud máxima de la cuenca drenante</i>
AFS	<i>MD de superficie de la cuenca vertiente con formación superficial</i>
LFS	<i>MD longitud máxima de cuenca drenante con formación superficial</i>
PENDM	<i>Modelo digital de pendiente media de la cuenca drenante</i>
<i>FORMACIONES SUPERFICIALES</i>	
ESPE I	<i>Espesor de las formaciones superficiales I</i>
ESPE II	<i>Espesor de las formaciones superficiales II</i>
FS	<i>Presencia de formaciones superficiales</i>
<i>VEGETACIÓN</i>	
VEGE I	<i>Clases de vegetación</i>
VEGE II	<i>Clases de vegetación</i>
<i>LITOLOGÍA</i>	
LITO I	<i>Clases de litología</i>
LITO II	<i>Clases de litología</i>

Los parámetros geomorfológicos y geológicos seleccionados, etc., reflejan de la mejor manera posible el modelo de rotura descrito y tienen un significado físico, de forma que pueden ser interpretados en el análisis tanto individualmente como en conjunto. Así, las variables seleccionadas representan factores condicionantes, en términos aproximados de causa-efecto, de los fenómenos de inestabilidad de laderas. Como no es posible disponer a escala regional de muchos parámetros físicos necesarios (por complejidad, coste, tiempo de ejecución etc.), se han definido otros “indicadores” que sirvan para una estimación simplificada de aquéllos. No obstante, hay que señalar que algunas variables no tienen un sentido unívoco, por lo que son susceptibles de ser interpretadas de forma distinta a como se ha hecho en este trabajo.

Por otra parte, en los últimos años han aparecido diversos conceptos relacionados con los metadatos, como “datos acerca de los datos”, meta-banco de datos, meta-conocimiento, meta-incertidumbre (Johnson, 1991; Radermacher, 1991). A pesar de la aparente confusión de estos términos, todos se refieren a la descripción y documentación de los datos, al conocimiento e incertidumbre que se tiene sobre ellos; tratan de responder a las preguntas de qué, quién, dónde, cuándo, por qué, cómo se han generado y qué fiabilidad tienen los datos. Su fin último es, por tanto, proporcionar a los potenciales usuarios de dicha información un mejor entendimiento de los datos, de su valor y de su validez. En efecto, es muy común utilizar datos de muy diversas procedencias (servicios gubernamentales, compañías privadas, universidades, etc.) que, por lo general, están en distintos formatos, diseñados a distintas escalas, con fiabilidades y grados de precisión muy diferentes, etc. Cuando se utiliza una herramienta como el SIG para manipular y combinar tales tipos de datos heterogéneos, existe un gran riesgo de enmascarar errores. Por otro lado, en muchas ocasiones los metadatos de los mapas se pierden, por lo que se hace muy difícil su posterior utilización. Un ejemplo que ilustra muy bien este hecho es la cartografía convencional en papel, de la que generalmente no se conoce más que el resultado.

Por otro lado, la globalización de la información y la potencialidad de utilización de la misma a través de *internet*, hacen necesario que los mapas digitales cumplan unos



mínimos comunes de formato, de cara a poder ser utilizados por distintos sistemas a través de la red; por ello, uno de los mayores esfuerzos actuales en el campo de los metadatos es la estandarización de los mismos. Existen varias iniciativas que han tratado de estandarizar los metadatos (Kraak et al., 2000): el *Content Standard for Digital Geospatial Metadata* (GSDGM) desarrollado por el US FGDC (FGDC, 1998); la *European Pre-standard ENV 12657* del Comité Técnico 287 del Comité Europeo para la Estandarización (CEN/TC 287, 1998); y la *International Standardisation Organisation (ISO/TC 211)* con el que también colabora el consorcio *OpenGIS*.

En este trabajo no se pretende establecer una base de metadatos de forma sistemática y de acuerdo con una norma preexistente, por lo que tampoco se adopta ninguna estructura estandarizada; simplemente, se aporta información adicional para que los mapas puedan ser utilizados por otros usuarios en el futuro.





## Cap. 6 Resultados y discusión



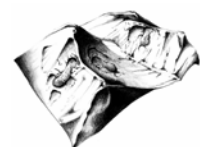
## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a través de los análisis realizados en la zona de estudio, así como la interpretación de los mismos. Esos análisis se han dirigido a la obtención de respuestas a dos interrogantes principales (ver capítulo 2): ¿Es posible elaborar modelos predictivos fiables de susceptibilidad ante los procesos de deslizamiento e identificar el conjunto de factores que permita alcanzar un equilibrio óptimo entre precisión del análisis y esfuerzo en la obtención de los datos? ¿Cuál ha sido la contribución de los movimientos en masa a la evolución del relieve en la zona y hasta qué punto se ha visto aquélla influida por las actuaciones humanas?

Dado el volumen de resultados obtenidos y su discusión, el capítulo ha resultado extenso y heterogéneo, por lo que por claridad expositiva, y atendiendo a las dos grandes cuestiones planteadas, se ha dividido en dos secciones: análisis de la susceptibilidad y Características geomorfológicas de los movimientos y evolución del relieve.

Para el primer tipo de análisis se ha utilizado una base de datos elaborada a partir de un inventario que contiene, fundamentalmente, las zonas de rotura correspondientes a deslizamientos superficiales ocurridos entre 1954 y 1997 (1439 movimientos), así como algunos anteriores a esta fecha (132 movimientos). Ese inventario cubre diferentes lapsos temporales: pre 1954; 1954-91 y 1991-97 para toda la zona de estudio. En el municipio de Deva se han analizado, además, siete lapsos temporales, con un total de 1083 deslizamientos.

El análisis de la contribución de los deslizamientos a la evolución geomorfológica se ha hecho fundamentalmente sobre la base de una muestra que incluye 808 movimientos de distinto tipo, para los cuales se han determinado sus dimensiones e identificado posibles factores causales o desencadenantes.



Las Tablas 6.1 a 6.7 resumen los datos principales de los inventarios citados. En el Anexo I se presenta la ficha de inventario utilizada. El Anexo VI es un CD que incluye el correspondiente banco de datos.

Conviene señalar que no se deben hacer comparaciones directas entre las cifras de deslizamientos proporcionadas por los diferentes inventarios indicados, dadas las diferencias en los procedimientos seguidos para realizar los mismos. En el caso de las Tablas 6.1 a 6.5 la base del inventario fue la fotografía aérea de 1991; los movimientos identificados en las fotografías se comprobaron con el trabajo de campo. Los movimientos “anteriores a 1954” son aquellos que, además de ser visibles en la foto y/o campo en 1991, son también visibles en las fotografías aéreas de 1954.

La Tabla 6.6 incluye solamente deslizamientos superficiales, pero tanto los identificados inicialmente sobre las fotografías aéreas de 1997, como los observados posteriormente durante el trabajo de campo. Teniendo en cuenta que se tenía como referencia el inventario de 1991, se puede decir con bastante seguridad que todos esos deslizamientos se han producido en el periodo 1991-1997. En el trabajo de campo posterior a la fotointerpretación se han identificado aproximadamente un 30% de deslizamientos adicionales. Estos movimientos son, casi sin excepción, de pequeñas dimensiones, por lo que no son detectables en las fotografías aéreas. Es razonable suponer que lo mismo resulta aplicable a vuelos más antiguos, para los cuales esta comprobación no es posible; esto es, el número de deslizamientos realmente ocurridos en los periodos cubiertos en las demás tablas pudiera ser un 30% superior a los identificados.

En el caso de la Tabla 6.7, los movimientos de un periodo dado, por ejemplo 1954-70, son aquellos que aparecen en la foto de 1970 y claramente no existen en la de 1954. Naturalmente, algunos movimientos visibles en 1970 ya no lo eran en 1991, por lo que las poblaciones totales observadas en ambos casos, varían. Así, la suma de los movimientos ocurridos en todos los periodos representados en la Tabla 6.7, no es igual

que la suma de los periodos antes indicados: pre 1954, 1954-91 y 1991-1997. Estas diferencias deben tenerse presentes al realizar los correspondientes análisis, como más adelante se comenta.

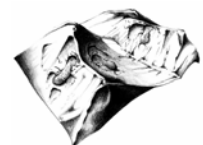


Tabla 6.1. Tipología de los movimientos en masa “de aspecto reciente” anteriores a 1954.

<b>TIPO</b>	<b>Roca</b>	<b>Regolito de alteración</b>	<b>Depósitos superficiales</b>	<b>Total</b>
Caída/vuelco	-	-	-	-
Traslacional	24	88	4	116
Rotacional	12	-	1	13
Flujo	-	3	-	3
<b>Total</b>	<b>36</b>	<b>91</b>	<b>5</b>	<b>132</b>

Tabla 6.2. Distribución por municipios de los movimientos anteriores a 1954.

Municipio	Superficie Municipio (km <sup>2</sup> )	Nº Mov.	Nº/km <sup>2</sup>	Nº/km <sup>2</sup> /año	Superficie (m <sup>2</sup> )	Sup. con indicios influencia humana (m <sup>2</sup> )	Sup. sin indicios influencia humana (m <sup>2</sup> )
Deva	52,0	63	1,2	0,12	401295,8	157940,3	243355,5
Mendaro	24,4	15	0,6	0,06	36756,5	18201,5	18555,0
Elgoibar	40,9	31	0,8	0,08	114648,2	68192,0	46456,2
Eibar	22,5	23	1,0	0,10	46809,7	23051,4	23758,3
<b>Total</b>	<b>139,9</b>	<b>132</b>	<b>0,9</b>	<b>0,09</b>	<b>599510,2</b>	<b>267385,2</b>	<b>332125,0</b>

Tabla 6.3. Tipología de los movimientos en masa “de aspecto reciente” ocurridos entre 1954 y 1991.

<b>Tipo</b>	<b>Roca</b>	<b>Regolito de alteración</b>	<b>Depósitos superficiales</b>	<b>Nuevos</b>	<b>Reactivados</b>	<b>Dudosos *</b>	<b>Total</b>
<b>Caída/Vuelco</b>	3	-	-	-	3	-	3
<b>Traslacional</b>	89	460	8	305	205	47	557
<b>Rotacional</b>	52	25	2	17	53	9	79
<b>Flujo</b>	-	36	1	20	13	4	37
<b>Total</b>	<b>144</b>	<b>521</b>	<b>11</b>	<b>342</b>	<b>274</b>	<b>60</b>	<b>676</b>

\* (Algunos podrían ser anteriores a 1954 y corresponden a pequeñas zonas no claramente visibles en las fotos de dicha fecha)

Tabla 6.4. Distribución por municipios de los movimientos ocurridos entre 1954 y 1991.

Municipio	Superficie Municipio (km <sup>2</sup> )	Nº mov.	Nº/km <sup>2</sup>	Nº/km <sup>2</sup> /año	Superficie (m <sup>2</sup> )	Sup. con indicios de influencia humana (m <sup>2</sup> )	Sup. sin indicios de influencia humana (m <sup>2</sup> )
Deva	52,0	337	6,5	0,18	376209,4	101653,9	274555,5
Mendaro	24,4	56	2,3	0,06	75398,2	47555,8	27842,4
Elgoibar	40,9	165	4,0	0,11	174299,3	97134,0	77165,3
Eibar	22,5	118	5,2	0,14	74573,4	47477,2	27096,2
Total	139,9	676	4,8	0,13	700480,3	293820,9	406659,4

Tabla 6.5. Deslizamientos superficiales para el periodo 1954-1991. Su distribución espacial está representada en la Figura 6.1.

Municipio	Superficie del municipio (km <sup>2</sup> )	Nº movimientos en masa de aspecto reciente (a partir del vuelo 1991)	Nº mov./km <sup>2</sup>	Nº/km <sup>2</sup> /año
Deva	52	258	4,9	0,13
Mendaro	24,4	46	1,9	0,05
Elgoibar	40,9	134	3,3	0,09
Eibar	22,5	94	4,2	0,11
TOTAL	139,9	532	3,8	0,10

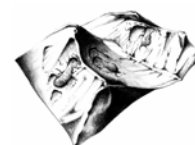


Tabla 6.6. Deslizamientos superficiales para el periodo 1991-1997. Su distribución espacial está representada en la Figura 6.2.

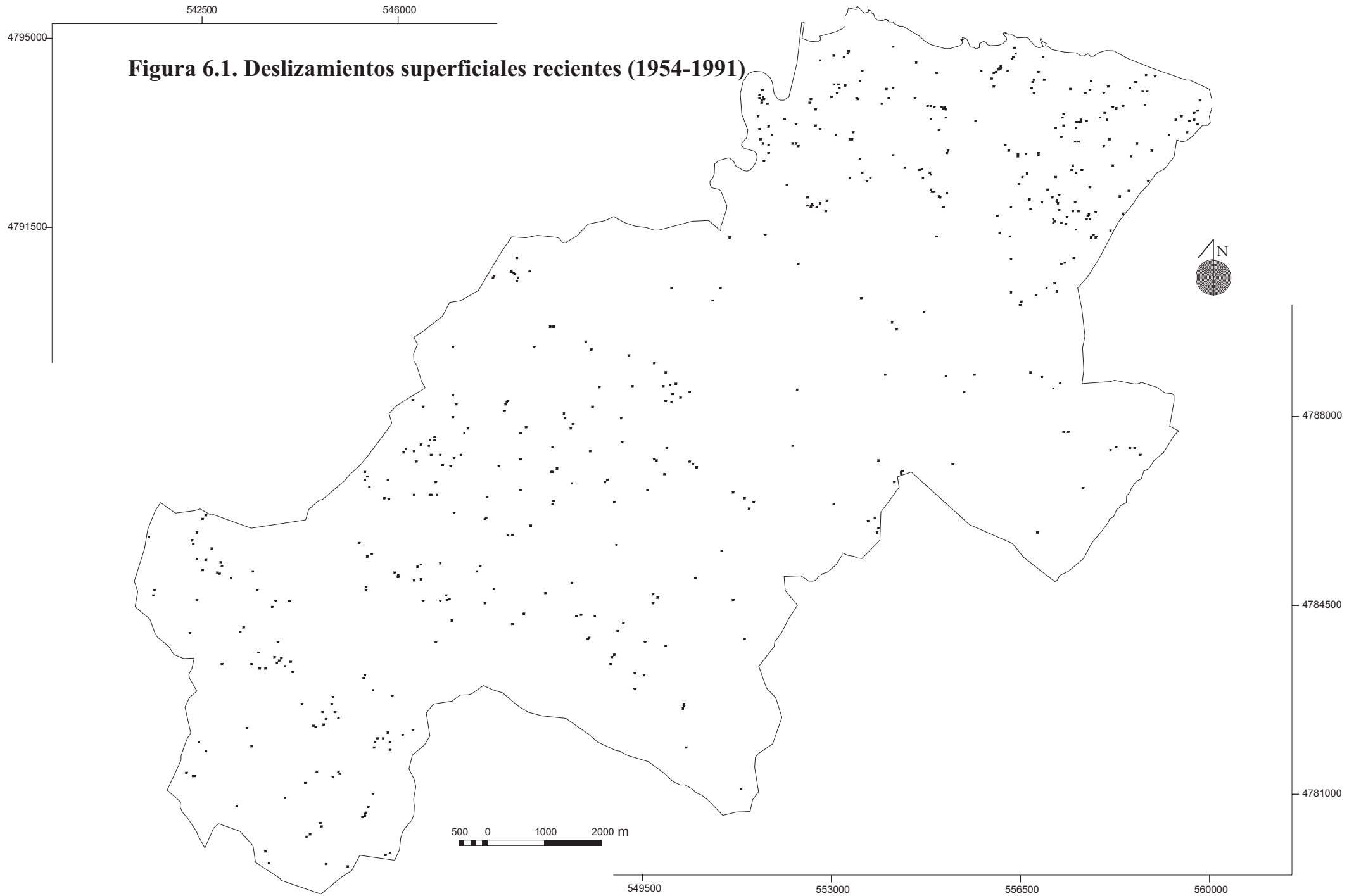
<b>Municipio</b>	<b>Superficie del municipio (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº movimientos en masa de aspecto reciente (a partir del vuelo 1997)</b>	<b>Nº mov./km<sup>2</sup></b>	<b>Nº/km<sup>2</sup>/año</b>
Deva	52	478	9,2	0,13
Mendaro	24,4	67	2,7	0,05
Elgoibar	40,9	185	4,5	0,09
Eibar	22,5	177	7,8	0,11
<b>TOTAL</b>	<b>139,9</b>	<b>907</b>	<b>6,5</b>	<b>0,10</b>

Tabla 6.7. Grupos temporales de deslizamientos superficiales del municipio de Deva.

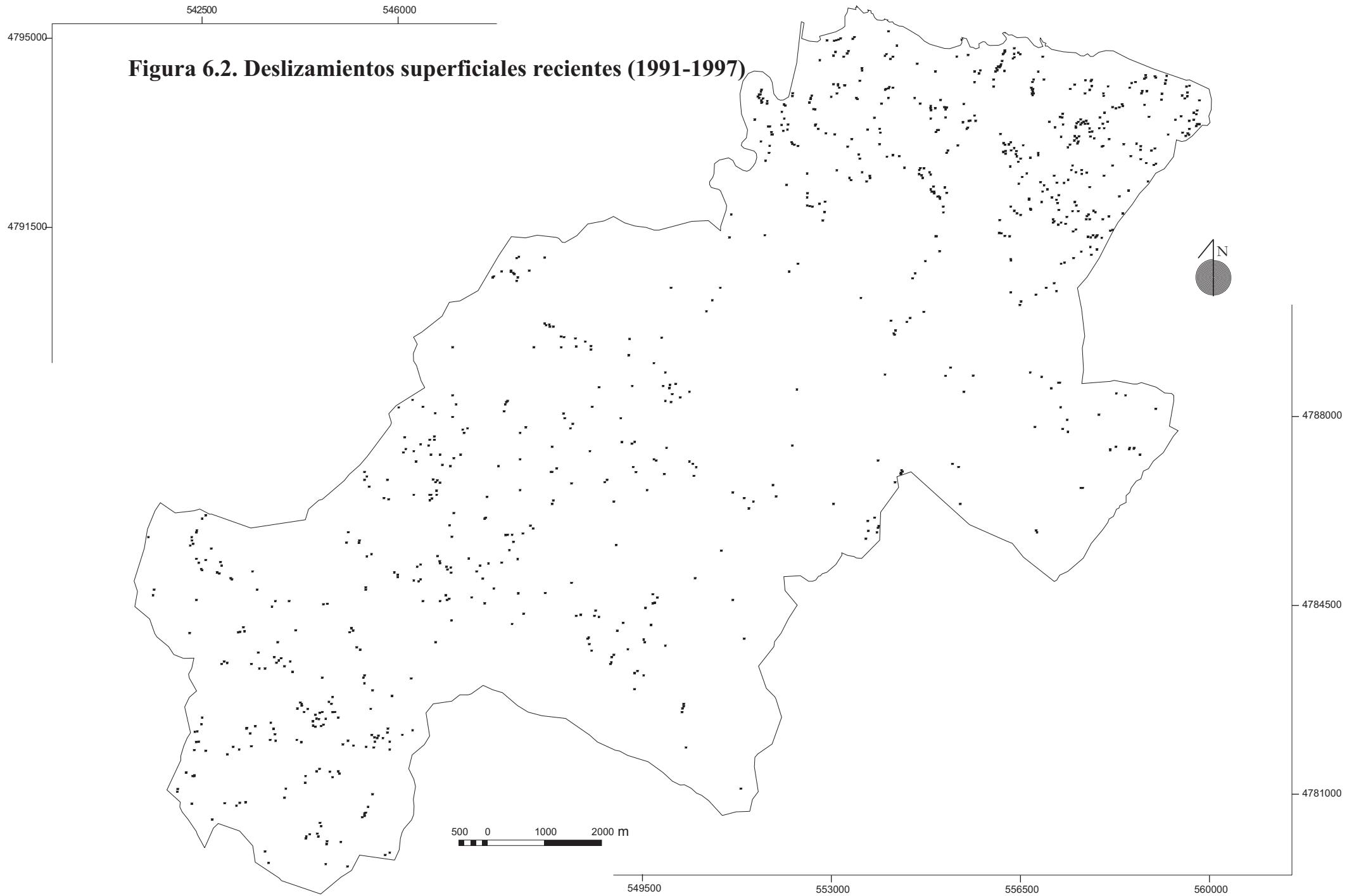
<b>Intervalo temporal</b>	<b>Vuelo de referencia</b>	<b>Nº de deslizamientos</b>	<b>Tasa: Nº/año</b>
¿? - 1954-5	1954-5	278	¿?
1954-1970 (15 años)	1970	109	7,3
1970-1983 (13 años)	1983	104	8
1983-1985 (2)	1985	141	70,5
1985-1991 (6)	1991	133	22,7
1991-1993 (2)	1993	95	47,5
1993-1997 (4)	1997	223	55,7



**Figura 6.1. Deslizamientos superficiales recientes (1954-1991)**



**Figura 6.2. Deslizamientos superficiales recientes (1991-1997)**



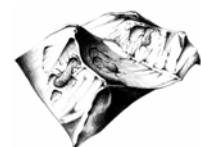
## 6.1 Análisis de la susceptibilidad.

El análisis de susceptibilidad se ha basado en el estudio de las características de las zonas de ruptura de los deslizamientos superficiales, con el fin de tratar de determinar los lugares con mayor posibilidad de aparición de futuros movimientos. Dicho de otro modo, se ha modelizado la susceptibilidad del terreno a deslizarse, combinando variables mediante diferentes técnicas de análisis de datos espaciales y de acuerdo con distintos criterios (ver capítulo 3).

El concepto de susceptibilidad (Brabb et al., 1972) es equivalente al de probabilidad espacial de rotura y muy distinto al de probabilidad temporal. La Figura 3.1 ilustra con un ejemplo las diferencias entre lo que es la probabilidad espacial, la probabilidad temporal y la probabilidad espacio-temporal. En el caso de la figura las probabilidades o frecuencias se han calculado para cualquiera de las celdas del área de estudio, sin tener en cuenta otras consideraciones ni variables asociadas a las mismas; esto es, se ha considerado que las 25 celdas del ejemplo tienen las mismas características y, por lo tanto, el mismo valor.

Con independencia del análisis realizado, las técnicas de validación son las que permiten extraer conclusiones sobre los resultados obtenidos a partir de la aplicación de cualquiera de las técnicas utilizadas, sobre diferentes poblaciones de deslizamientos y mediante la combinación de distintas agrupaciones de variables condicionantes. Mediante un análisis de sensibilidad consistente en modelización-validación, es posible seleccionar la agrupación idónea de variables causales, conocer las técnicas analíticas que mejores resultados proporcionan, el valor predictivo del modelo, etc.

De acuerdo con los datos obtenidos para el área del Bajo Deva, el análisis se ha llevado a cabo a distintas “escalas”, si bien éstas no implican un nivel de detalle diferente, sino simplemente que abarcan áreas de análisis de distinto tamaño, para distintos

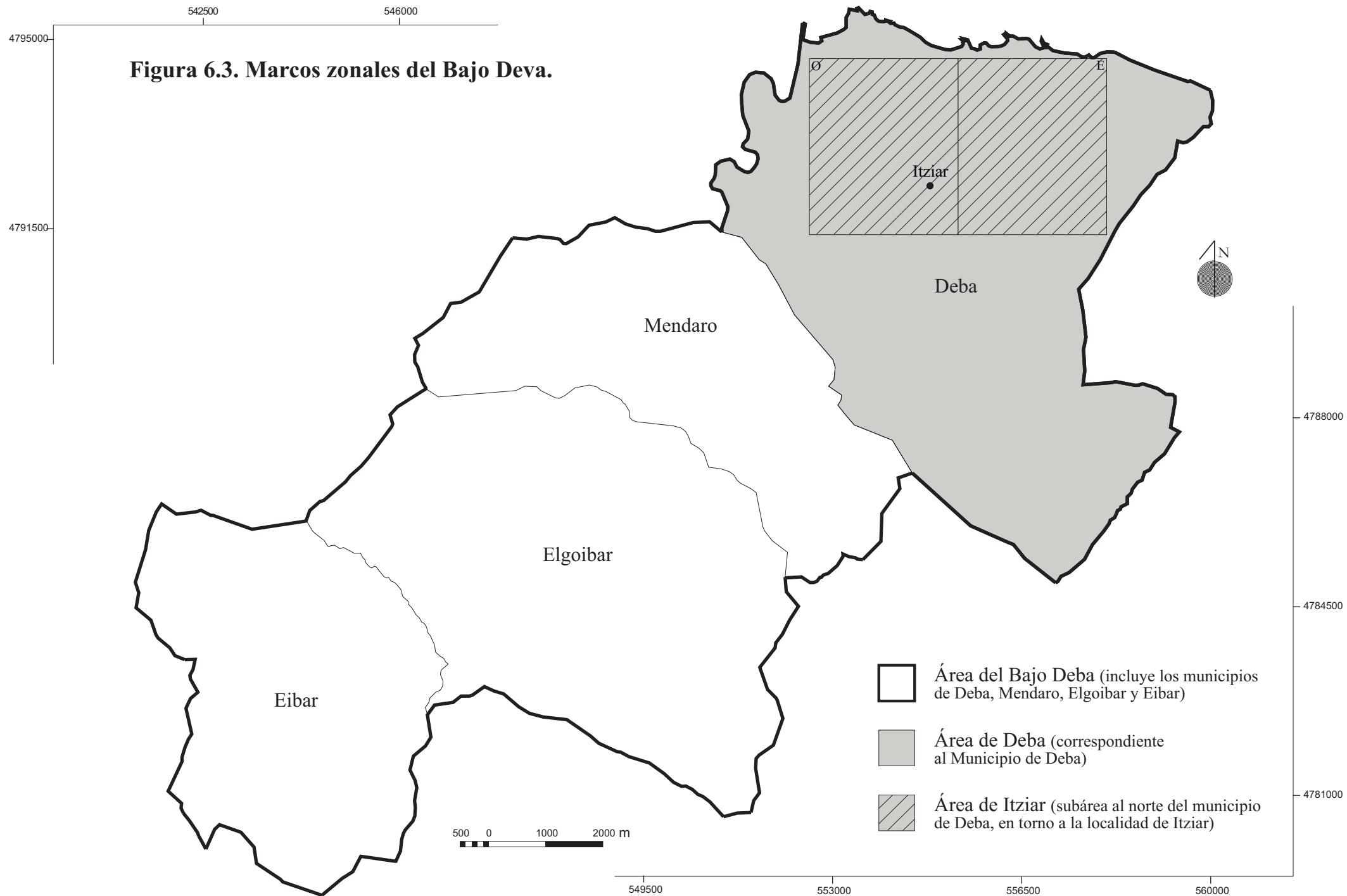


propósitos, según sean las características de las poblaciones de deslizamientos. En este sentido hay que recordar que para toda la zona del Bajo Deva se dispone de una población de movimientos en masa identificados a partir del vuelo de 1991 y recorridos de campo, y de una población de deslizamientos superficiales identificados a partir de la fotografía de 1997 y trabajo de campo. Para el municipio de Deva se dispone adicionalmente de siete clases temporales de deslizamientos. En la Figura 6.3 se representan los tres marcos zonales del Bajo Deva en los que se han llevado a cabo los análisis de susceptibilidad. Por otro lado, las técnicas de análisis se han aplicado también a la zona de La Población de Lillet, con el fin de comparar los resultados obtenidos en dicha zona a partir de la aplicación de técnicas mediante funciones de favorabilidad y de análisis discriminante con los obtenidos para una subzona del municipio de Deva en torno a la localidad de Itziar. La contrastación de ambas técnicas en dos zonas diferentes proporciona mayor consistencia a las interpretaciones y conclusiones obtenidas.

Con vistas a la validación final de los resultados es preciso que la muestra de los deslizamientos utilizados para esta validación sea distinta de la muestra empleada para la obtención de los mapas de susceptibilidad (que representan la hipótesis a contrastar). Para obtener estos dos grupos de deslizamientos diferentes se pueden seguir distintos caminos, tal y como se explica en el capítulo 3 (apartado 3.2.4). En este trabajo se han utilizado todos los métodos expuestos, si bien sólo en el municipio de Deva se ha empleado la estrategia temporal, por ser esta zona en la que se tienen los datos más adecuados para aplicarla. En la mayoría de los casos, la población de deslizamientos se ha dividido en dos muestras aleatorias, pero de un número de deslizamientos aproximadamente semejante.

Para resolver los interrogantes que plantea la elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos se han elaborado más de doscientos modelos o mapas de susceptibilidad, combinando distintas variables y aplicando las técnicas matemáticas señaladas. Estos ensayos han ido encaminados a evaluar la importancia de las distintas

**Figura 6.3. Marcos zonales del Bajo Deva.**





variables utilizadas en el análisis, a identificar las técnicas y modelos más adecuados y a establecer de manera cuantitativa el valor predictivo de dichos modelos.

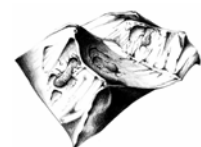
A continuación se presenta en primer lugar, una breve descripción de la distribución de las variables utilizadas en el análisis. Después, se exponen los resultados obtenidos por medio del análisis discriminante. Aunque este análisis, tal como se ha comentado anteriormente, tiene un carácter complementario del análisis por medio de funciones de favorabilidad, se presenta en primer lugar porque ha servido para establecer las relaciones de dependencia entre variables y para hacer una selección inicial de las mismas.

En el apartado siguiente se comentan los resultados de los análisis de susceptibilidad por medio de funciones de favorabilidad, extrayendo las conclusiones pertinentes con respecto al significado, sensibilidad y utilidad de las distintas variables, así como con respecto a las diferentes funciones utilizadas. En ambos casos, a efectos de contrastación adicional, se incorporan a la discusión los resultados obtenidos a través del análisis discriminante.

Posteriormente se lleva a cabo un análisis de errores y, finalmente, se hace una breve recapitulación de los puntos esenciales de las discusiones anteriores.

Los análisis que se presentan a continuación implican la consideración del carácter de cada una de las variables utilizadas (Tabla 5.3), así como de las posibles relaciones existentes entre ellas. Tal como se ha comentado anteriormente, idealmente los análisis se han de llevar a cabo utilizando variables que sean independientes entre sí, pero que presentan relaciones de dependencia con la variable final resultante del proceso que se analiza, las zonas de rotura.

En primer lugar se ha analizado la distribución de los valores de las variables. Algunas de las variables utilizadas presentan una distribución característica, independiente del



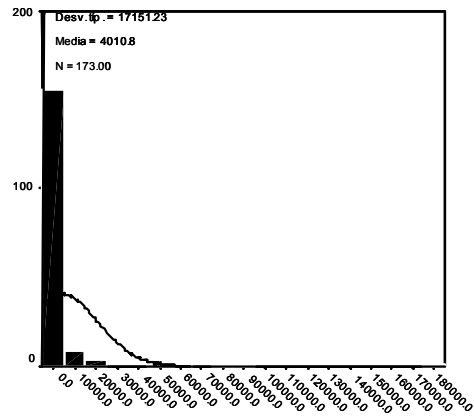
área de estudio. En efecto, las variables que representan las características de la cuenca vertiente (ACUENCA, LONG, AFS, LFS y PENDM) y la variable rugosidad de la ladera (RUGOS), presentan tres tipos de distribución muy bien definidos. ACUENCA, LONG, AFS, LFS muestran una distribución con sesgo muy marcado hacia los valores bajos, debido a que todas ellas son valores acumulados, tanto de superficie como de longitud (Figura 6.4). Los valores representativos de poco flujo acumulado corresponden con líneas de cresta y cabeceras de barrancos y arroyos, mientras que las que presentan valores altos (mucho flujo acumulado) corresponden a ríos; son, por tanto, pocos los casos en los que estos valores son altos. Esto explica el sesgo indicado.

La variable RUGOS presenta una distribución con un sesgo negativo muy acentuado hacia los valores altos (baja rugosidad), como consecuencia del algoritmo de cálculo, el tamaño del pixel y la ventana de 3 x 3 celdas utilizada (Figura 6.4). El algoritmo normaliza los valores finales de la variable de manera que cifras cercanas a 1 representan rugosidad casi nula, y el valor 0 rugosidad extremadamente alta, es imposible en la práctica. Esto hace que la mayoría de los valores sean próximos a 1, siendo escasos los valores próximos a cero, correspondientes a celdas con cambios bruscos en la pendiente, como es el caso de los escarpes de taludes, que representan un número pequeño de pixels.

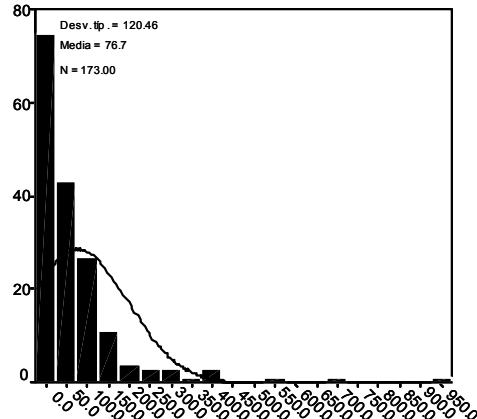
La variable pendiente media de la cuenca vertiente (PENDM) presenta una distribución bimodal, con un pico muy marcado en los valores muy bajos, cercanos a 0 (Figura 6.4). Esta variable se ha construido a partir de dos criterios: el flujo acumulado y la pendiente media de ese flujo. Las celdas con valor próximo a 0 son aquellas con flujo acumulado muy pequeño, correspondientes a divisorias de aguas, líneas de crestas y lomas, que constituyen un número elevado de pixels, en cualquier área de estudio.

También presenta una distribución bimodal la variable ORIENT, que refleja el predominio de las laderas con orientaciones NNE y SSO, como ya se ha comentado anteriormente.

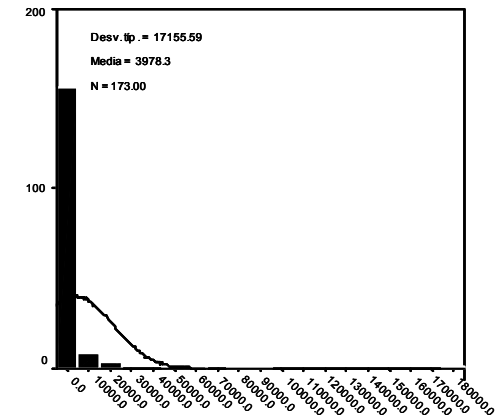




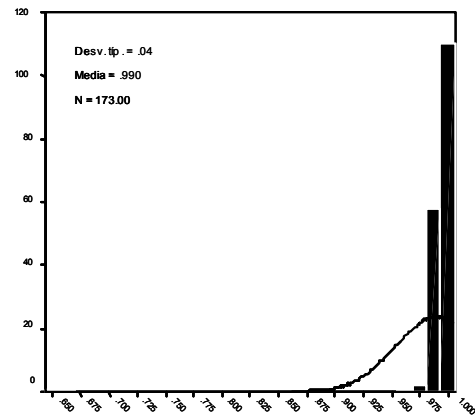
ACUENCA



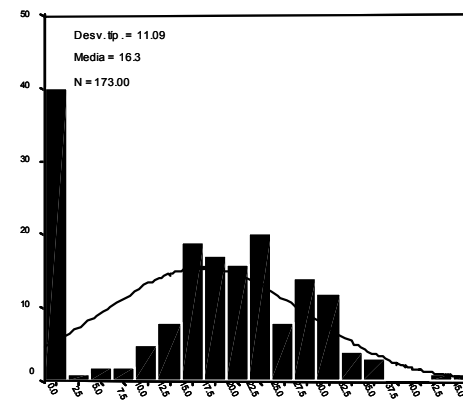
LONG



AFS



RUGOS



PENDM

Figura 6.4. Histogramas de los modelos digitales ACUENCA, LONG, AFS, LFS, RUGOS y PENDM en bruto.

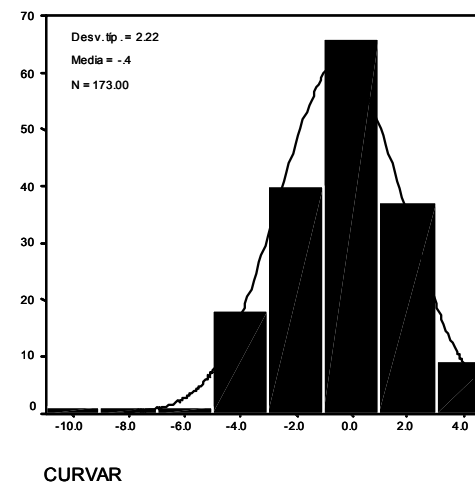
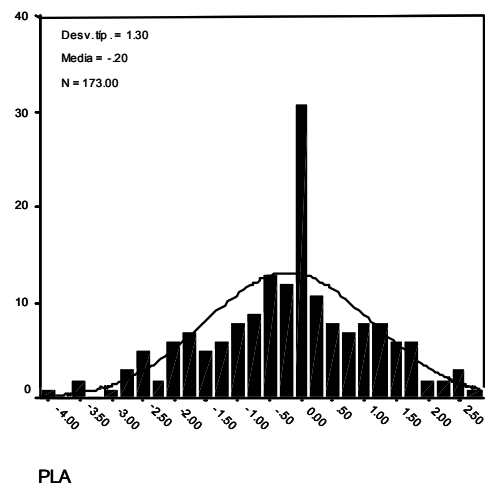
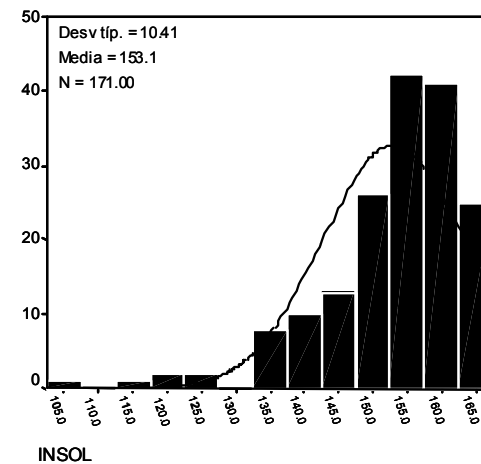
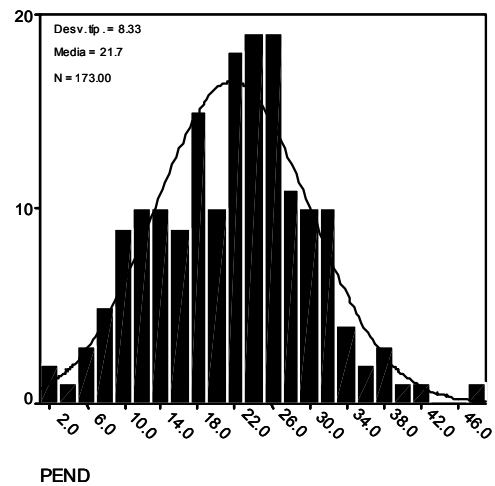
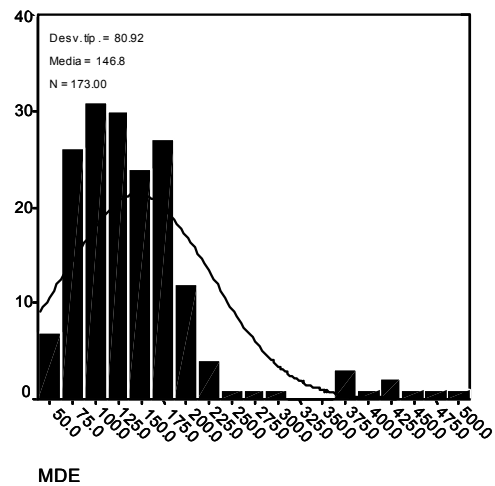


Figura 6.5. Histogramas de los modelos digitales MDC, PEND, INSOL, PLA y CURVAR en bruto

El MDE muestra una leve bimodalidad (Figura 6.5), que corresponde a la presencia de relieves calizos, que dan lugar a una serie de elevaciones que sobresalen por encima del resto.

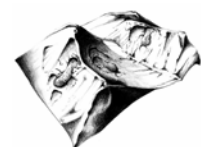
CURVAR, PERFIL, PLA, INSOL y PEND tienen distribuciones aproximadamente normales. Los valores de las variables CURVAR, PERFIL y PLA oscilan respectivamente entre  $-4$  y  $4$ ,  $-2,5$  y  $3$ , y  $-4$  y  $2,5$ , si exceptuamos los valores extremos (Figura 6.5). En general, se trata de valores relativamente bajos, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que el área de estudio del Bajo Deva presenta en general laderas rectilíneas y planas; este hecho explicaría también el pico en los valores centrales de la distribución de la variable PLA.

La variable insolación (INSOL), aunque puede variar entre  $0$  y  $255$ , no suele presentar valores extremos, sino que, en general, oscila entre  $130$  y  $180$  (Figura 6.5); así, los valores cercanos a  $0$  (sombra) y los cercanos a  $255$  (máxima insolación) son muy raros, lo que es lógico si tenemos en cuenta tanto la orografía de la zona como la forma de calcular el modelo. Ese modelo es la media de  $15$  modelos digitales realizados a partir de posiciones del sol que van desde el este hasta el oeste, calculados para el día 21 de junio.

Finalmente, PEND, muestra valores que oscilan en general entre  $5^\circ$  y  $35^\circ$ , siendo escasísimos los pixels con valores fuera de ese rango (Figura 6.5).

Las variables categóricas, LITO, ESPE, VEGE y PRECIP (a las que previamente se han asignado valores numéricos), presentan distribuciones alejadas de la normalidad, debido a la naturaleza de las mismas y al reducido número de categorías de que constan.

En el apartado siguiente se analiza el significado de las variables y sus posibles relaciones de dependencia.



### 6.1.1 Análisis discriminante

La transformación y selección de variables originales constituye una parte previa crucial para el análisis discriminante. Según se ha comentado anteriormente, en condiciones ideales las variables utilizadas deben cumplir una serie de condiciones (normalidad, independencia, continuidad, etc.). En la realidad, estas condiciones no se cumplen de manera estricta, por lo que en muchos casos es necesario hacer transformaciones que mejoren esas características y permitan utilizar dichas variables, aunque no sea en condiciones óptimas. Naturalmente, la robustez de los análisis así realizados deberá contrastarse por medio de las validaciones correspondientes.

A partir del análisis de normalidad de las variables se constata que una serie de ellas, relacionadas con las características de la cuenca vertiente, ACUENCA, LONG, AFS y LFS tienen un sesgo muy marcado hacia los valores bajos. Por ello, se han transformado, calculando su logaritmo en base diez. Puesto que originalmente existen valores iguales a 0 (coincidentes con las zonas de cresta), no es posible calcular el logaritmo, por lo que previamente se ha sumado 1,1 a todas las celdas del modelo. Como se trata de áreas o longitudes mínimas de 100 m<sup>2</sup> o 10 m, respectivamente, el resultado final apenas se ve alterado. En la Figura 6.6, se muestran los histogramas de frecuencias de estas variables, ya normalizadas.

Por el contrario, la variable rugosidad (RUGOS) tiene un fuerte sesgo hacia los valores altos, indicativos de baja rugosidad. Para corregir esta desviación, los valores de esta variable se elevaron al cuadrado, si bien los resultados obtenidos no mejoraron la normalidad de manera significativa, por lo que al final se han utilizado los valores originales (Figura 6.6b).

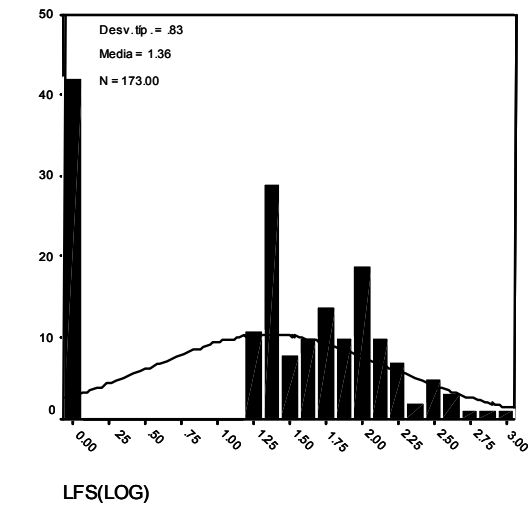
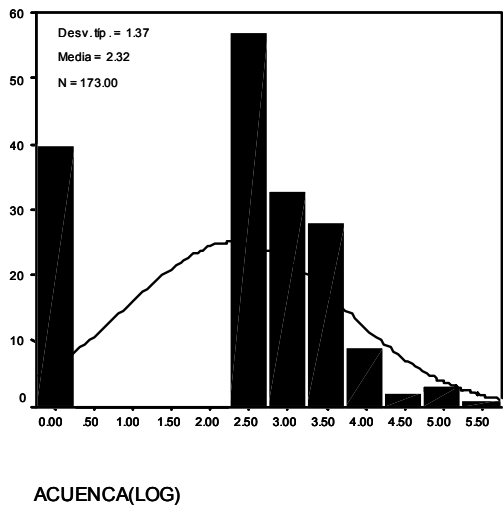
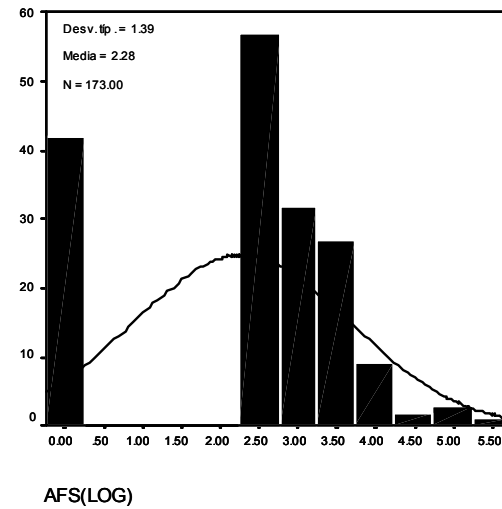
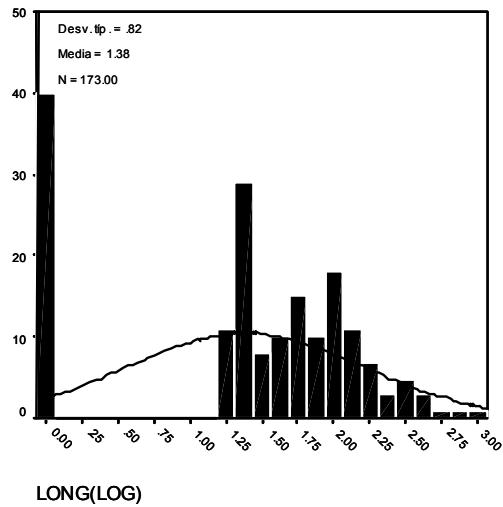


Figura 6.6a. Histogramas de los modelos digitales transformados (log) ACUENCA, LONG, AFS y LFS.



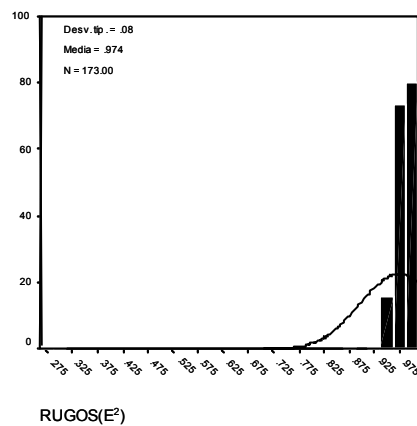
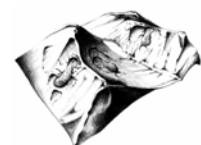


Figura 6.6b. Histograma del modelo digital de rugosidad transformado.

La variable orientación (ORIENT) es una variable circular que ha sido transformada priorizando las orientaciones norte-sur (se recuerda que las orientaciones cercanas a las norte-sur son las más comunes en el Bajo Deva). Para ello los todos los valores se han transformado en valores que oscilan de 0 a 180 (que equivalen a grados).

La variable pendiente de la zona de rotura (PEND) se ha transformado mediante una función seno. Cabría esperar que, a mayor ángulo de pendiente, mayor susceptibilidad a la rotura; sin embargo, a partir de un cierto ángulo ( $>45^\circ$ ) decrece el número de deslizamientos, como consecuencia de que en esas pendientes prácticamente ya no existen formaciones superficiales y, por el contrario, afloran rocas competentes.

Todas las variables categóricas (VEGE, LITO, ESPE) han sido ponderadas, con el fin de poder incluirlas en el análisis discriminante (ver Anexo I). Dicha asignación de valores se ha llevado a cabo a partir de criterio de experto, basado en la experiencia y en el conocimiento sobre el área de estudio y en el análisis de la frecuencia relativa de las distintas categorías (tipos litológicos) en relación con la distribución de deslizamientos. Los valores crecen a medida que favorezcan la inestabilidad. Si bien los valores asignados presentan un cierto problema de subjetividad, el procedimiento es suficientemente robusto y ampliamente aceptado.



El resto de las variables se han aplicado utilizando los datos originales, sin transformaciones.

La Tabla 6.8 muestra los valores obtenidos con el test de normalidad (prueba Kolmogorov-Smirnov), para las variables originales. La Tabla 6.9 refleja los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la misma prueba, pero a las variables transformadas. Los histogramas de las variables transformadas se representan en la Figura 6.6 Como se puede apreciar, la normalidad mejora de manera apreciable, salvo en el caso de RUGOS.

Una vez normalizadas las variables, es necesario conocer la dependencia entre las mismas, para lo que se ha realizado un Análisis Factorial de Componentes Principales. Este tipo de análisis permite, por un lado, determinar la dependencia y correlación entre las variables y, por otro, conocer la estructura de la muestra (Baeza, 1994). Los resultados de tal análisis se muestra en las Tablas 6.10 y 6.11. Dichos resultados muestran que todas las variables se pueden agrupar en cinco componentes independientes. Así, las tres primeras componentes representan el 60% de la varianza, alcanzando un 77,7% cuando se consideran todas ellas.

La primera componente, que explica el 31,6% de la varianza total, estaría formada por las variables referidas a la geometría de la cuenca vertiente (ACUENCA [log], LONG [log], AFS [log], LFS [log]), con la excepción de la pendiente media (PENDM).

La segunda explica el 16,8% de la varianza total y estaría constituida por la pendiente (PEND, PEND [seno]) y por la insolación (INSOL).

La tercera componente, que explica un 11,65% de la varianza total, está constituida por las variables PERFIL, RUGOS, CURVAR y PLA, que representan la convexidad/concavidad y la rugosidad del relieve. Las tres variables que expresan la



Tabla 6.8. Resultados de la prueba Kolmogorov-Smirnov a partir de las variables brutas.

	N	Parámetros normales <sup>a,b</sup>		Z de Kolmogorov-Smirno	Sig. asintót. (bilateral)
		Media	Desviación típica		
ORIENT	173	65.3644	52.7377	2.145	.000
MDE	173	146.8092	80.9163	1.945	.001
PEND	173	21.7249	8.3275	.642	.805
PEND (seno)	173	.6594	.2066	1.351	.052
ACUENCA	173	4010.7820	17151.2285	5.361	.000
LONG	173	76.7060	120.4584	3.487	.000
AFS	173	3978.2676	17155.5898	5.371	.000
LFS	173	74.9000	120.2150	3.547	.000
CURVAR	173	-.4008	2.2215	.903	.388
PERFIL	173	.2021	1.1566	.746	.634
PLA	173	-.1986	1.3035	1.091	.185
RUGOS	173	.9902	3.645E-02	5.235	.000
INSOL	171	153.08	10.41	1.835	.002
PENDM	173	16.2547	11.0870	2.103	.000
ESPE	173	3.1162	1.9708	4.612	.000
VEG	173	15.8902	10.6686	4.637	.000
LITO	173	21.9538	11.1989	5.028	.000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 6.9. Resultados de la prueba Kolmogorov-Smirnov a partir de las variables transformadas.

	N	Parámetros normales <sup>a,b</sup>		Z de Kolmogorov-Smirno	Sig. asintót. (bilateral)
		Media	Desviación típica		
ACUENCA(log)	173	2.3178	1.3716	3.675	.000
LONG (log)	173	1.3849	.8184	2.471	.000
AFS (log)	173	2.2791	1.3878	3.668	.000
LFS (log)	173	1.3603	.8264	2.477	.000
RUGOS (x <sup>2</sup> )	173	.9817	6.045E-02	5.084	.000
RUGOS (x <sup>3</sup> )	173	.9742	7.634E-02	4.922	.000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 6.10. Varianza total explicada por Análisis Factorial.

Componente	Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6.054	35.609	35.609	5.374	31.612	31.612
2	3.029	17.817	53.426	2.858	16.815	48.426
3	1.582	9.305	62.731	1.981	11.650	60.077
4	1.367	8.044	70.775	1.787	10.512	70.589
5	1.175	6.910	77.685	1.206	7.096	77.685

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

	Componente				
	1	2	3	4	5
MDE				-.774	
PEND		.971			
PEND (sen)		.953			
ORI90					.879
CURVAR	-.626		.697		
PERFIL	.432		-.706		
PLA	-.679		.568		
RUGOS			.704		
PENDM	.706	.582			
ESPE				.477	
VEG					-.544
LITO				.849	
ACUENCA(log)	.982				
LONG(log)	.984				
AFS(log)	.968				
LFS(log)	.969				
INSOL		-.755			

Tabla 6.11. Matriz con los pesos de las variables para cada uno de los 5 componentes resultantes del Análisis Factorial (valores mayores a 0,4).

curvatura presentan un coeficiente de correlación superior a 0,8, a excepción de las variables PERFIL y PLA entre sí, debido a que representan curvaturas distintas.

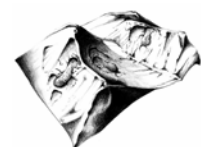
La cuarta componente, con un 10,5% de la varianza total, está representada por las variables LITO, MDE y ESPE, no existiendo correlación entre ellas. Se podrían interpretar como la relación existente entre la altitud y la litología.

La quinta, con un 7% de la varianza total, está representada por la variable orientación (ORIENT), aunque también participa la variable VEGE, en gran parte condicionada por la primera, aunque son bastante independientes entre sí.

Existen por tanto dos grupos de variables fuertemente correlacionadas que son: por un lado, las variables que reflejan las características de la cuenca vertiente (ACUENCA, LONG, AFS y LFS) y, por otro lado, las variables referidas a la concavidad/convexidad del terreno (CURVAR, PERFIL y PLA). La Tabla 6.11, muestra el peso de cada una de las variables en las componentes resultantes.

Una vez conocidas las agrupaciones de variables, se han llevado a cabo diversos tests de contraste entre las poblaciones estables e inestables, para cada variable de la muestra. Estos tests permiten conocer el poder discriminante de cada variable con respecto a la variable de agrupación (componente) y, con ello, permiten seleccionar las variables que deben introducirse en el análisis, evitando la redundancia de variables dependientes. Mediante el test-T se calcula la media y la desviación típica para cada una de las variables, de las poblaciones estables e inestables, de manera que cuando las medias y las desviaciones de ambas poblaciones sean muy similares, deberán ser eliminadas del análisis discriminante. Las pequeñas diferencias entre ambas muestras implican un bajo o nulo poder discriminante de las variables respecto a la estabilidad/inestabilidad.

Los resultados del test-T se muestran en la Tabla 6.12. Tal y como se puede apreciar,



las variables ESPE, RUGOS e INSOL presentan medias y desviaciones muy similares entre las poblaciones de inestables (1) y estables (2), lo que indica que tienen un poder discriminante nulo y, por lo tanto, deben ser eliminadas. Esta eliminación no debe entenderse necesariamente en el sentido de que esas tres variables son irrelevantes como condicionantes de los deslizamientos; más bien, se debe a que tal como están expresadas las variables, no presentan relación con la distribución de deslizamientos existente. La “no-relación” es probablemente la explicación más adecuada en el caso de INSOL, y posiblemente también en RUGOS. Sin embargo, en el caso de ESPE muy probablemente la causa es la estructura de los datos sobre la variable, expresados en 5 clases (0; 0-0,5; 0,5-1; 1-2; 2-4; >4 m). La práctica totalidad de los deslizamientos se localizan sobre las clases 1-2 m y 2-4 m, dado que en las otras, o no hay casi regolito o corresponden a zonas llanas cubiertas de depósitos superficiales de varios metros de espesor. Parece claro que el poder discriminante de la variable mejoraría considerablemente si pudiera expresarse de forma continua (por ejemplo, por medio de un mapa de isopacas suficientemente preciso), pero esto es inviable en la práctica totalidad de las situaciones.

Como criterio adicional de selección de las variables que deben introducirse en el análisis discriminante, se ha realizado el Test Oneway (varianzas múltiples). Se obtiene de esta forma una tabla con los valores de F (estadístico de Fisher) y con la probabilidad de F (o significación); estos dos valores son los que se han utilizado para seleccionar las variables finales, de forma que cuanto mayor sea F, tanto mayor será la capacidad discriminante de la variable. La Tabla 6.13 muestra los resultados del test Oneway de varianzas múltiples. Los resultados indican que las variables RUGOS, INSOL y ESPE tienen un poder discriminante nulo y que PERFIL y CURVAR presentan un bajo poder discriminante. No obstante, hay que destacar que no existe una sola variable con alto poder discriminante, siendo PEND, PEND (seno), LITO y ORIENT las únicas que presentan cierto valor discriminante.

De las variables que muestran una mayor correlación entre sí, se han elegido las que presentan un mayor F (Oneway). Así, entre ACUENCA, LONG, AFS y LFS, se ha

Tabla 6.12. Resultados del Test-T.

MUESTRA		N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
MDE	1	84	131.1071	42.5325	4.6407
	2	89	161.6292	103.1192	10.9306
PEND	1	84	23.9395	6.6708	.7278
	2	89	19.6347	9.1909	.9742
PEND(sen)	1	84	.7223	.1572	1.716E-02
	2	89	.6000	.2297	2.435E-02
ORIENT	1	84	79.4362	57.4021	6.2631
	2	89	52.0830	44.2823	4.6939
CURVAR	1	84	-.6825	2.1767	.2375
	2	89	-.1348	2.2427	.2377
PERFIL	1	84	.2930	1.0717	.1169
	2	89	.1164	1.2313	.1305
PLA	1	84	-.3896	1.3037	.1422
	2	89	-1.84E-02	1.2847	.1362
RUGOS	1	84	.9904	3.621E-02	3.951E-03
	2	89	.9899	3.688E-02	3.909E-03
INSOL	1	83	153.20	10.34	1.14
	2	88	152.97	10.54	1.12
PENDM	1	84	18.4620	9.6568	1.0536
	2	89	14.1714	11.9692	1.2687
ESPE	1	84	3.2357	1.9528	.2131
	2	89	3.0034	1.9921	.2112
VEG	1	84	18.0119	9.7505	1.0639
	2	89	13.8876	11.1553	1.1825
LITO	1	84	25.3214	9.2243	1.0065
	2	89	18.7753	11.9931	1.2713
ACUENCA(log)†	1	84	2.5457	1.1306	.1234
	2	89	2.1027	1.5412	.1634
LONG(log)	1	84	1.5314	.6879	7.506E-02
	2	89	1.2465	.9071	9.615E-02
AFS(log)	1	84	2.5457	1.1306	.1234
	2	89	2.0274	1.5579	.1651
LFS(log)	1	84	1.5314	.6879	7.506E-02
	2	89	1.1988	.9133	9.681E-02

Tabla 6.13. Resultados del test Oneway.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
MDE	Inter-grupos	40257.905	1	40257.905	6.340	.013
	Intra-grupos	1085902.8	171	6350.309		
	Total	1126160.7	172			
PEND	Inter-grupos	800.834	1	800.834	12.307	.001
	Intra-grupos	11127.010	171	65.070		
	Total	11927.845	172			
PEND(sen)	Inter-grupos	.646	1	.646	16.511	.000
	Intra-grupos	6.696	171	3.916E-02		
	Total	7.342	172			
ORIENT	Inter-grupos	32332.533	1	32332.533	12.395	.001
	Intra-grupos	446045.787	171	2608.455		
	Total	478378.320	172			
CURVAR	Inter-grupos	12.963	1	12.963	2.652	.105
	Intra-grupos	835.892	171	4.888		
	Total	848.855	172			
PERFIL	Inter-grupos	1.347	1	1.347	1.007	.317
	Intra-grupos	228.757	171	1.338		
	Total	230.103	172			
PLA	Inter-grupos	5.954	1	5.954	3.556	.061
	Intra-grupos	286.303	171	1.674		
	Total	292.257	172			
RUGOS	Inter-grupos	1.179E-05	1	1.179E-05	.009	.925
	Intra-grupos	.229	171	1.336E-03		
	Total	.229	172			
INSOL	Inter-grupos	2.438	1	2.438	.022	.881
	Intra-grupos	18436.416	169	109.091		
	Total	18438.854	170			
PENDM	Inter-grupos	795.564	1	795.564	6.686	.011
	Intra-grupos	20347.051	171	118.989		
	Total	21142.615	172			
ESPE	Inter-grupos	2.333	1	2.333	.599	.440
	Intra-grupos	665.742	171	3.893		
	Total	668.075	172			
VEG	Inter-grupos	735.049	1	735.049	6.671	.011
	Intra-grupos	18841.864	171	110.186		
	Total	19576.913	172			
LITO	Inter-grupos	1851.803	1	1851.803	16.058	.000
	Intra-grupos	19719.827	171	115.321		
	Total	21571.630	172			
ACUENCA(log)	Inter-grupos	8.480	1	8.480	4.602	.033
	Intra-grupos	315.117	171	1.843		
	Total	323.597	172			
LONG(log)	Inter-grupos	3.508	1	3.508	5.371	.022
	Intra-grupos	111.686	171	.653		
	Total	115.195	172			
AFS(log)	Inter-grupos	11.608	1	11.608	6.209	.014
	Intra-grupos	319.677	171	1.869		
	Total	331.285	172			
LFS(log)	Inter-grupos	4.782	1	4.782	7.257	.008
	Intra-grupos	112.686	171	.659		
	Total	117.468	172			

seleccionado LFS; del grupo de CURVAR, PERFIL y PLA, se ha seleccionado PLA; por último, las variables ESPE, INSOL y RUGOS, han sido desestimadas por presentar un bajo poder discriminante entre las poblaciones estables/inestables, a partir de los tests T y Oneway.

Todo este proceso, en conjunto, ha permitido seleccionar las variables con mayor capacidad discriminante, tratando de cumplir el principio de independencia. Las variables seleccionadas han sido: DEM, ORIENT, PLA, PENDM, VEG, LITO, PEND y LFS, si bien para el cálculo de la función discriminante se han incluido también la variable PERFIL, por no estar correlacionada con PLA, y el seno de PEND.

Una vez seleccionadas las variables, se han calculado diferentes funciones discriminantes, combinando las variables entre sí de distinta forma. En la Tabla 6.14 se muestran las distintas combinaciones de variables realizadas para el cálculo de la función discriminante. De entre todas ellas, se debe seleccionar la que presente el mayor grado de acierto para la población de inestables y menor acierto para estables, con el mínimo número de variables. La función seleccionada está constituida por la combinación de seis variables (PEND+LFS+ORIENT+LITO+VEGE +PENDM) y tiene un 75,7% de acierto total, con una Lambda de Wilks de 0,671, lo que indica que se trata de una función no demasiado buena.

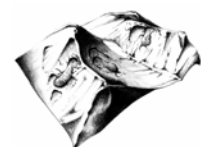


Tabla 6.14. Combinaciones de variables utilizadas para calcular distintas funciones discriminantes. En negrita se resalta la combinación seleccionada. INEST: porcentaje de aciertos de la población de inestables. EST: porcentaje de acierto de la población de estables. TOTAL: porcentaje total de aciertos.

INEST %	EST %	TOTAL %	VARIABLES FINALES	VARIABLES EXCLUIDAS
75.0	75.3	75.1	PEND (seno) + ORIENT + LITO + VEGE + LFS (log)	PENDM, PERFIL, PLA, MDE
76.2	75.3	75.7	PEND (seno) + LFS (log) + ORIENT + VEGE + PENDM + LITO + MDE	PERFIL, PLA
78.6	73.0	75.7	<b>PEND (seno) + LFS (log) + ORIENT + LITO + VEGE + PENDM</b>	PREFIL, PLA
75.0	76.4	75.7	PEND (seno) + LITO + ORIENT + VEGE + PLA	PENDM
75.0	76.4	75.7	PEND (seno) + LITO + ORIENT + VEGE + PLA	
73.8	67.4	70.5	PEND (seno) + LITO + VEGE + PLA	
73.8	67.4	70.5	PEND (seno) + LITO + VEGE + PLA	PENDM
76.2	67.4	71.7	PEND (seno) + LFS (log) + LITO + PENDM + VEGE	PLA

En la Tabla 6.15 se indican las variables incluidas en la función seleccionada, con los coeficientes estandarizados.

Tabla 6.15. Coeficientes estandarizados para las variables de la función discriminante seleccionada.

Variable	Coeficiente
PEND (seno)	0,920
ORIENT	0,520
PENDM	-0,424
VEGE	0,462
LITO	0,467
LFS (log)	0,601



En la función resultante los valores discriminantes altos de las variables están asociados a laderas inestables, mientras que los valores bajos se asocian a laderas estables. Por ello, los valores elevados de las variables con coeficiente positivo en la función contribuyen a incrementar el valor de ésta, favoreciendo la inestabilidad. Por el contrario, las variables con valores altos y coeficientes de signo negativo favorecen la estabilidad.

En la Figura 6.7 se muestran los histogramas con la distribución de las celdas estables e inestables del mapa elaborado a partir de la función discriminante seleccionada. Las celdas inestables deberían tener valores superiores a 0; sin embargo, oscilan entre  $-1,75$  y  $3$ , quedando un 22% de las mismas con valores por debajo del índice discriminante  $F = 0$ . Las celdas estables presentan valores comprendidos entre  $-2,75$  y  $0,75$ , quedando un 73% de los casos bien clasificados. De estos resultados se deduce que las poblaciones estables e inestables se solapan entre los valores  $-1,75$  y  $0,75$ . Los centroides de las poblaciones no se encuentran muy separados, a la vez que la Lambda de Wilks refleja una insuficiente capacidad de separación de las poblaciones por parte de la función discriminante. El acierto total es del 75,7% de los casos.

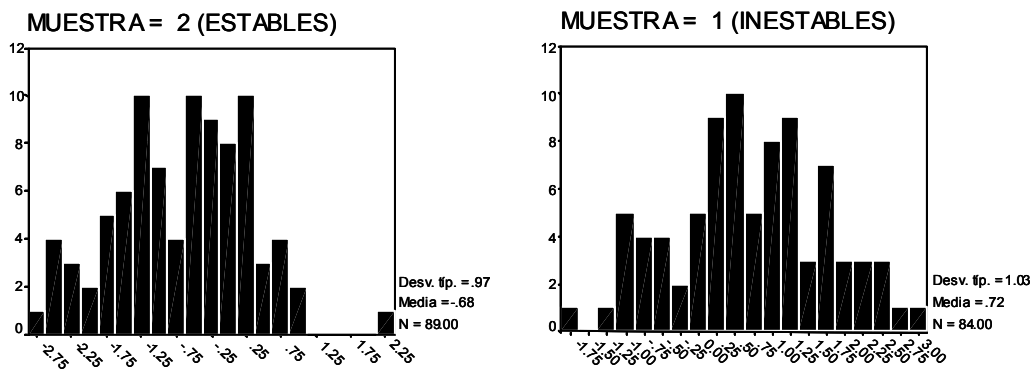
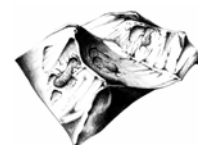


Figura 6.7. Histogramas de distribución de las celdas estables e inestables del mapa de susceptibilidad elaborado a partir de la función indicada en la Tabla 6.14.



Para construir el modelo de susceptibilidad y elaborar el mapa correspondiente se han aplicado los coeficientes no estandarizados de la función discriminante seleccionada (Tabla 6.16).

Tabla 6.16. Coeficientes no estandarizados de la función discriminante seleccionada.

Variable	Coeficiente
PEND (seno)	4,647
ORIENT	0,010
PENDM	-0,039
VEGE	0,044
LITO	0,044
LFS (log)	0,741
Constante	-5,761

Luego, para calcular la función discriminante se ha aplicado la siguiente fórmula:

$$\text{Valor discriminante} = (4,647 * [\text{seno PEND}]) + (0,010 * [\text{ORIENT "0-180"}]) + (-0,039 * \text{PENDM}) + (0,044 * \text{VEGE}) + (0,044 * \text{LITO}) + (0,741 * [\log \text{LFS}]) - 5,761$$

Los valores resultantes del modelo oscilan entre -5,213 y 4,228 con una media de -0,440 y una desviación estándar de 1,121. Los valores obtenidos se han reclasificado en 200 clases, representativas cada una de ellas del 0,5% del área de estudio. El resultado se muestra en el mapa de la Figura 6.8. La distribución de las clases de susceptibilidad en ese mapa, se ha obtenido reclasificando los pixels y agrupándolos en clases de igual área, según se explicó en el capítulo de metodología. Las zonas de mayor susceptibilidad en el mapa tienden a presentar pautas lineales y corresponden en gran medida a laderas con pendientes medias sobre flysch.

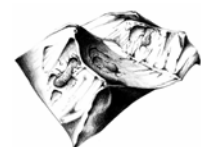
Más adelante se presenta la comparación de este modelo con los obtenidos por medio de funciones de favorabilidad.

## 6.1.2 Funciones de Favorabilidad

La aplicación de las funciones de favorabilidad también requiere una selección de variables para evitar redundancias, dado que en la mayoría de los casos la lógica matemática implica independencia entre las mismas. Esa selección se ha hecho, en parte, a partir del análisis anterior. Sobre la base de dicho análisis, se han identificado las variables que presentan una alta correlación; es decir, que son dependientes entre sí. Dichas variables se han agrupado para crear nuevas variables, que constituyen combinaciones lineales de varias variables originales. Esas combinaciones son ACUENCA+LONG+AFS+LFS; CURVAR+PERFIL+PLA; ORIENT+INSOL. Los análisis se han realizado tanto con las variables agrupadas como con las variables sin agrupar.

La selección de variables se ha completado a través de la validación con muestras independientes, por medio de un análisis de sensibilidad consistente en una modelización-validación iterativa, que ha permitido identificar las variables que mejor explican la distribución de deslizamientos observada. En el apartado siguiente se presenta el resultado de esa operación.

Para introducir las variables en el análisis, se ha procedido a una categorización de las mismas. La categorización de las variables continuas consiste en la transformación de los valores numéricos iniciales en un número discreto de clases, según determinados intervalos de valor. Esta transformación es conveniente hacerla para simplificar y agilizar el proceso de superposición posterior de las variables, que se complicaría extraordinariamente si las variables fueran continuas. Si la superposición se hiciera con variables continuas el número de combinaciones podría llegar a ser tan grande como el total de celdas existentes en el área de estudio (3,6 millones de celdas para el caso del Bajo Deva cuando el tamaño de celda es de 10 x 10 m), por lo que conviene limitar el número de combinaciones. La categorización es un proceso controlado por el operador, aunque se dispone de un número de técnicas matemáticas que facilitan el



establecimiento de las clases. En este sentido, se pueden utilizar análisis de frecuencia, frecuencias relativas de deslizamientos, o estadísticos más complejos, así como el criterio experto aplicado al análisis de ciertas variables naturales, como por ejemplo el control de la pendiente topográfica sobre la aparición de deslizamientos (ángulos límites, frecuentes, etc.). Desde un punto de vista matemático la categorización de variables tiene siempre un sentido lógico, pues es una abstracción. Por el contrario la asignación de valores a variables categóricas tiene un rigor matemático mucho menor. Además, es posible que algunas variables continuas no tengan significado para todos sus valores, pero sí para rangos de valor. En este sentido, la continuidad de variables, en algunos casos, puede ser un artificio del método de medida que carece sentido físico evidente.

Las variables continuas categorizadas han sido PEND, ORIEN, ACUENCA, LONG, PENDM, CURVAR, PERFIL, PLA, RUGOS, INSOL, LFS, AFS, DEM. Los criterios de categorización de estas variables se presentan en el Anexo I. Una vez categorizadas estas variables pueden ya ser utilizadas junto con las originalmente categóricas (ESPE, LITOL, VEGET, MOVPT).

Los mapas de variables condicionantes se superponen posteriormente, mediante una operación de cruce de mapas expresados en clases de las variables, para obtener las subáreas o unidades de condición única, cada una de las cuales representa una única combinación de los valores/clases de cada una de las variables cruzadas. La Tabla 3.3 representa un ejemplo de unidades de condición única generadas por combinación de variables, en la que se indican los valores de las variables que definen cada unidad y el número de celdas que la componen. La utilización de clases de condición única permite reducir enormemente el número de unidades de análisis, sin pérdida de información y, por tanto, facilitando el cálculo. Así, por ejemplo, del millón y medio de celdas en las que se ha dividido el área estudiada en el Bajo Deva, se pasa a menos de 30.000 unidades de condición única, en el caso de la combinación DEM+ORIENT+PEND+LITO+ VEGET.

## Bajo Deba : Modelo de susceptibilidad mediante análisis discriminante

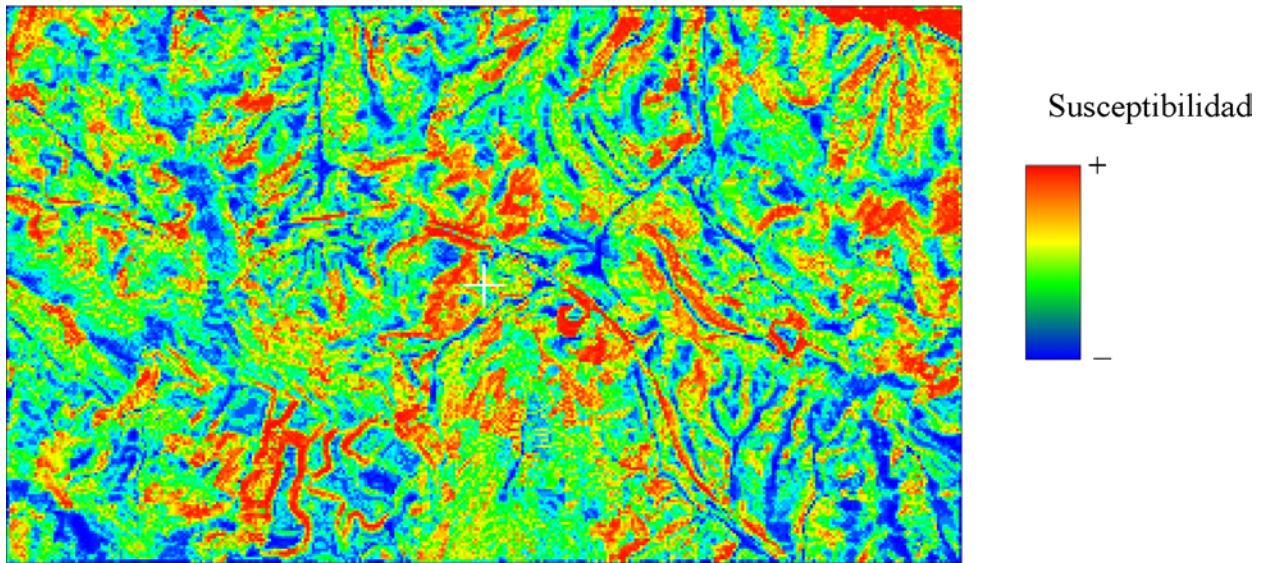


Figura 6.8. Mapa de susceptibilidad de la zona de Itziar mediante análisis discriminante.

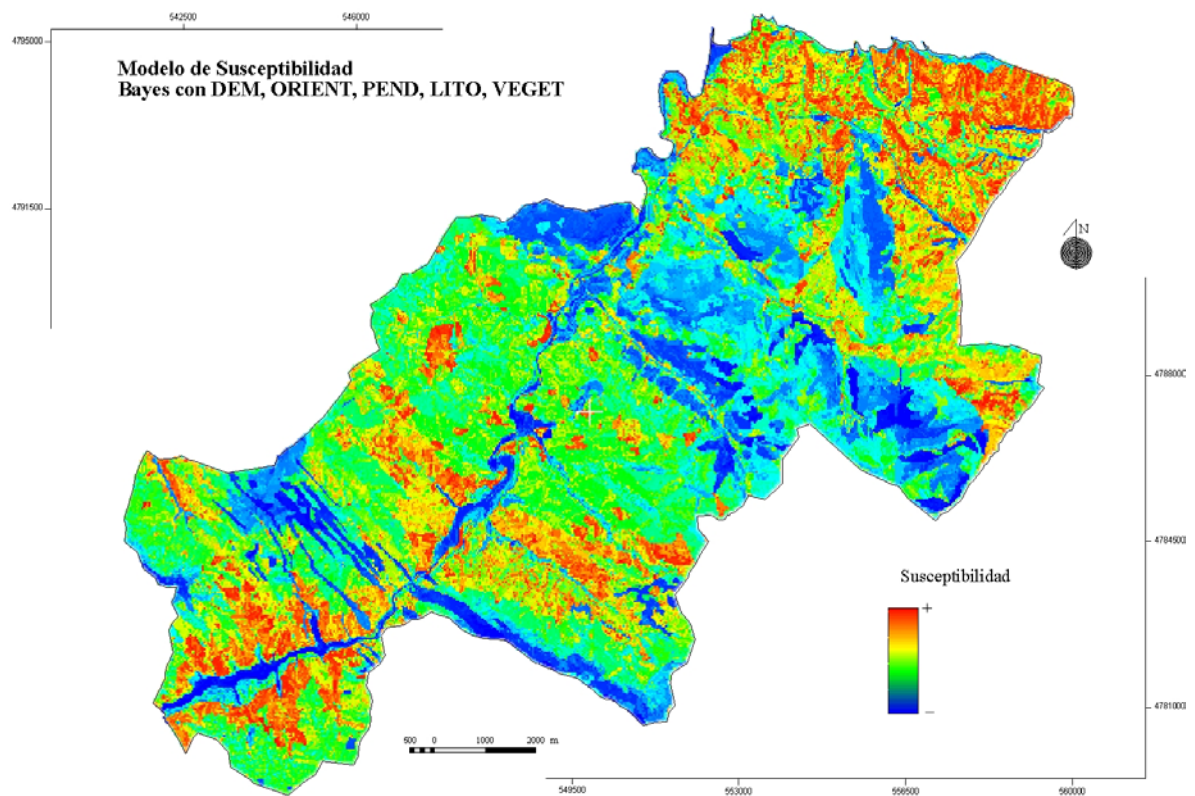


Figura 6.9. Mapa de susceptibilidad del Bajo Deva mediante la FF Bayes.



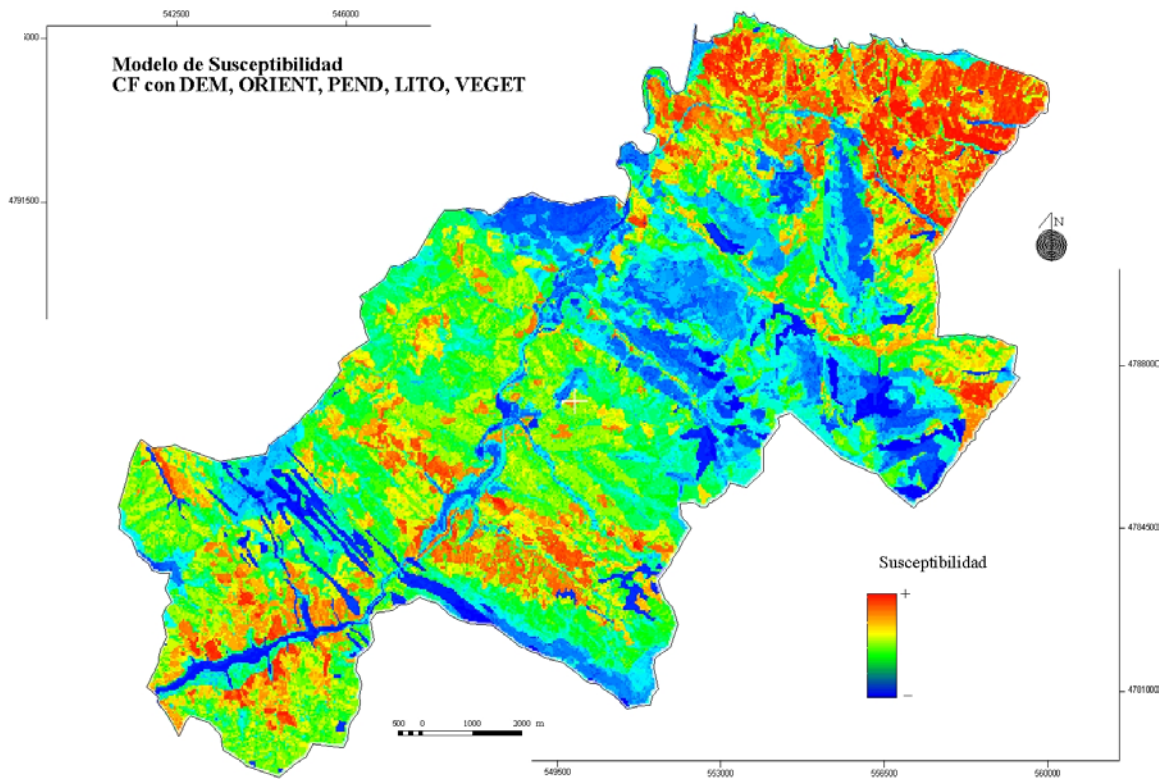


Figura 6.10. Mapa de susceptibilidad del Bajo Deva mediante la FF Factor de Certidumbre.

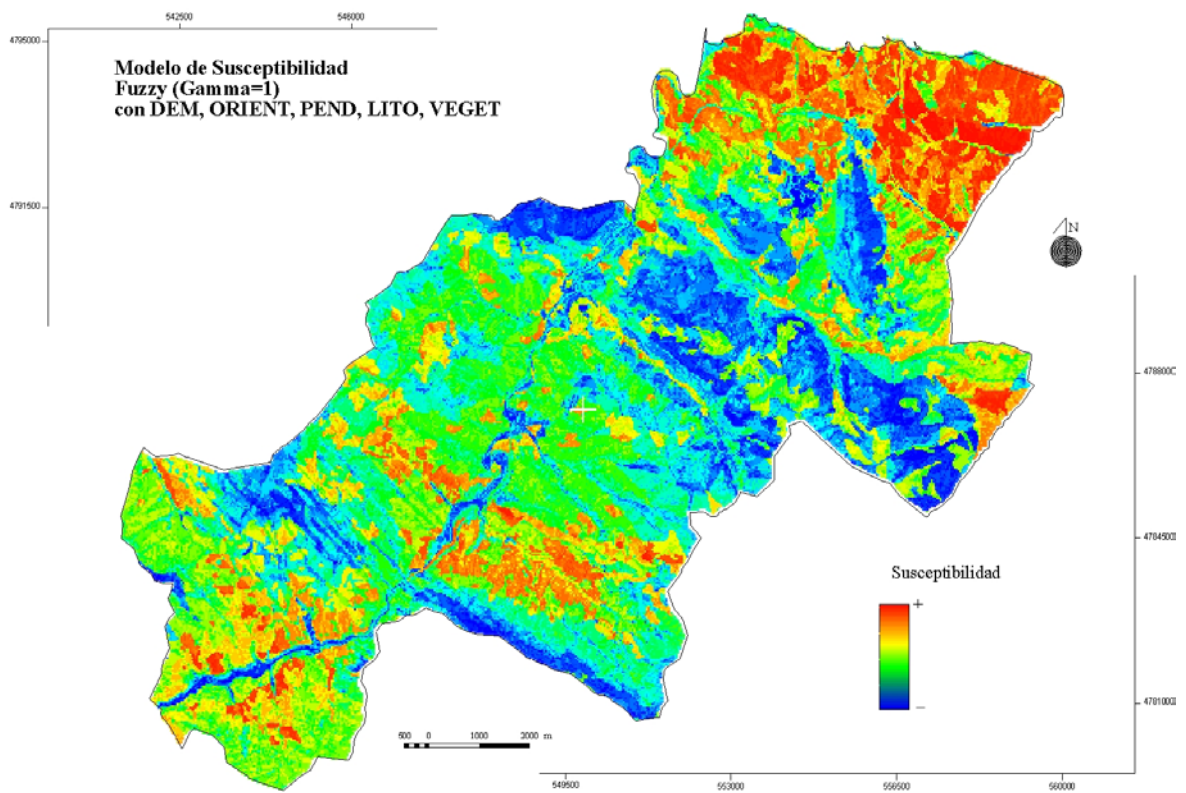
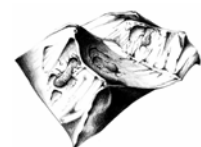


Figura 6.11. Mapa de susceptibilidad del Bajo Deva mediante la FF Fuzzy (Gamma=1).

Paralelamente a la creación de unidades de condición única, se calculan los valores de favorabilidad mediante análisis bivariable, de cada una de las variables con el mapa de deslizamientos. Estos valores de favorabilidad se pueden estimar a partir de la función (apartado 3.2.3.1) propuesta por Chung y Fabbri (1993). Se obtienen así unas tablas (Tabla 3.2), tantas como variables consideradas, en las que se describen los valores de favorabilidad para cada una de las clases de cada variable y la “probabilidad *a priori*” de encontrar un deslizamiento en todo el área de estudio. Estos valores de cada variable están definidos dentro de un intervalo que es común para todas ellas, lo que permite su posterior integración. En este momento, se dispone ya de valores de favorabilidad (o lo que es lo mismo, de susceptibilidad) para cada una de las variables. Evidentemente, estos valores de favorabilidad deberán ser interpretados de forma distinta, dependiendo de cual sea la técnica matemática que se pretenda emplear; esto es, podrán entenderse como probabilidades, certidumbre, pertenencia difusa a un conjunto, etc.

Como el proceso de inestabilidad de las laderas está condicionado por muy diversas variables, es preciso ahora integrar todas ellas para obtener un mapa de susceptibilidad final. En realidad, los valores de susceptibilidad obtenidos anteriormente no deben considerarse como probabilidad absoluta, sino que son valores relativos que indican cuanto más “propensa” a moverse es una unidad de condición única con respecto a otra. Para integrar las variables se han utilizado los procedimientos descritos en el capítulo 3.

Los valores finalmente obtenidos de probabilidad, certidumbre, grado de pertenencia, etc. son relativos y deben entenderse con precaución, por lo que importa más el orden que el valor de los mismos, tal y como se ha comentado en el apartado 3.2.3.3 (Visualización de los modelos de susceptibilidad). Por ello, todos los valores numéricos finales se clasifican en 200 clases (con intervalos cada 0,5%), lo que implica una memoria de 1 byte (8 bits) por píxel, posibilitando el almacenamiento de valores comprendidos entre 0 y 255. Las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11 muestran varios mapas de susceptibilidad elaborados a partir de diferentes técnicas matemáticas desarrolladas en



el marco de las funciones de favorabilidad. La traza de los mapas así obtenidos refleja a grandes rasgos la geología de la zona de estudio, lo cual es bastante lógico. Estos mapas, al igual que el de la Figura 6.8, representan un primer producto del análisis de susceptibilidad, que resulta de interés a efectos de planificación y mitigación, si bien hay que tener presente que no incorporan la validación. La claridad y aplicabilidad de estos mapas pueden mejorarse a través de su reclasificación en un número reducido de categorías (3, 5, etc.), tal como se muestra en la Figura 6.12.

### 6.1.3 Variables

Los mapas de susceptibilidad obtenidos de acuerdo con lo descrito en el apartado anterior han requerido, evidentemente, una selección previa de las variables a utilizar. Dicha selección se puede llevar a cabo de acuerdo con los procedimientos de análisis factorial y estadísticos descriptivos anteriormente explicados, o bien puede realizarse por medio de un análisis de sensibilidad, que a continuación se presenta. Este análisis consiste en el establecimiento de distintas combinaciones de variables (desde sólo una hasta todas ellas) y la subsiguiente validación del modelo de susceptibilidad resultante, con muestras de deslizamientos independientes de la utilizada para el análisis. El examen de las gráficas de validación permite identificar las combinaciones más adecuadas. Este procedimiento tiene la ventaja, con respecto al anteriormente descrito, de que la selección de variables implica una validación independiente, lo que le hace más robusto. Por el contrario, tiene el inconveniente de que su aplicación es larga y tediosa, ya que exige la elaboración y testificación de multitud de modelos, por lo que solamente es posible llevarlo a cabo con una aplicación informática del tipo SDI (Chung et al., 1998).

El procedimiento más aconsejable es realizar una selección inicial, rápida, por medio de análisis factorial, y posteriormente aplicar el análisis de sensibilidad a un número reducido de combinaciones, identificadas a partir de aquél.



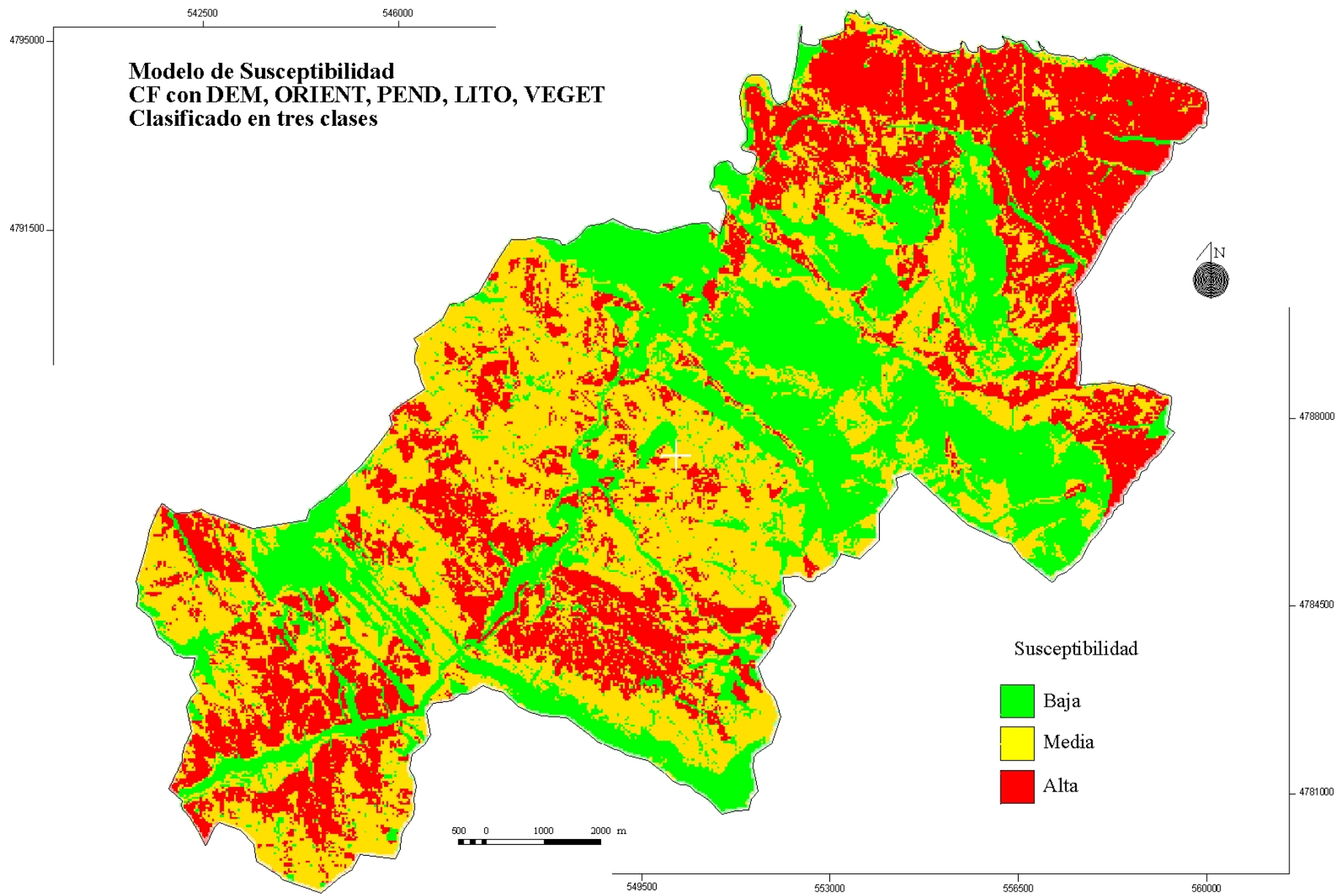


Figura 6.12. Mapa de susceptibilidad del Bajo Deva a partir de la figura 6.10 reclasificada en tres clases.

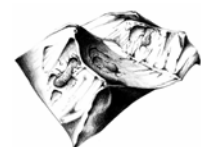


El número total de combinaciones de variables (modelos de susceptibilidad) ensayados supera los 200. A continuación se presentan los resultados obtenidos para algunos de dichos modelos.

En la Figura 6.13 se presentan las curvas de validación de modelos de susceptibilidad para algunas combinaciones de 1, 2, ó 3 variables. Se aprecia claramente que la variable ESPE prácticamente no tiene poder discriminante, tal como se puso de manifiesto por medio del análisis factorial. Por el contrario, variables como LITO y VEGE explican, por sí solas, una parte apreciable de la distribución observada. El resultado mejora al combinar variables, siendo la combinación LITO+VEGE la más adecuada (la incorporación de ESPE no varía el resultado), lo que es bastante razonable y coincidente con el conocimiento empírico.

La Figura 6.14 muestra las gráficas de validación de modelos de susceptibilidad elaborados utilizando únicamente variables de tipo geométrico, sin incluir información geológica, geomorfológica o de cobertura. Se aprecia que, en líneas generales, la capacidad predictiva del modelo aumenta a medida que se añaden nuevas variables; así, por ejemplo, con el 20% de la población de pixels con mayor susceptibilidad se pasa de predecir aproximadamente el 35% de los deslizamientos cuando se utilizan solamente pendiente y orientación, a predecir aproximadamente el 55% si se añaden PEND, CURVAR, PERFIL, PLA, ACUENCA, LONG, AFS y LFS.

Ahora bien, la Figura 6.15, pone de manifiesto que la combinación anterior da prácticamente los mismos resultados que otra con solamente tres variables adecuadamente seleccionadas: PEND, ORIENT y MDE. La adición de variables relativas a rasgos de significado más directamente relacionado con los procesos geomorfológicos, como PRECIP, AFS o LFS (Figuras 6.16 y 6.17) no aumenta prácticamente la precisión del modelo anterior.



En la Figura 6.18 se pone de manifiesto la prácticamente nula influencia que tienen las variables RUGO e INSOL, cuya eliminación del modelo de susceptibilidad obtenido con el conjunto de las variables no altera el resultado. Esto coincide con lo detectado anteriormente por medio del análisis factorial, el test-T y el Oneway. La explicación de esto es que la insolación se calcula a partir de la pendiente y la orientación del pixel, por lo que es en gran medida redundante con PEND+ORIENT. En el caso de RUGOS, como se ha comentado, se debe sobre todo a la forma de expresar la variable.

Por último, la Figura 6.19, revela que el mejor modelo no es precisamente el que incluye todas las variables, sino el que combina MDE, PEND, ORIENT, LITO y VEGE.

Por el contrario, variables que aparecían como significativas en el análisis discriminante, concretamente LFS y PENDM, no parecen aportar mejoras sustanciales a los modelos de susceptibilidad ensayados. Igualmente, MDE, que según el análisis discriminante no parecía especialmente explicativa, resulta una variable importante para los modelos de susceptibilidad aquí comentados.

A la vista de lo anterior, se puede aceptar inicialmente que la combinación más adecuada de variables es MDE, PEND, ORIENT, LITO y VEGE, por proporcionar el modelo de susceptibilidad que combina una alta capacidad predictiva con unas necesidades de información limitadas.

El análisis de susceptibilidad permite también evaluar la pérdida de precisión que implica la transformación de variables continuas en categóricas. Para ello, se han comparado los resultados obtenidos para las variables categorizadas, utilizando distintos números de clases. Las Figuras 6.20 y 6.21 muestran respectivamente, las curvas de acierto y de predicción para PEND y MDE. Se aprecia que, a partir de 10 clases, la mejora en los resultados es mínima si se amplía el número de éstas, incluso cuando se utilizan tantas clases (88) que la variable es prácticamente continua. Resultados similares se obtienen cuando se consideran combinaciones de variables, tal

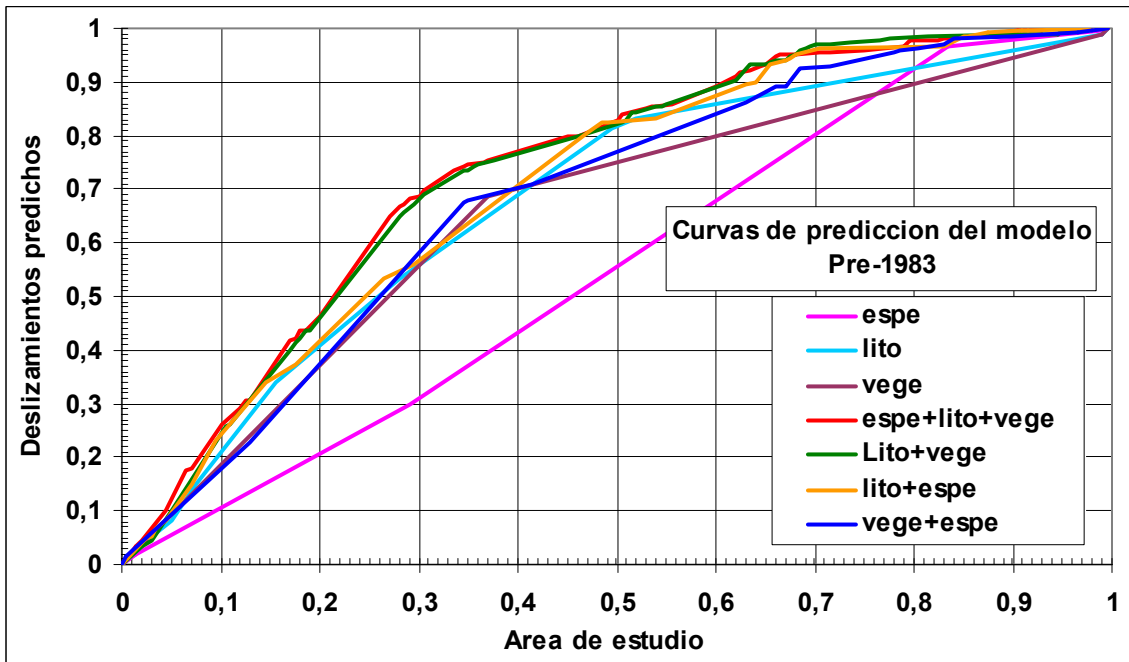


Figura 6.13. Curvas de predicción de distintos modelos de variables individuales o combinadas de dos en dos o de tres en tres, elaborados a partir de los deslizamientos previos a 1983 y validados con la población posterior a 1983.

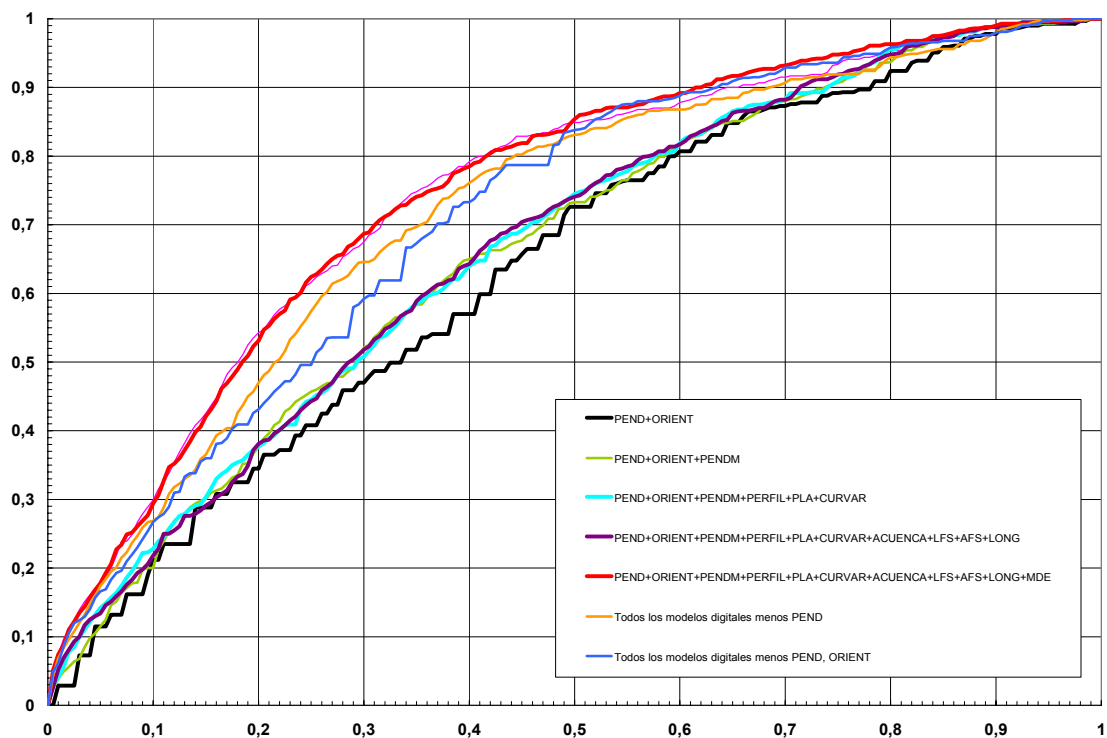


Figura 6.14. Curvas de validación (predicción) de modelos de susceptibilidad, utilizando únicamente variables de tipo geométrico.

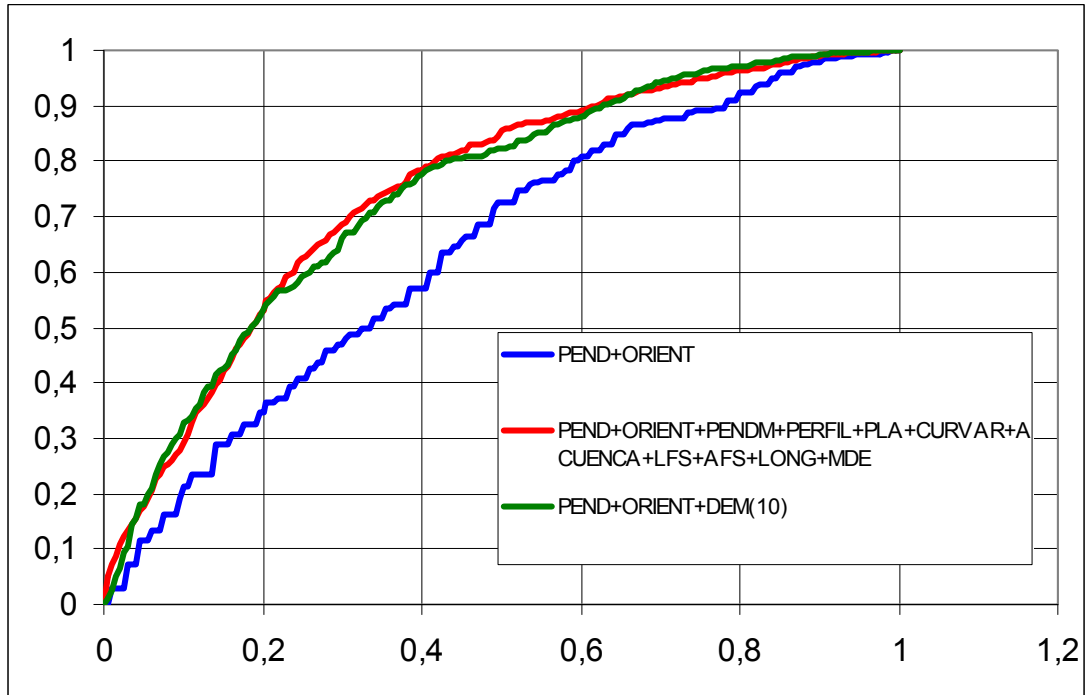


Figura 6.15. Curvas de validación de modelos de susceptibilidad, a partir de variables derivadas del MDE. La combinación PEND+ORIENT+DEM predice prácticamente lo mismo que todas las variables a la vez.

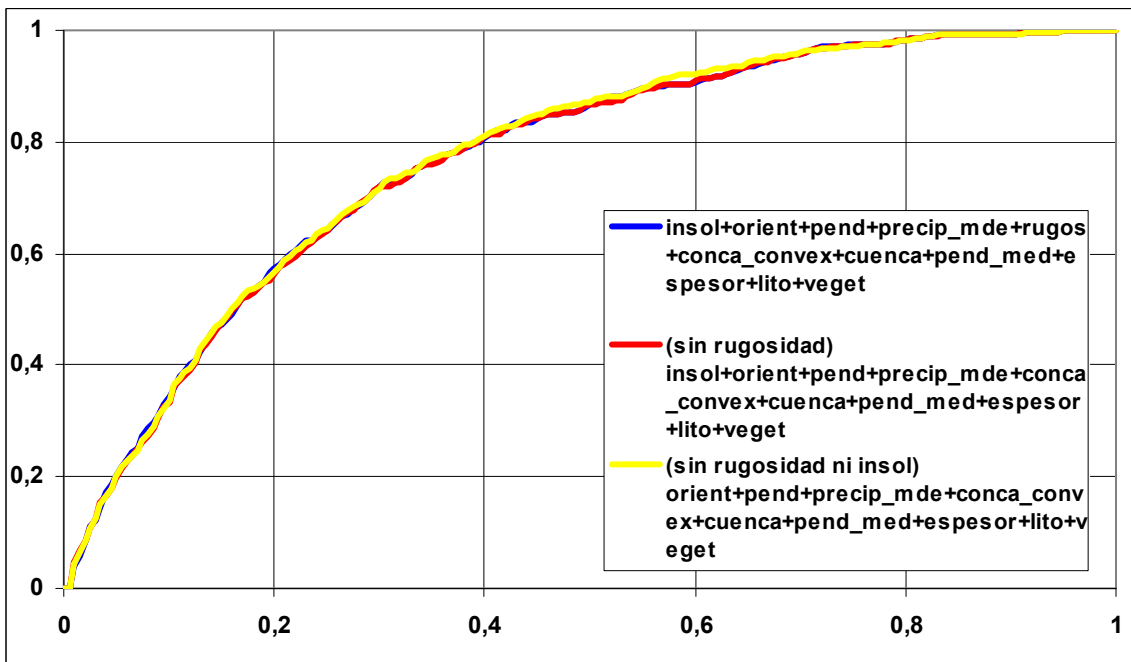


Figura 6.18. Curvas de predicción que ponen de manifiesto la nula influencia de las variables rugosidad e insolación.

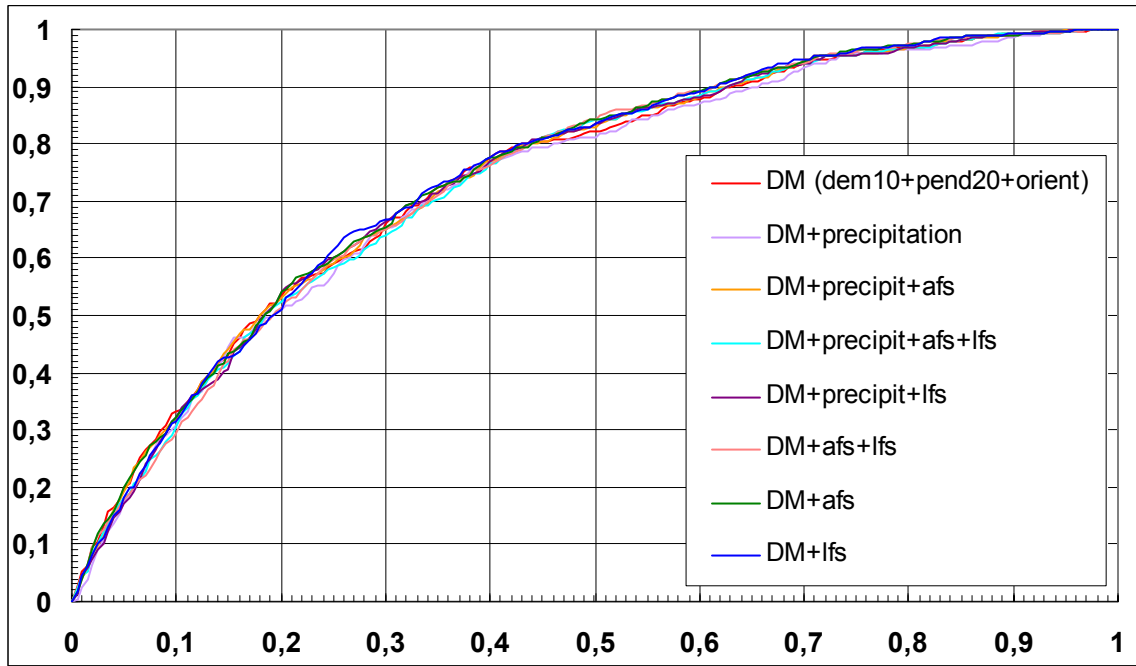


Figura 6.16. Curvas de validación (predicción) que ponen de manifiesto que algunas variables derivadas del modelo digital de elevaciones no contribuyen prácticamente nada a mejorar la predicción.

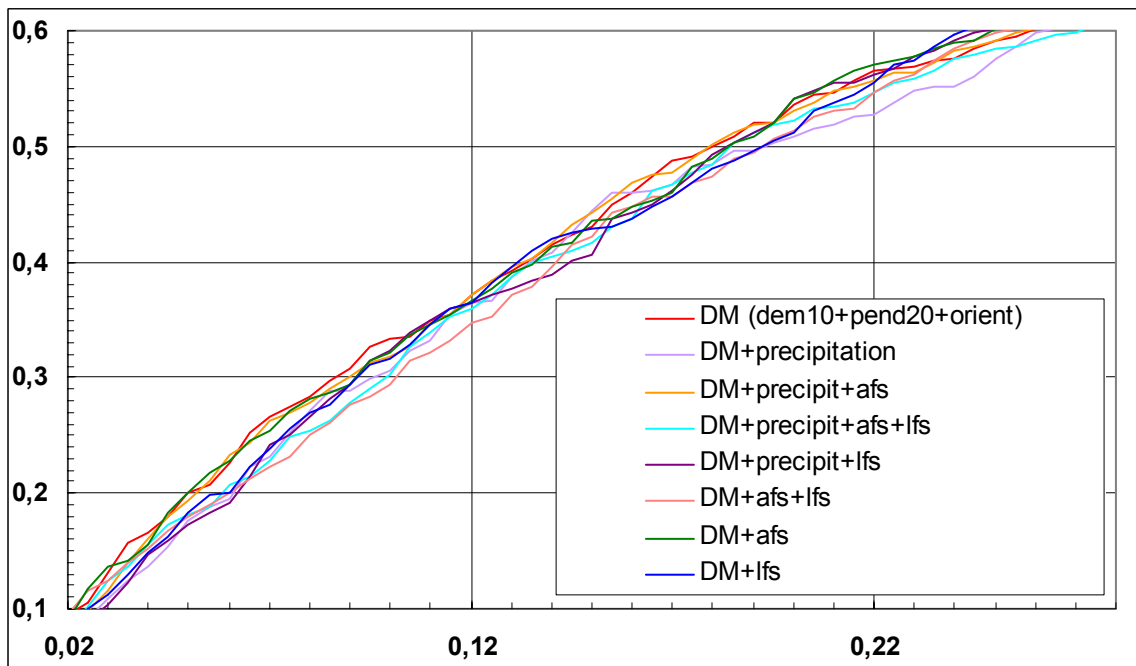


Figura 6.17. Detalle de l figura 6.16.

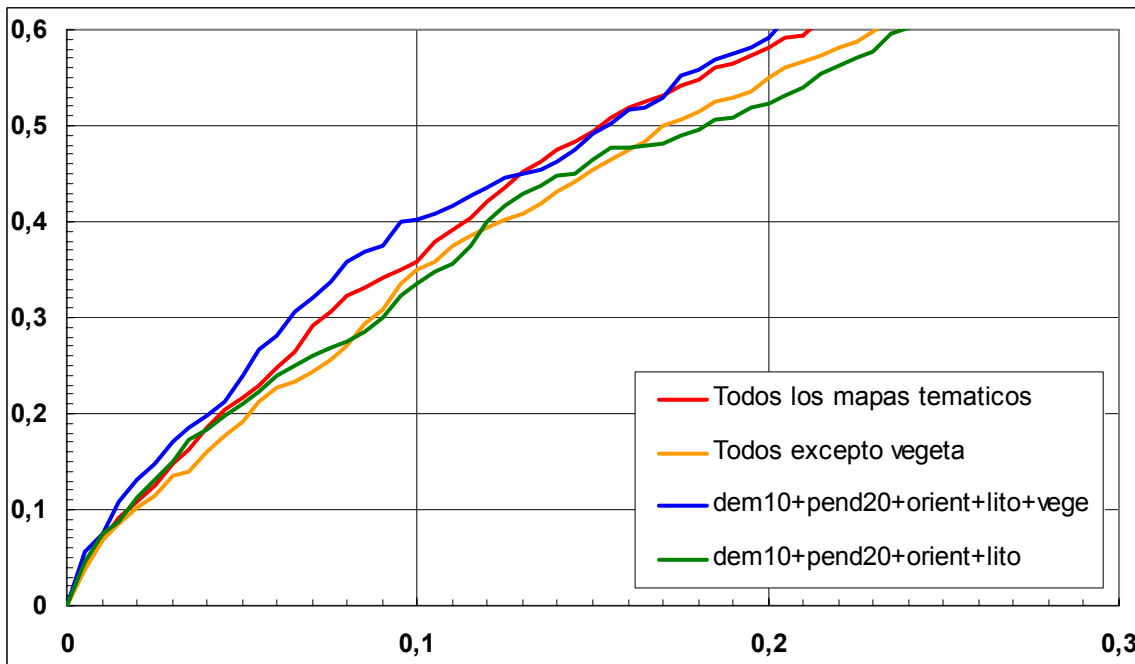
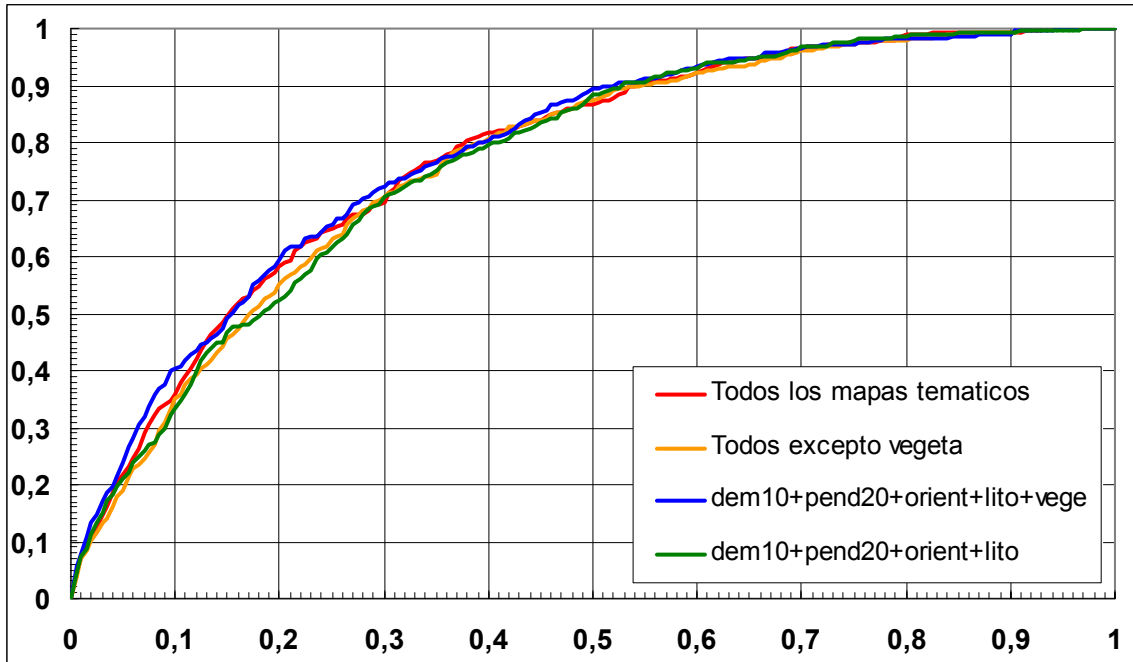


Figura 6.19. Curvas de predicción en las que se muestra que la combinación dem10+pend20 +orient+lito+vege, ofrece los mejores resultados.



como se aprecia en la Figura 6.22; la combinación con menos clases (MDE-10+PEND-20+ORIENT) da prácticamente los mismos resultados que la de mayor número de clases (MDE-20+PEND-40+ORIENT).

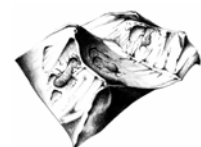
La diferencia entre considerar un número bajo o un número alto de clases es algo mayor en el caso de las curvas de acierto, como es lógico, pero es mínima para las curvas de predicción, que son las más significativas a efectos de evaluar la susceptibilidad de la zona a futuros deslizamientos.

Por todo ello, parece clara la robustez de los procedimientos de transformación de las variables continuas en categóricas, siempre y cuando no se utilice un número demasiado pequeño de clases.

En resumen, los problemas observados en relación con las distintas variables pueden resumirse en los siguientes:

La exactitud de los valores obtenidos para variables derivadas del MDE. Obviamente, la precisión de estas variables depende en gran medida del modelo digital de elevaciones del que derivan y del algoritmo utilizado. No obstante, algunas variables pueden presentar errores importantes, como sucede en los casos de ACUENCA, LONG, AFS y LFS, por estar basadas en el principio de conexión de celdas (dirección de flujo acumulado). El resto de las variables pueden tener errores que, pudiendo ser puntualmente importantes, en conjunto no lo son.

Hay variables que aunque, en principio, representan características físicas significativas para el análisis resultan poco relevantes, por la forma en que han sido expresadas, a su vez determinada en parte por la precisión del MDE. Es por ejemplo, el caso de RUGOS, que no refleja adecuadamente las irregularidades de pequeña escala, que sí pueden ser significativas para la localización de zonas de ruptura. En cierto modo lo



contrario ocurre con CURVAR, PERFIL y PLA, que se han determinado para segmentos tal vez demasiado cortos.

Otro problema existente es el de la dependencia entre variables. Muchas de las variables utilizadas y no sólo las derivadas del MDE, presentan cierto grado de dependencia, en parte debida a que se derivan del mismo modelo, en parte porque muchas de ellas son muy parecidas entre sí, y en parte porque en la naturaleza las variables no son aleatorias sino que atienden a criterios de concurrencia. La correlación entre las variables naturales limita, al menos en parte, los resultados de los análisis estadísticos, si bien los modelos de susceptibilidad resultantes pueden ser lo suficientemente robustos como para ser válidos; esto se pone de manifiesto mediante la validación con muestras independientes.

Aparte de los problemas citados en las variables derivadas del MDE, las variables categóricas VEGE, LITO, ESPE, PRECIP y MOVPT presentan los problemas inherentes a cualquier variable cartográfica cualitativa. Todas ellas reflejan un modelo simplificado de la realidad que representan, por lo que son sólo aproximaciones. Además, en alguno de los casos fueron originalmente elaborados para fines distintos, por lo que no son todo lo satisfactorios que se hubiera deseado. Este es el caso del mapa litológico, originalmente un mapa geológico convencional. Las unidades litológicas deberían definirse a partir de su comportamiento geomecánico, pero la variabilidad espacial de las propiedades geotécnicas de los materiales se conoce todavía mal, lo que supone un serio obstáculo para la mejora de la cartografía de unidades litotécnicas. La variable ESPE está muy limitada por número de observaciones realizadas, que siempre es insuficiente. A pesar de que técnicamente es viable realizar mapas de espesor muy detallados (idealmente casi con datos continuos), su obtención en la práctica es inviable. La variable VEGE es, por el contrario, relativamente fácil de obtener con una alta exactitud, pero su variabilidad en el tiempo puede ser tan grande, que en pocos años queda obsoleta. PRECIP es una variable con una gran variabilidad espacial que se desconoce en gran parte; el número de datos utilizados para su elaboración, aún siendo más grande de lo que es común, es siempre insuficiente, por lo

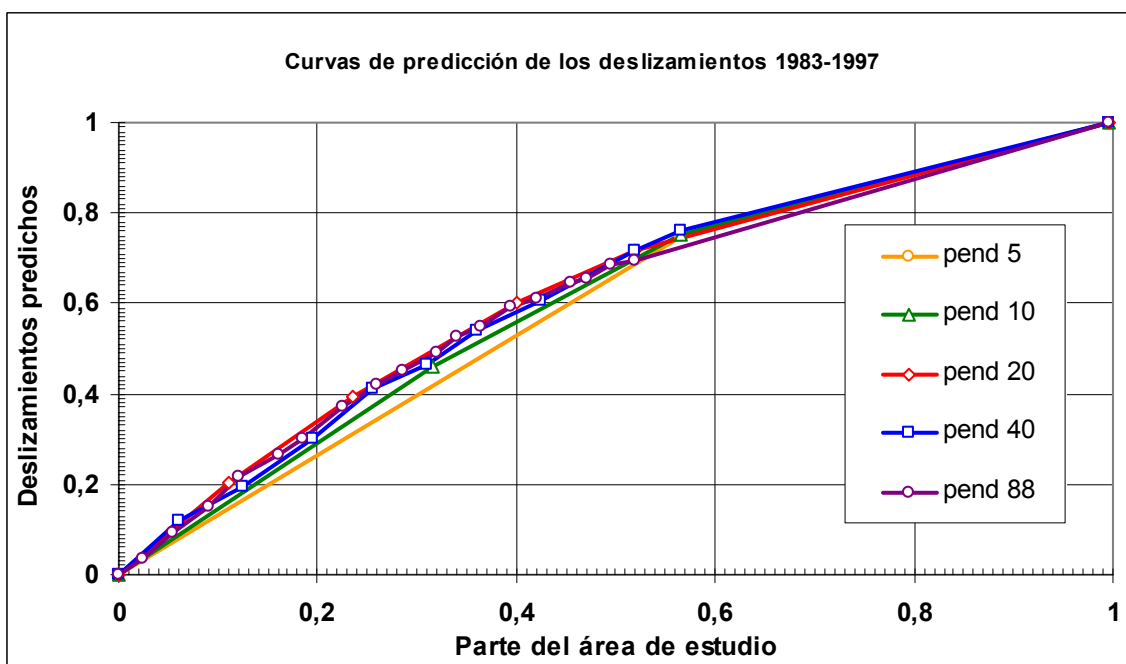
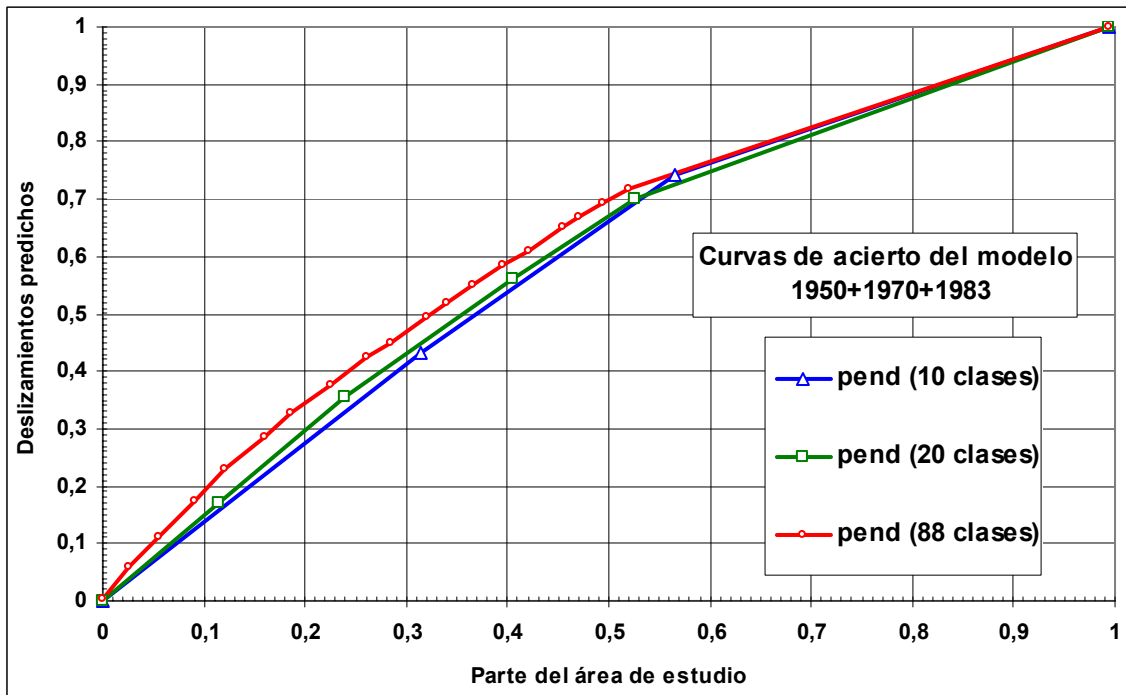


Figura 6.20. Curvas de acierto y de predicción de modelos de susceptibilidad elaborados a partir de la variable pendiente, categorizada en distinto número clases.

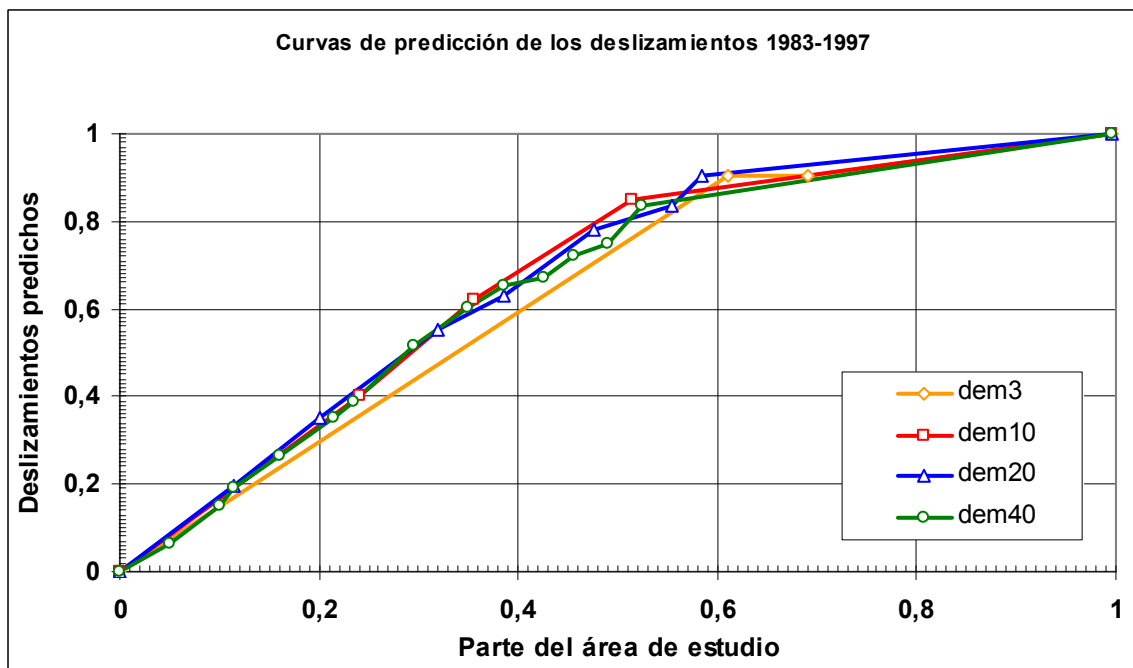
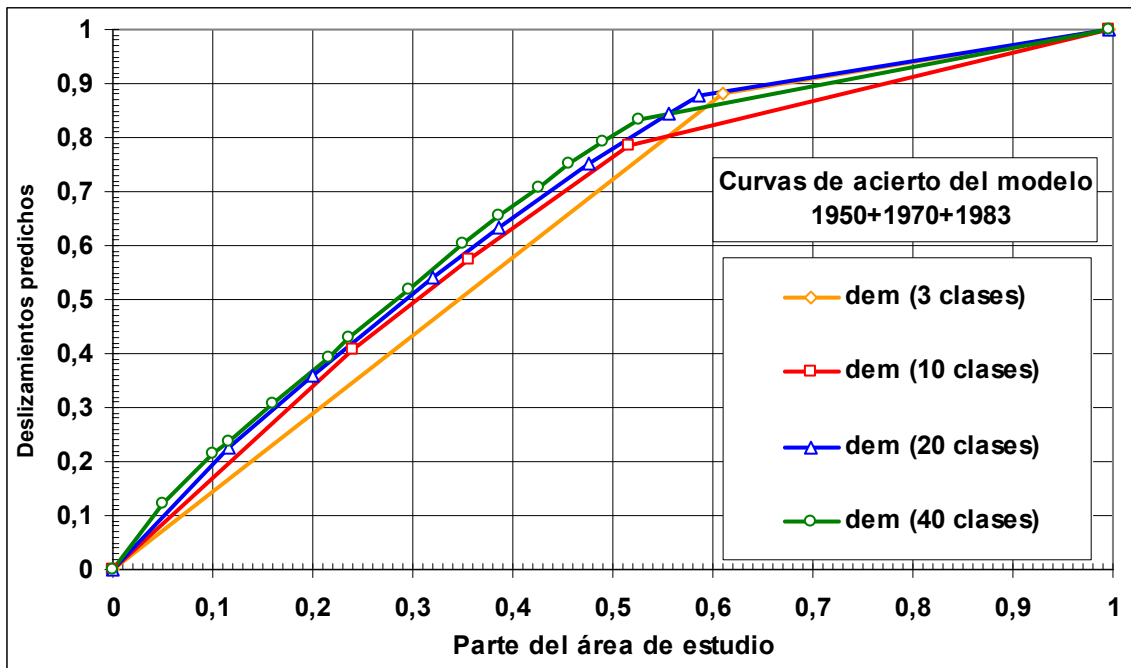


Figura 6.21. Curvas de acierto y de predicción de modelos de susceptibilidad elaborados a partir de la variable elevación, categorizada en distinto número clases.

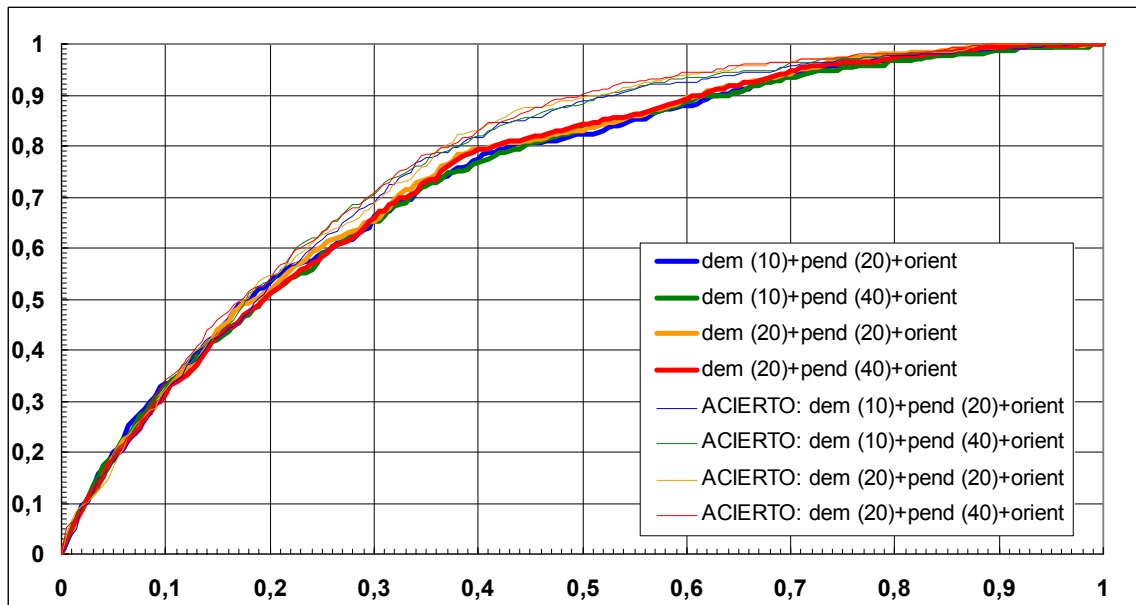


Figura 6.22. Curvas de acierto y predicción de las variables DEM, PEND y ORIENT, categorizadas de distinta forma. Entre paréntesis se indica el número de clases en las que se han categorizado.

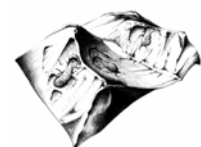


que este tipo de modelos deben ser validados con detalle en el futuro. La variable MOVPT es la más determinante de todas, puesto que a partir de ella se extraen las relaciones estadísticas en relación con las demás variables. Con independencia de las limitaciones que suponen la simplificación de las zonas de rotura a un solo punto (pixel), esta variable tiene una alta subjetividad (tal y como se comenta más adelante). Además, la identificación de movimientos en masa en zonas de bosque es muy difícil, quedando siempre sesgada la muestra en estos lugares. Los problemas, posibles errores e incertidumbres de las variables utilizadas están explicitados en el Anexo I: Metadatos del Banco de datos y en el apartado 6.1.6.

Muchas de las variables seleccionadas *a priori* como condicionantes no contribuyen a mejorar la predicción. Con variables derivadas del MDE, se obtienen resultados muy satisfactorios, y sólo al introducir la vegetación y en menor medida la litología resultan modelos sensiblemente mejores. Las variables ORIENT, PEND y MDE junto con VEGE y LITO son las que mejor explican los deslizamientos ocurridos.

A pesar de que un número pequeño de variables sean capaces de modelizar la susceptibilidad tan bien como todas en conjunto, los resultados de la validación evidencian que hay algunas variables que no han sido incluidas o lo han sido pero de forma imprecisa, y que en conjunto podrían mejorar la predicción.

Resulta llamativo el hecho de que sólo con las variables derivadas del modelo digital de elevaciones es posible obtener modelos de susceptibilidad casi tan precisos como los obtenidos a partir de la inclusión de muchas otras variables. A primera vista resulta sorprendente que dicha combinación de variables pueda caracterizar tan bien la susceptibilidad; sin embargo, un análisis del significado de tal combinación puede ayudar a comprenderlo. Cuando se combinan estas variables se generan 9.678 unidades de condición única, algo que es muy difícil de interpretar por la mente humana, pero que por otro lado da una idea del gran número de subáreas con características diferentes a las otras. Utilizando sólo dos variables como la elevación y la pendiente es



más fácil ilustrar el verdadero significado de la combinación. Así, por ejemplo, una subárea que tenga pendientes superiores a  $60^\circ$  y que esté situada a más de 600 m de altura, en el Bajo Deva sólo puede corresponder a una caliza masiva. Con este breve ejemplo se pretende ilustrar el hecho de que es muy posible que una combinación de variables que generen un número tan elevado de unidades puede reflejar muy adecuadamente las condiciones, geométricas, litológicas, de vegetación, etc. del área.

Esto es, las variables que representan la geometría del terreno tienen también una considerable carga de información sobre las características físicas de éste. Es bien conocido que las formas del terreno son el resultado de la actuación de diferentes procesos sobre materiales con estructura, composición y propiedades físicas determinados, dentro de un contexto climático que condiciona, entre otras cosas, la vegetación. Por tanto, al utilizar las variables geométricas se está incluyendo también, de forma implícita, a esas otras variables más directamente relacionadas con el proceso. Los datos aquí obtenidos indican que la correlación geometría/variables de proceso es lo suficientemente buena para hacer posible modelizar el segundo a partir de la primera.

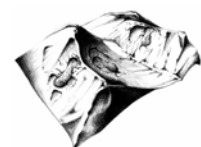
Si bien las variables que mejor explican la susceptibilidad se han derivado del análisis en las áreas de estudio del Bajo Deva y de La Pobra de Lillet, es razonable pensar que para el mismo tipo de movimientos en masa y en zonas con condiciones ambientales relativamente similares, esas variables deben ser las que mejor permitan modelizar la susceptibilidad.

Contrariamente a lo que podría pensarse, la categorización de las variables no presenta un problema importante para la elaboración de modelos de susceptibilidad, al menos cuando se consideran un cierto número de clases (10-20). Por ello es posible reducir, por lo menos hasta un cierto punto, la información, con la consiguiente agilización del procedimiento, sin que el mapa resultante pierda valor predictivo. Así, uno de los problemas más importantes cuando se elaboran mapas con metodologías de tipo heurístico es, por ejemplo, cómo clasificar los mapas de pendientes; sin embargo, el



problema no parece ser tan importante. Por eso mismo, las implicaciones del error del modelo digital de pendiente en el modelo de susceptibilidad pueden no ser muy grandes, puesto que al categorizar la variable se reduce en gran parte dicho error.

Evidentemente, a medio plazo es improbable que los mapas de vegetación, litología o espesor de formaciones superficiales, puedan ser elaborados con mayor precisión de lo que se hace hoy en día. Sin embargo, ya actualmente se dispone de MDE de gran precisión y a relativamente bajo coste, por lo que su utilización para la elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos introduce una mejora sustancial en los mismos, sobre todo si se tiene en cuenta que la inclusión de otras variables mejora muy poco los resultados. Las variables derivadas del MDE se caracterizan por su gran objetividad, porque su elaboración es automática y por ser muy económicas, lo que sumado al hecho de que son las que mejor reflejan la susceptibilidad, apunta a que se deba trabajar más en estas variables y no tanto sobre las que en general se habían considerado como las más determinantes. Dado que a partir del modelo digital de elevaciones se pueden caracterizar bastante bien las características del terreno (creando multitud de unidades de condición única), el MDE podría usarse no sólo como una herramienta en el sentido en que aquí se hace, sino también como un instrumento auxiliar para mejorar la precisión de la cartografía de variables como la geología o la vegetación.



### 6.1.4 Técnicas de análisis

En este apartado se comparan los diferentes métodos de análisis de susceptibilidad aplicados en este trabajo, a fin de evaluar la calidad de los resultados que proporcionan y tratar de extraer conclusiones con respecto a su utilidad. La mayoría de las contrastaciones se han llevado a cabo en todo el Bajo Deva (municipios de Deva, Mendaro, Elgoibar y Eibar), comparando los resultados de la aplicación de distintas funciones de favorabilidad, interpretadas dentro de la teoría de probabilidades y la de los conjuntos difusos. Además, se ha realizado un estudio comparativo entre esta metodología y el método de análisis discriminante convencional. Asimismo, se han comparado estos métodos estadísticos con uno de tipo heurístico. Las distintas técnicas matemáticas utilizadas han sido descritas en detalle y discutidas en el capítulo 3.

Para toda la zona del Bajo Deva se han aplicado diversas técnicas en el marco de las funciones de favorabilidad, obteniéndose las correspondientes curvas de acierto y de predicción (Figura 6.23). Todos los modelos representados en la figura se han elaborado a partir de las variables MDE, ORIENT, PEND, LITO y VEGE, por ser esta combinación la que mejores resultados proporciona, de acuerdo con lo visto anteriormente. Del análisis de la curva de predicción se deduce que todos los métodos empleados ofrecen resultados muy parecidos, si bien Bayes, CF (factor de certidumbre) y la Función de pertenencia difusa ( $\text{Gamma} = 0,5$ ) son los que mejor predicen la muestra de deslizamientos de validación. El procedimiento a partir del análisis de la pertenencia difusa mediante el operador intersección, muestra peor comportamiento. Las funciones de pertenencia difusa, a excepción del operador gamma, no proporcionan buenos resultados. En este sentido hay que señalar que el significado de los operadores de integración de la teoría de los conjuntos difusos es muy diferente a la de probabilidades, en cuanto al sentido de la predicción; no existe un conocimiento suficiente para una completa interpretación sobre la utilización óptima de los distintos operadores, por lo que de momento se utilizan sólo de forma experimental. La regresión multivariable presenta un comportamiento ligeramente peor que las tres

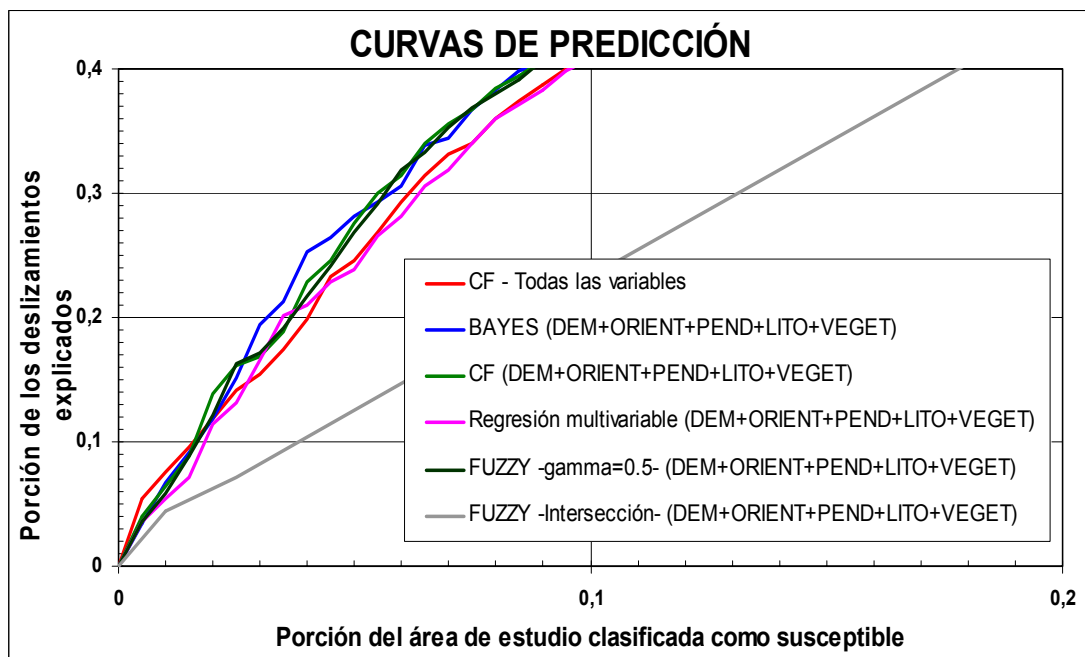
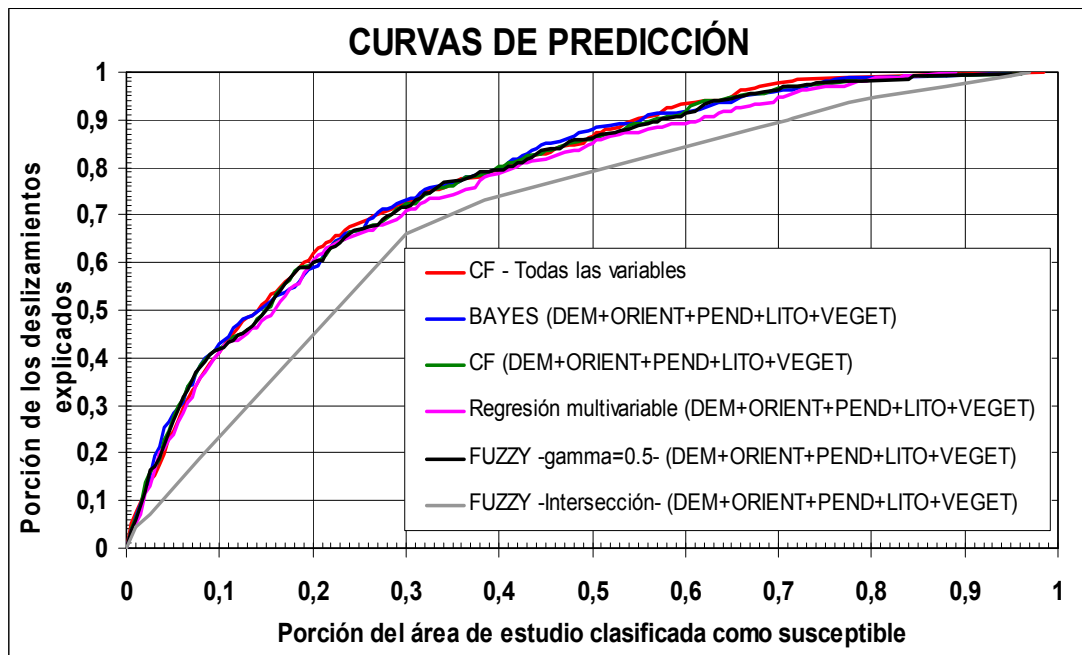


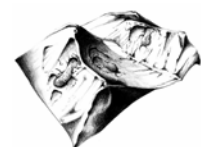
Figura 6.23. Curvas de predicción de modelos de susceptibilidad del Bajo Deva.



primeras funciones. Los modelos desarrollados mediante las funciones relación de probabilidades, factor de certidumbre y pesos de evidencia proporcionan resultados prácticamente idénticos entre sí, si bien el factor de certidumbre tiende a ser levemente mejor; esto es lógico si tenemos en cuenta que todas estas funciones desde un punto de vista matemático son similares; es decir, según se ha explicado en el apartado 3.2.3.1, tanto CF como WoE son funciones derivadas de la relación de probabilidades. Por último, señalar que a tenor de los resultados se puede decir que con el 20% de las celdas más susceptibles se predicen algo más del 60% de los deslizamientos y que el 15% de la zona se puede considerar totalmente estable.

Si bien las distintas funciones aplicadas tienen significados distintos y los valores obtenidos presentan rangos de oscilación también diferentes, el orden relativo de los valores puede utilizarse para elaborar mapas y compararlos entre sí. Así, por ejemplo, los valores cercanos a 0 en la función factor de certidumbre tienen el significado de incertidumbre; en la función discriminante teóricamente tienen un significado similar (no se discrimina bien entre las poblaciones estables/inestables); en las funciones de probabilidad indican muy poca probabilidad (o muy poca correlación, en el caso de la regresión multivariable); en el marco de la teoría de los conjuntos difusos tienen un significado variable (si bien, en las funciones aquí utilizadas, indican un pequeño grado de pertenencia a las zonas inestables), etc. Sin embargo, el orden de los distintos valores de las diferentes funciones sí que está estrechamente relacionado con el grado de susceptibilidad, de aquí la importancia de aplicar un sistema para reclasificar los valores de los diferentes tipos de modelos como el utilizado (200 clases, cada una correspondiente al 0,5%), de forma que sean comparables. Este aspecto ha sido ya discutido en el apartado 3.2.3.3 del capítulo 3.

Para la comparación entre el método basado en la función discriminante y las funciones de favorabilidad se ha seleccionado una subzona del municipio de Deva, en torno a la localidad de Itziar, así como una zona en el pirineo catalán, La Pobla de Lillet. Ambas zonas presentan condiciones climáticas, geológicas, geomorfológicas y



ambientales significativamente distintas y sin embargo, procesos de ladera similares. Puesto que el proceso de ladera es similar, también lo son la hipótesis de rotura y las variables de partida. En este análisis es el único caso para el que se ha empleado un tamaño de celda de 15 x 15 m, por lo que el MDE y los modelos derivados se han elaborado expresamente para ello. De esta forma, el tamaño de pixel es el mismo en ambos casos.

Las principales características de ambos métodos se resumen en las Tablas 3.4 y 3.5. Los detalles metodológicos y técnicos, así como las herramientas utilizadas están ampliamente descritas en el capítulo 3. En el caso de la técnica de análisis discriminante, una descripción más detallada puede encontrarse en Baeza (1994).

Ambos métodos proporcionan resultados cuantitativos satisfactorios, que han sido ya suficientemente contrastados. Sin embargo, presentan diferencias significativas, tanto desde un punto de vista matemático como operacional, lo que hace muy interesante su comparación. Los dos grupos de métodos son procedimientos estadísticos aplicables a grandes áreas, que pueden utilizar variables cartográficas de distinta naturaleza, si bien el método de las funciones de favorabilidad utilizado requiere variables categóricas, mientras que el análisis discriminante precisa de variables cuantitativas. La unidad de análisis empleada es el pixel, en el caso de la función discriminante, y unidades de condición única matriciales en el caso de las funciones de favorabilidad.

Para comparar estas dos metodologías se han separado, de forma aleatoria, las poblaciones totales de deslizamientos correspondientes a cada área de estudio en dos muestras: análisis y validación. En el caso del área de Itziar se han utilizado los deslizamientos identificados a partir de la fotointerpretación del vuelo de 1997, completada con recorridos de campo; esta población corresponde a los eventos sucedidos entre 1991 y 1997, y también se ha dividido en dos de forma aleatoria.

En el área de la Población de Lillet los modelos de susceptibilidad desarrollados son los siguientes (Figuras 6.24, 6.25 y 6.26):

**La Pobra de Lillet : Modelo de susceptibilidad mediante CF (FF)**

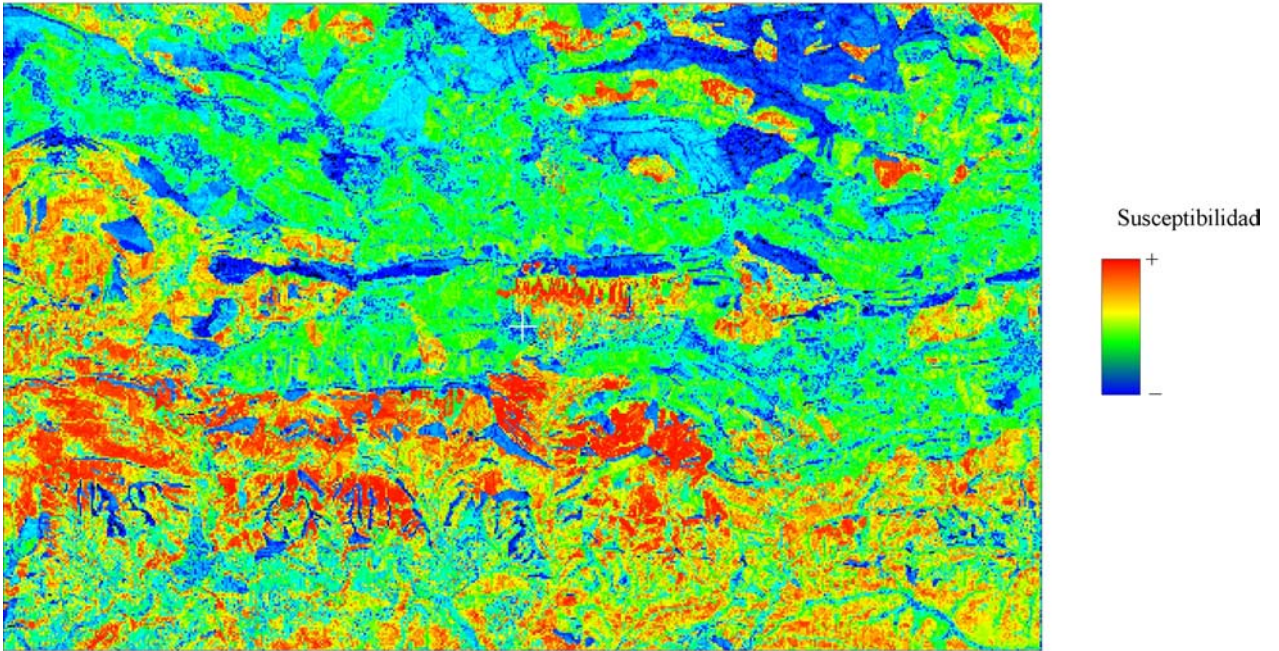


Figura 6.24. Modelo de susceptibilidad elaborado mediante la función factor de certidumbre para La Pobra de Lillet.

**La Pobra de Lillet : Modelo de susceptibilidad mediante análisis discriminante**

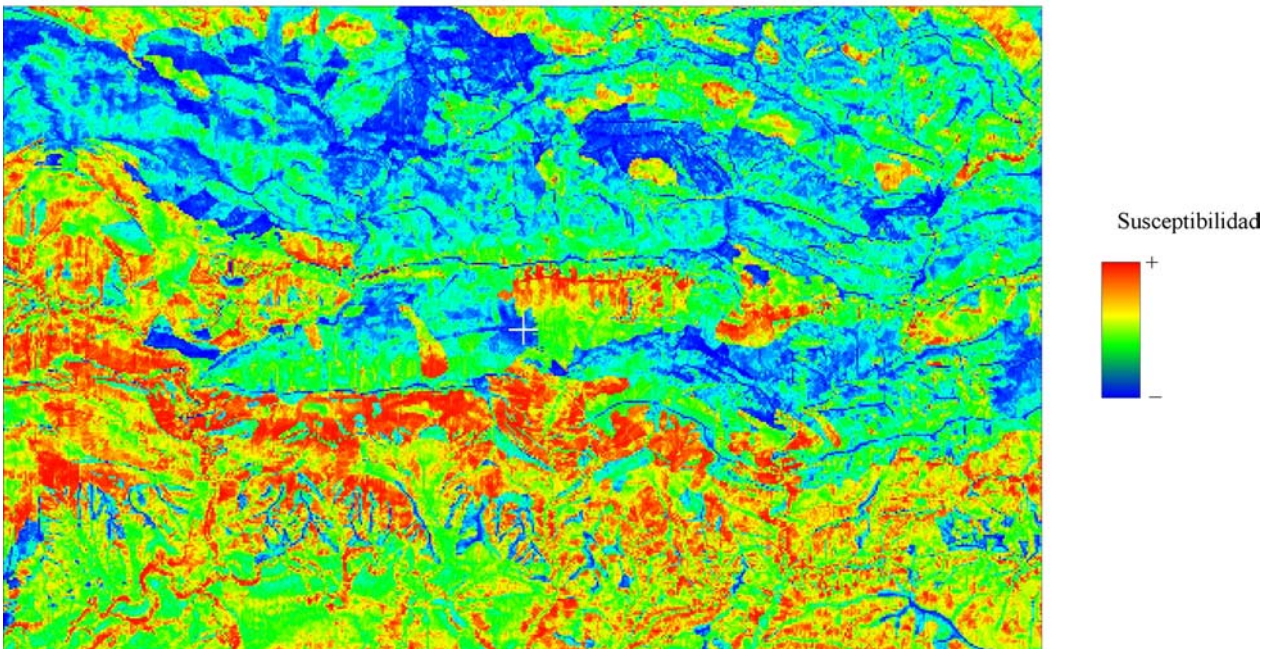


Figura 6.25. Modelo de susceptibilidad elaborado mediante análisis discriminante para La Pobra de Lillet.



La Pobla de Lillet : Modelo de susceptibilidad mediante Conjuntos difusos - Gamma = 1 (FF)

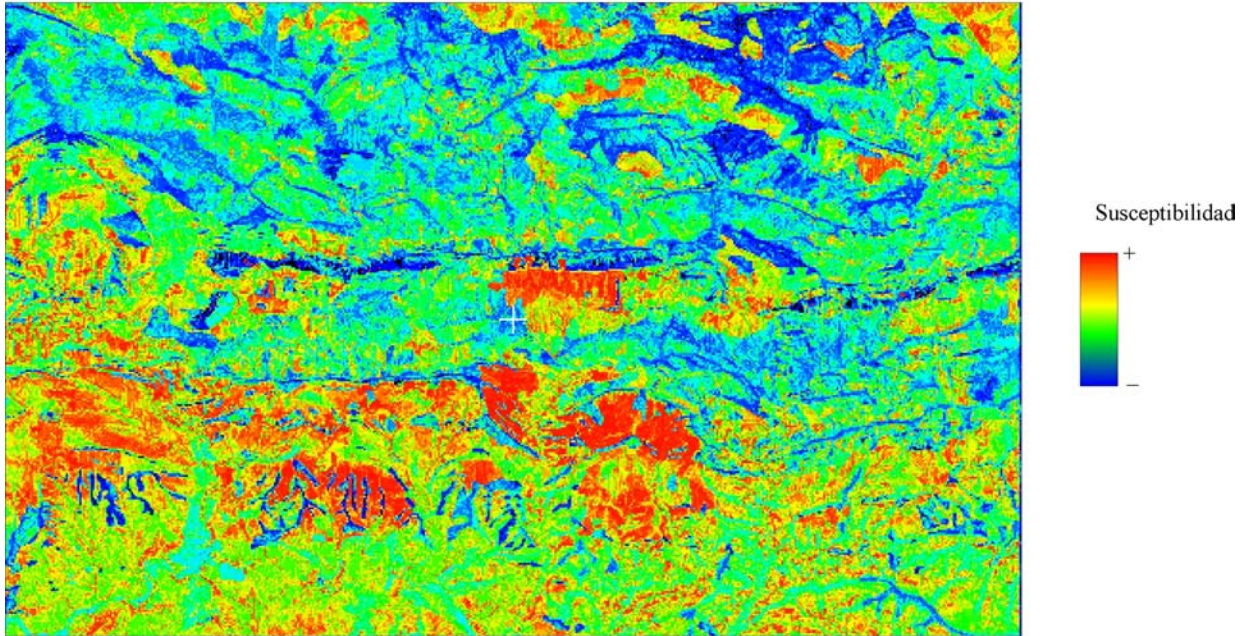


Figura 6.26. Modelo de susceptibilidad elaborado mediante la función de pertenencia difusa (Gamma=1), para La Pobla de Lillet.



- Factor de Certidumbre (PEND+PLA+PENDM+LFS+VEGE+ESPE).
- Función Discriminante (Valor discriminante =  $(0,095*PEND)+(-0,294*PLA)+(-0,033*PENDM)+(-0,085*VEGE)+(0,254*\log LFS)+(0,912*ESPE)-4,196$ ).
- Pertenencia Difusa [ $\gamma = 1$ ], (PEND+PLA+PENDM+LFS+VEGE+ESPE).

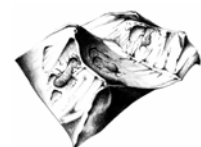
Las variables finalmente utilizadas han sido las determinadas a partir del procedimiento para calcular la función discriminante.

Los mapas de susceptibilidad elaborados para el área de Itziar son los siguientes (Figuras 6.27, 6.28, 6.29 y 6.30):

- Factor de Certidumbre (LITO+VEGE+MDE+ORIENT+PEND).
- Factor de Certidumbre (todas las variables del banco de datos).
- Función Discriminante (Valor discriminante =  $(4,647*\text{seno PEND})+(0,010*[ORIENT \text{ "0-180"}])+(-0,039*PENDM)+(0,044*VEGE)+(0,044 * LITO)+(0,741*\log LFS)-5,761$ ).
- Pertenencia Difusa [ $\gamma = 1$ ] (LITO+VEGE+MDE+ORIENT+PEND).

La selección de las variables utilizadas en las técnicas basadas en funciones de favorabilidad se ha llevado a cabo mediante un análisis de sensibilidad como el descrito anteriormente.

Para la visualización de los mapas obtenidos a partir de la aplicación de los diferentes métodos, los valores numéricos resultantes del análisis se han reclasificado en 200 clases (1, menos susceptible; 200, la más susceptible) y se han representado mediante una tabla de *pseudo-color* (desde azul, para los valores más bajos, hasta rojo para los valores mayores, pasando por el verde y el amarillo para los valores intermedios). Como puede apreciarse en las Figuras 6.24 a 6.30, la comparación visual de los mapas de susceptibilidad no arroja ninguna luz acerca de su bondad, a pesar de que se observan diferencias entre ellos y de que todos ellos se han reclasificado en los mismos términos. Un procedimiento más eficaz de comparación consiste en superponer los



deslizamientos de la muestra de validación sobre los mapas (Figuras 6.31 y 6.32). En este caso es posible tener una idea, aunque sólo sea cualitativa, acerca del grado de ajuste. Como se observa en las figuras, la gran mayoría de los deslizamientos de control coinciden con zonas de alta susceptibilidad, especialmente en el área de La Pobra de Lillet. A partir de este tipo de comparaciones visuales, se puede hacer una selección de deslizamientos “mal predichos”, ocurridos sobre zonas de baja susceptibilidad, para analizar en detalle las posibles causas de esos errores de predicción. Dichas causas pueden corresponder a imperfecciones del modelo (por ejemplo, que muchos de los deslizamientos no predichos estén condicionados por factores estructurales, no incluidos en el modelo), o a factores desencadenantes no modelizables (influencia humana directa), etc.

Otra forma de observar comparativamente los mapas resultantes es derivando un mapa de diferencia entre dos modelos determinados que también puede ser visualizado por medio de una tabla “pseudo-color” (Figura 6.33), de manera que los colores cálidos corresponden a pixels en los que la susceptibilidad obtenida a partir del factor de certidumbre es mucho mayor que la derivada de la función discriminante, y los colores fríos a lo contrario; los tonos verdes corresponden a pixels con valores similares para ambas. En la figura se aprecia que, si bien para la mayoría del área la coincidencia es apreciable, hay diferencias notables en ciertas partes de la misma. Así, hay zonas “azules”, que tienden a disponerse en bandas, en las cuales la función discriminante da valores mucho más altos que el factor de certidumbre; estas zonas corresponden a áreas de muy alta pendiente. La situación contraria es menos frecuente y presenta también pautas lineales, aunque menos definidas; estas presentan en general pendientes relativamente bajas.

El conocimiento de la zona pone de manifiesto que en las zonas de pendiente elevada los deslizamientos superficiales son prácticamente inexistentes, como consecuencia de la inexistencia de regolito. Esto es, el modelo proporcionado por el factor de certidumbre parece reflejar mejor el comportamiento. Una posible explicación de esto es que la utilización de unidades de condición única lleva implícita la incorporación de

### Bajo Deba : Modelo de susceptibilidad mediante CF (FF)

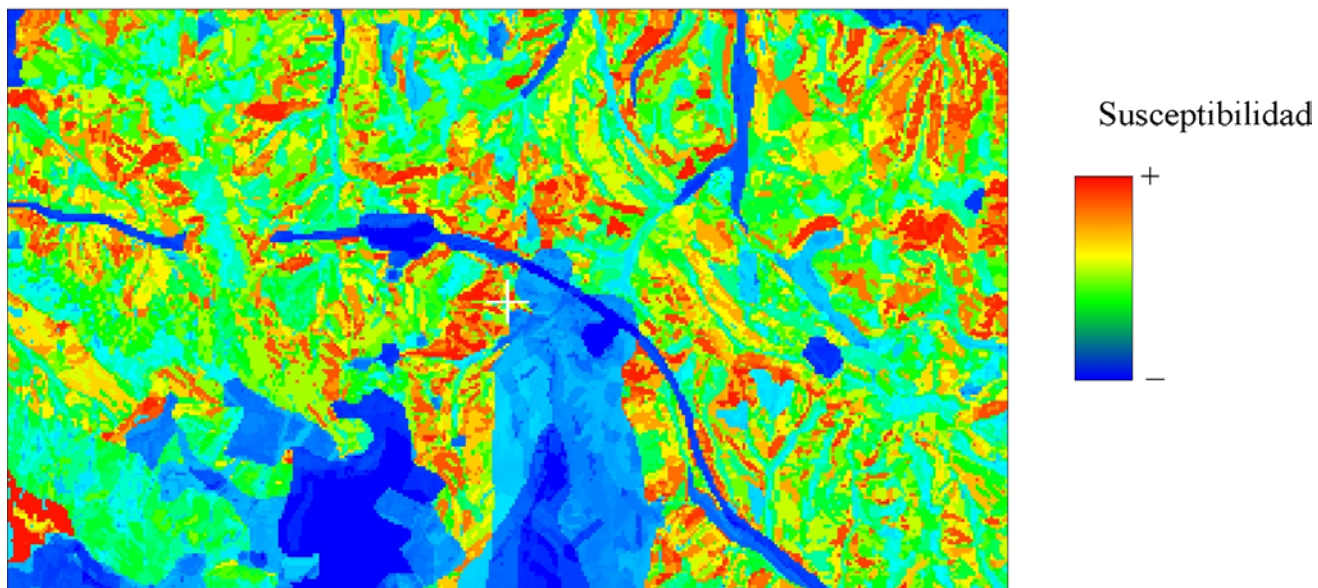


Figura 6.27. Mapa de susceptibilidad elaborado para la zona de Itziar mediante la función factor de certidumbre (LITO+VEGE+MDE+ORIENT+PEND).

### Bajo Deba : Modelo de susceptibilidad mediante CF (FF)

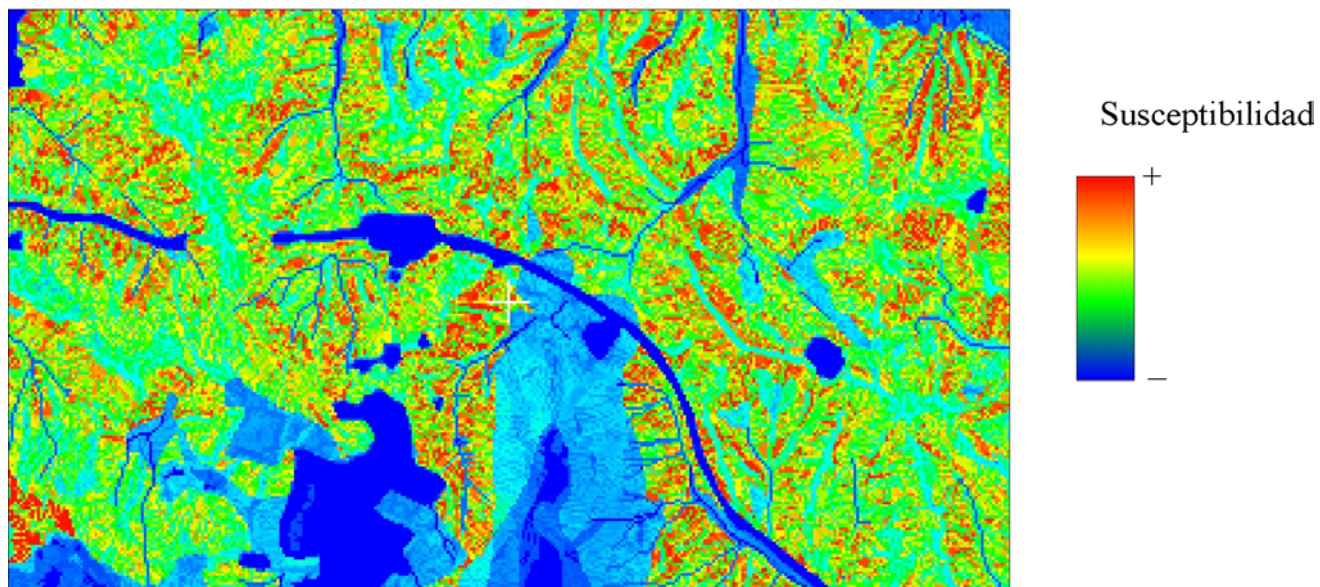


Figura 6.28. Mapa de susceptibilidad elaborado para la zona de Itziar mediante la función factor de certidumbre, con todas las variables del banco de datos.



### Bajo Deba : Modelo de susceptibilidad mediante análisis discriminante

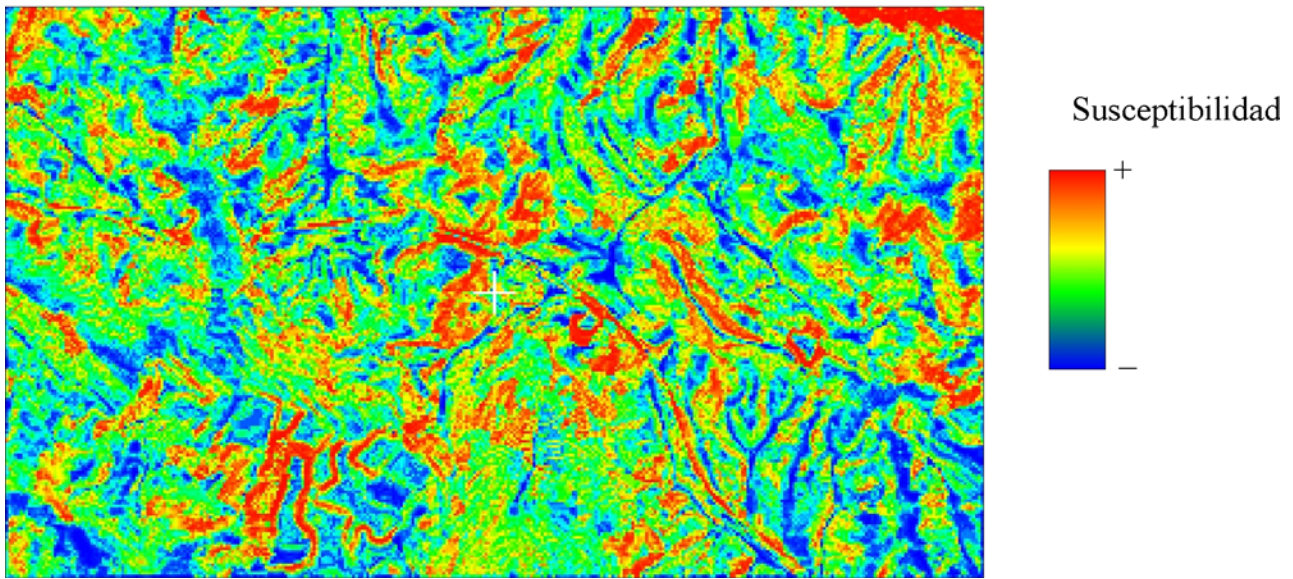


Figura 6.29. Mapa de susceptibilidad elaborado para la zona de Itziar mediante análisis discriminante.

### Bajo Deba : Modelo de susceptibilidad mediante conjuntos difusos - Gamma = 1 (FF)

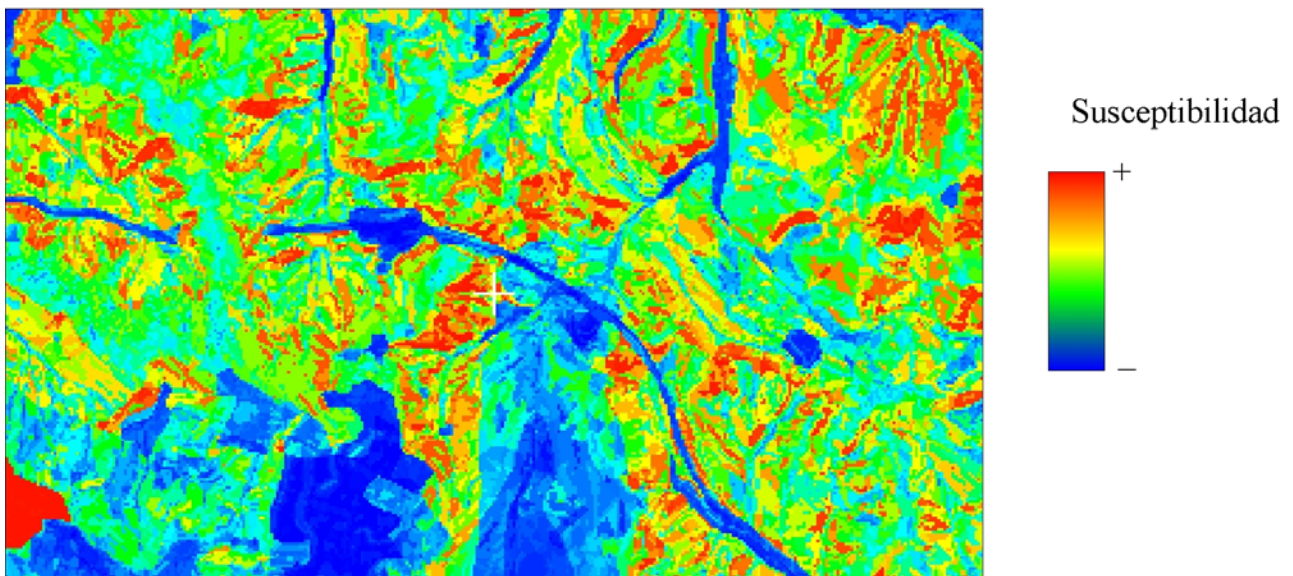


Figura 6.30. Mapa de susceptibilidad elaborado para la zona de Itziar mediante la función de pertenencia difusa ( $\Gamma=1$ ).



**La Pobra de Lillet : Modelo de susceptibilidad mediante análisis discriminante**

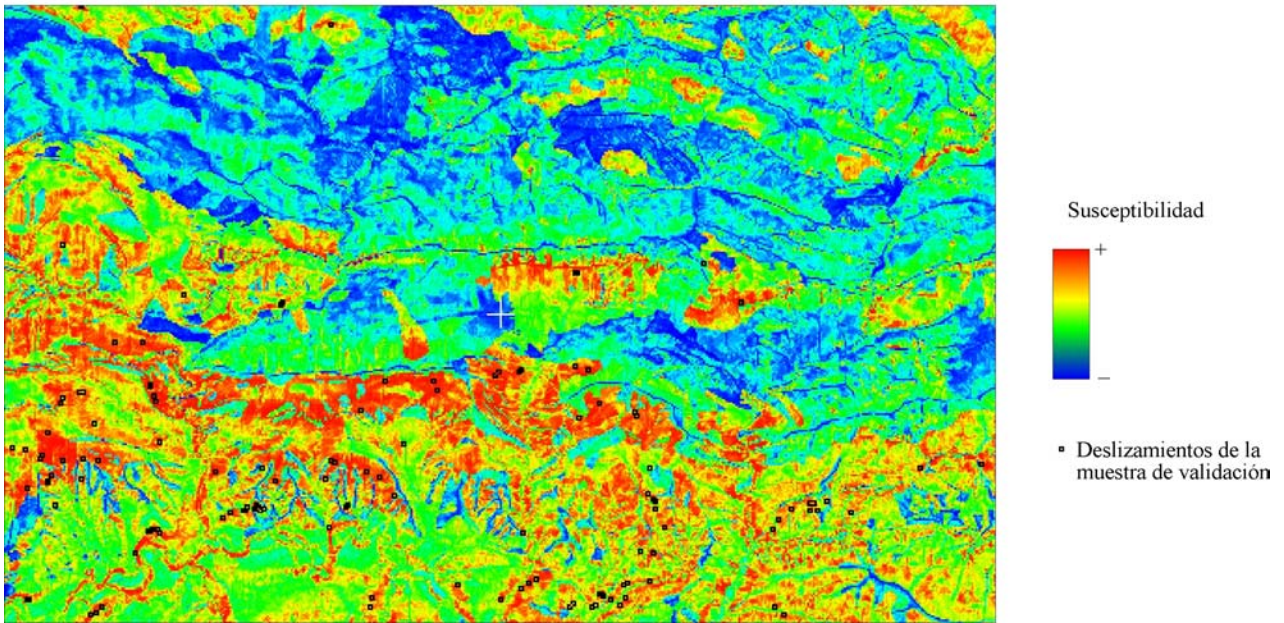


Figura 6.31. Mapa de susceptibilidad elaborado para la La Pobra de Lillet mediante análisis discriminante, con los deslizamientos superpuestos.

**Bajo Deba : Modelo de susceptibilidad mediante CF (FF)**

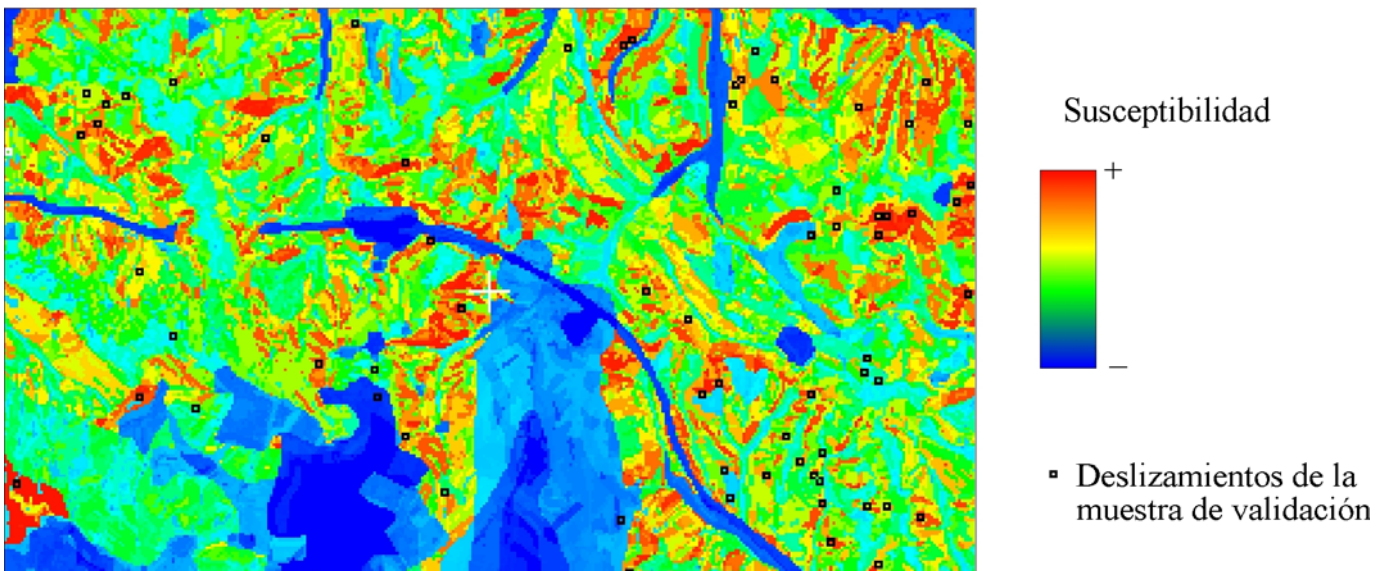


Figura 6.32. Mapa de susceptibilidad elaborado para la zona de Itziar mediante la función de certidumbre, con los deslizamientos superpuestos.



### Bajo Deba : Diferencia entre modelos mediante CF (FF) y análisis discriminante

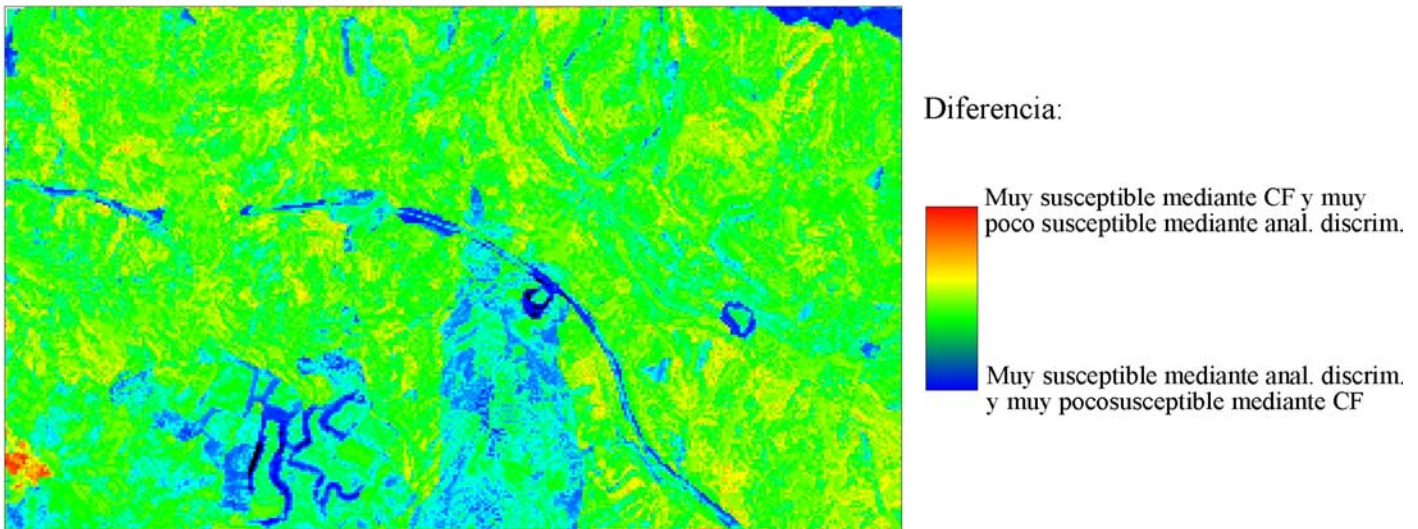


Figura 6.33. Mapa de diferencias entre modelos de susceptibilidad para la zona de Itziar.

### La Pobra de Lillet : Diferencia entre modelos mediante CF (FF) y análisis discriminante

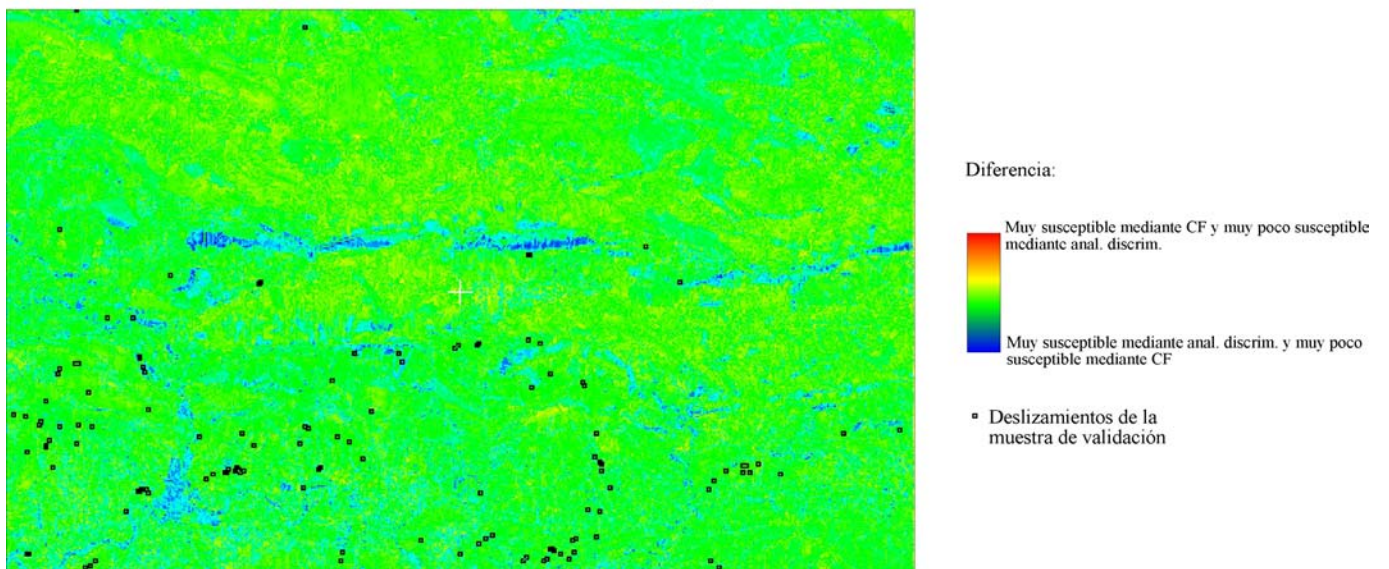


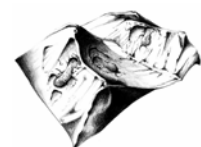
Figura 6.34. Mapa de diferencias entre modelos de susceptibilidad para La Pobra Lillet, con deslizamientos superpuestos.

información sobre otras variables (como por ejemplo el regolito), lo que no ocurre en el modelo derivado de la función discriminante.

También se observan diferencias en los resultados obtenidos con ambos modelos en la zona de La Pobla de Lillet (Figura 6.34), Si bien aquí dichas diferencias son mucho menores. Las escasas zonas “azules” que aparecen también tienen en general pautas alargadas, y coinciden con zonas de pendiente elevada. En este caso, dado que el conocimiento directo de la zona es menor, se ha procedido a superponer sobre el mapa de diferencias los deslizamientos de control, a fin de evaluar visualmente la calidad de ambos modelos. Según se observa, no hay una relación clara entre dichos deslizamientos y las diferencias reflejadas en el mapa, si acaso una muy leve tendencia a que los puntos con deslizamientos se sitúen en el entorno de algunas “zonas azules”. Esto podría sugerir que, en esta zona, la función discriminante resulta algo más adecuada. Más adelante se comenta este aspecto con mayor detalle.

Este tipo de técnicas de comparación entre modelos susceptibilidad son útiles en los casos en los que las diferencias entre mapas sean notables o cuando se pretende analizar deslizamientos individuales o zonas concretas, pero cuando los modelos son relativamente similares no clarifican suficientemente cuál de los mapas presenta una mayor precisión. Por el contrario, el procedimiento de cálculo y representación de curvas de validación (acierto y predicción) puede clarificar de forma cuantitativa, y para la totalidad del modelo de susceptibilidad, su ajuste o valor predictivo.

Las curvas de acierto correspondientes a los modelos elaborados para el área de Itziar (Figura 6.35) muestran que los mapas realizados mediante FF explican mejor los deslizamientos a partir de los que se han elaborado. Además, el ajuste es mejor para los pixels más susceptibles en el caso del mapa realizado con todas las variables; este resultado es el que cabría esperar teniendo en cuenta las metodologías utilizadas, sobre todo en relación a la unidad de análisis empleada (unidades de condición única, en el caso de las FF).



Las curvas de predicción (Figura 6.36), que son las que realmente clarifican el valor predictivo de los modelos, reflejan variaciones con respecto a las anteriores. Así, en el caso del análisis discriminante no hay prácticamente variación con respecto a la curva de acierto. Las distintas funciones de favorabilidad, por el contrario, muestran resultados peores en la predicción que en el acierto. El mapa elaborado con el factor de certidumbre (con todas las variables) resulta ser el que peor explica la muestra independiente de deslizamientos. Los mapas que mejor predicen en esta área son los realizados mediante Factor de Certidumbre (Lito+Vege+ESPE+Dem+Orient+Pend) y Pertenencia Difusa [ $\text{Gamma} = 1$ ] con la misma combinación de variables. En general puede decirse que la predicción no es muy buena; el 20% de los valores más susceptibles predicen algo más del 50% de los deslizamientos de contrastación.

Las curvas de acierto correspondientes a los distintos modelos de susceptibilidad elaborados para La Poblada de Lillet (Figura 6.37) muestran un comportamiento muy similar entre sí, si bien, tal y como cabría esperar y al igual que en el caso del área de Itziar, los mapas obtenidos mediante FF son ligeramente mejores. Además, el grado de ajuste es mucho mejor en este caso que en Itziar, lo que implica que, con independencia de la técnica que se utilice, la susceptibilidad se modeliza mucho mejor en este área.

Las curvas de predicción (Figura 6.38), muestran que el mapa realizado mediante análisis discriminante predice ligeramente mejor, aunque las predicciones son bastantes similares. Conviene señalar que los extremos de la curva son los más importantes, puesto que corresponden a las áreas más y menos susceptibles, respectivamente. Así, en el caso del mapa de análisis discriminante, con el 20% más susceptible predecimos aproximadamente el 85% de los deslizamientos de validación, y puede decirse que el 40% del área (la menos susceptible) puede considerarse como completamente estable (no habrá deslizamientos en el futuro).



Cuando se comparan las curvas de acierto y predicción de La Pobla de Lillet (Figuras 6.36 y 6.38), se observa que ambas son muy similares. Esto no es lo habitual y no resulta lógico. Una posible explicación es que las poblaciones de análisis y control no representen muestras totalmente aleatorias. Obviamente, el que las de curvas de acierto sean algo mejores sería lo normal, puesto que reflejan el ajuste de los mismos datos, mientras que las de predicción reflejan el ajuste con datos independientes. En todo caso, resulta evidente que la modelización de la susceptibilidad es bastante más satisfactoria en esta zona.

La calidad relativa de los resultados obtenidos con los diferentes métodos ensayados es muy similar en las dos zonas. Esto es, no se puede hablar de forma contundente de “un mejor método”. En La Pobla de Lillet, si bien funciona levemente mejor el análisis discriminante, ambos tipos de métodos tienen una alta capacidad predictiva. En el área de Itziar sucede lo contrario; el valor predictivo de los modelos es bastante menor y son las funciones de favorabilidad las que reflejan los mejores resultados. La Figura 6.39, que muestra las curvas de predicción de los modelos elaborados con las mejores funciones resultantes en cada una de las dos zonas de aplicación, ilustra claramente esas diferencias de precisión.

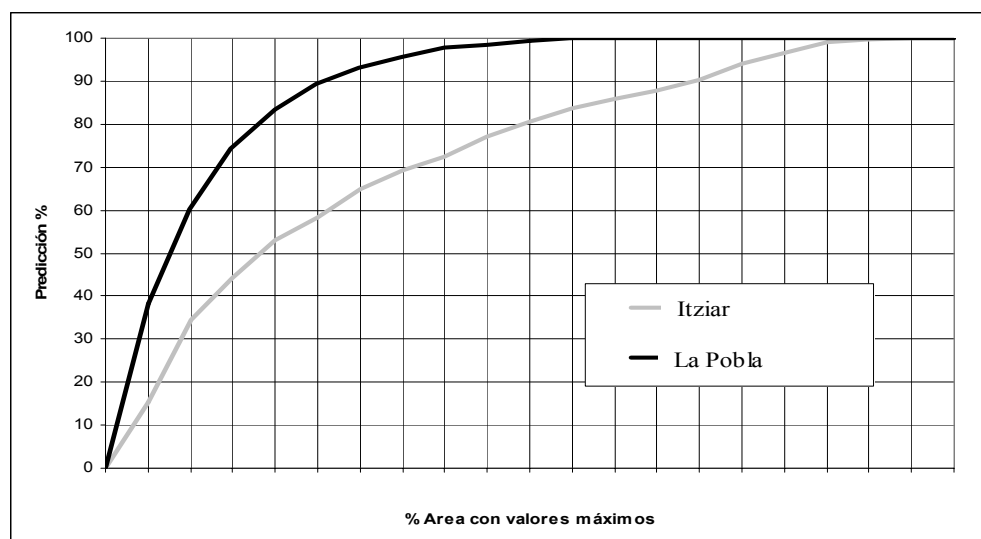
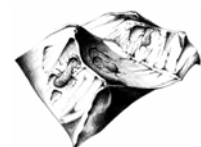


Figura. 6.39. Curvas de predicción de los mejores modelos obtenidos para dos zonas de estudio.



Las diferencias en la validez predictiva entre ambas zonas pueden ser más aparentes que reales. Evidentemente, la tasa de éxito en las predicciones se refiere al conjunto de la zona analizada; si esta zona presenta extensiones amplias con condiciones que impiden la aparición de deslizamientos (topografía llana, rocas muy competentes, ausencia de regolito, etc.) se tiene, *a priori* una tasa de éxito alta para todos esos pixels. Llevando esto a una situación en cierto modo extrema, si el 90% de una zona es llano, con el 10% del territorio se podría predecir correctamente el 100% de los deslizamientos. Ese tipo de diferencias son las que existen entre las dos zonas comparadas; La Pobra de Lillet presenta extensiones bastante mayores de zonas casi llanas que la de Itziar, y también de zonas sin regolito. La observación de la Figura 6.34, muestra que todos los deslizamientos están en la mitad meridional de la zona de estudio, lo cual se debe a que en la zona norte hay casi total ausencia de regolito. Además, existe un factor adicional que explica el menor grado de predicción en la zona de Itziar, que es la intervención humana. Esta zona tiene una densidad de población y, sobre todo, un grado de intervención sobre el territorio, mucho mayores que los de la zona de La Pobra de Lillet, por lo que la probabilidad de aparición de “deslizamientos atípicos” es mucho mayor. Mas adelante se analiza el posible papel de la actuación humana sobre los deslizamientos en esta área de estudio.

Aunque las diferencias son pequeñas, el método mejor difiere en ambas zonas de estudio; el análisis discriminante es algo mejor en La Pobra de Lillet y el factor de certidumbre en Itziar. Esto puede deberse al tipo de variables que resultan más explicativas en cada caso. Así, en La Pobra la litología no resulta ser una variable significativa, mientras que sí lo es en Itziar, dónde esta variable presenta más de 20 clases, por lo que la asignación de valores numéricos, necesaria para calcular la función discriminante, es muy compleja y poco fiable. No sucede lo mismo en el caso de la variable VEGE y ESPE, puesto que el número de clases de estas variables es mucho menor y, por consiguiente, es más sencillo asignarles valores numéricos. Evidentemente, la mayor limitación del análisis discriminante es la asignación de valores a las variables categóricas. Por el contrario, este método gestiona mejor las

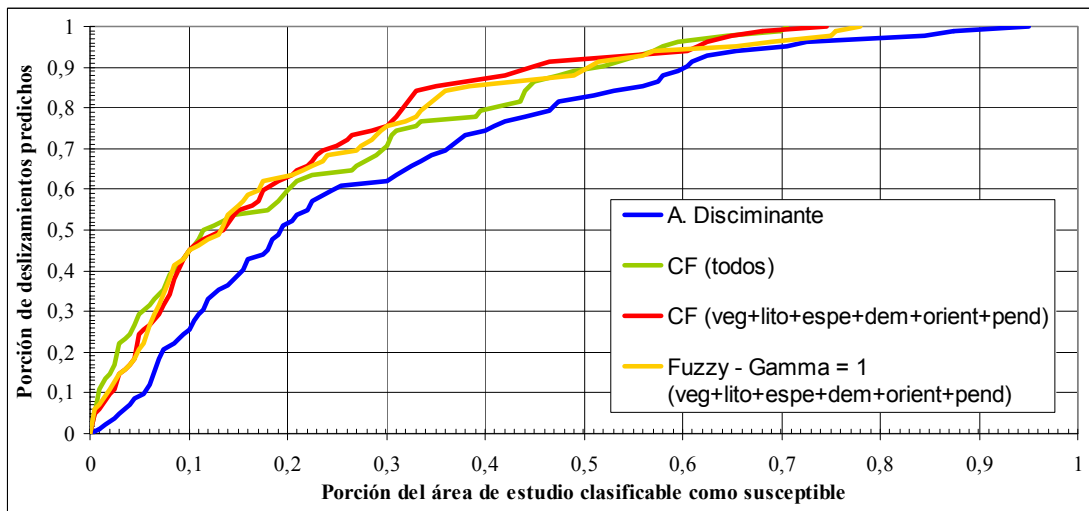


Figura 6.35. Curvas de acierto correspondientes a los modelos elaborados para la zona de Itziar.

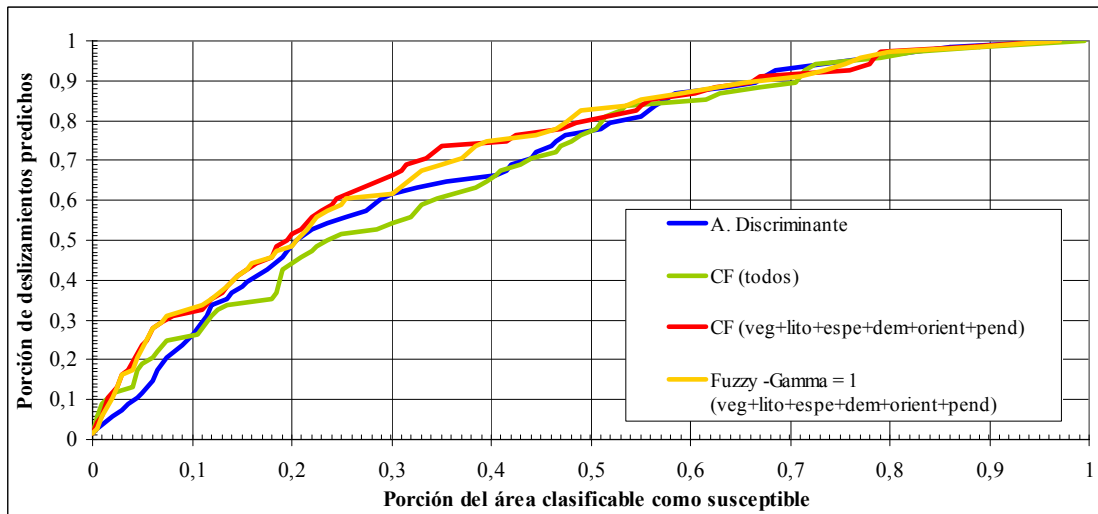


Figura 6.36. Curvas de predicción correspondientes a los modelos elaborados para la zona de Itziar.

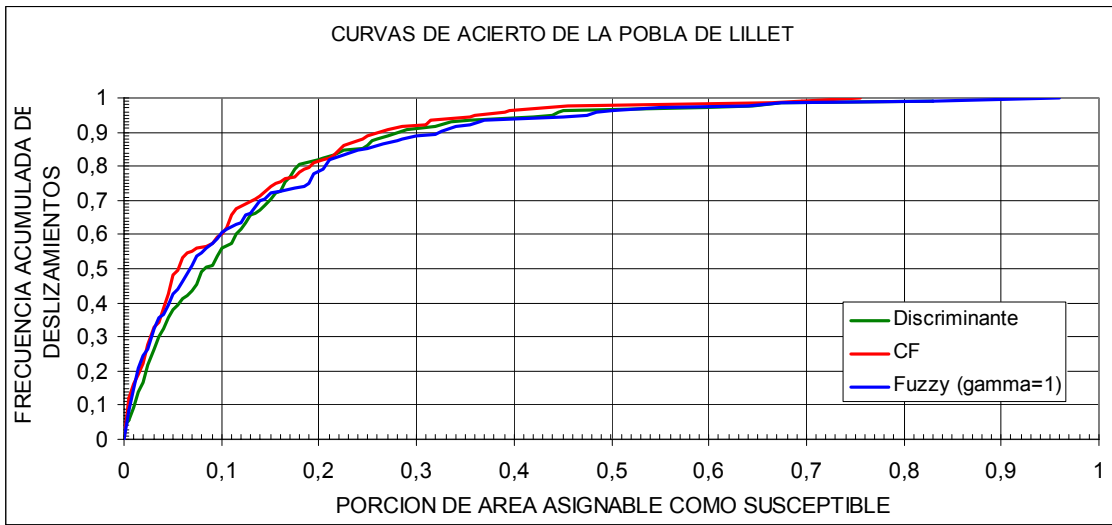


Figura 6.37. Curvas de acierto correspondientes a los modelos elaborados para La Población de Lillet.

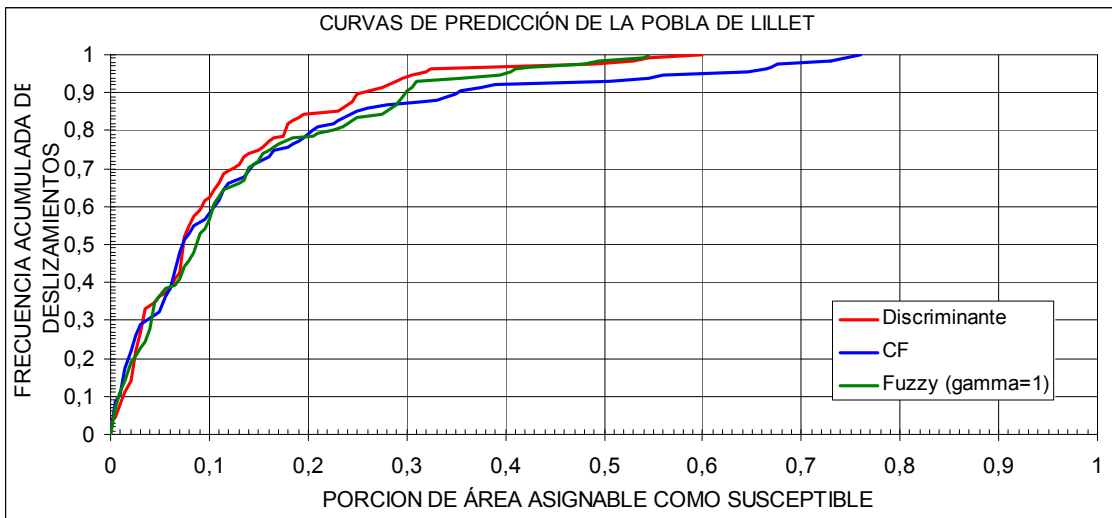


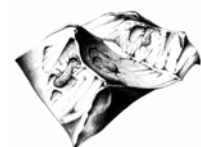
Figura 6.38. Curvas de predicción correspondientes a los modelos elaborados para La Población de Lillet.

variables cuantitativas, por lo que parte de la diferencia en los resultados puede deberse a ello.

De todas formas, y a falta de ulteriores análisis, los resultados no son del todo concluyentes, puesto que la comparación no determina de manera contundente el mejor método. Es importante reseñar que todos los métodos son válidos, y que cualquiera de ellos se puede utilizar, pues los resultados son relativamente similares. Para mejorar la capacidad predictiva, sería conveniente ir ajustando los modelos, por medio de pequeñas modificaciones mediante criterio de experto y de análisis de sensibilidad repetidos, consistente en análisis-mapa-validación-análisis-mapa-etc., lo que permitiría mejorar los resultados.

Por último, se ha llevado a cabo la validación de los mapas de peligrosidad a escala 1:5.000, elaborados para los municipios del Bajo Deva estudiados (Tamés et al., 1986). Los resultados de dicha validación (Remondo et al., 1996), se han representado en la Figura 6.40. Los modelos reflejados en la figura se han elaborado exclusivamente para el municipio de Deva, a partir de una población de deslizamientos ocurrida entre 1954 y 1991. El mapa de peligrosidad a escala 1:5.000 es un mapa cualitativo, elaborado con una metodología de tipo heurístico, que contiene 6 clases de peligrosidad (susceptibilidad) para todos los tipos de movimientos en masa. Por el contrario, los otros mapas ya comentados representan modelos de susceptibilidad estadísticos y cuantitativos, para deslizamientos superficiales solamente.

En la citada figura se observa que la validez predictiva de la metodología de tipo heurístico es poco satisfactoria, acercándose a una predicción de tipo aleatorio en los valores intermedios de peligrosidad. Aunque se debe tener presente que se están comparando no sólo procedimientos, sino también tipos de deslizamientos diferentes, parece claro que la metodología heurística proporciona peores resultados. Es posible que esos resultados mejoraran si se circunscribiera a deslizamientos superficiales, como en el caso de las demás.



En síntesis, los modelos de tipo estadístico proporcionan mejores resultados que los de tipo heurístico y ofrecen la posibilidad de ajustes sucesivos, a través de la validación, que permite mejorar su calidad. Los distintos modelos estadísticos utilizados en este trabajo presentan resultados y validez predictiva muy similares, sin que se pueda identificar ninguno claramente mejor. En el caso del Bajo Deva, que es el analizado con más detalle, el mejor resultado se obtiene con el factor de certidumbre utilizando como variables: pendiente, orientación, elevación, litología y vegetación, que representan el mejor equilibrio esfuerzo/precisión.

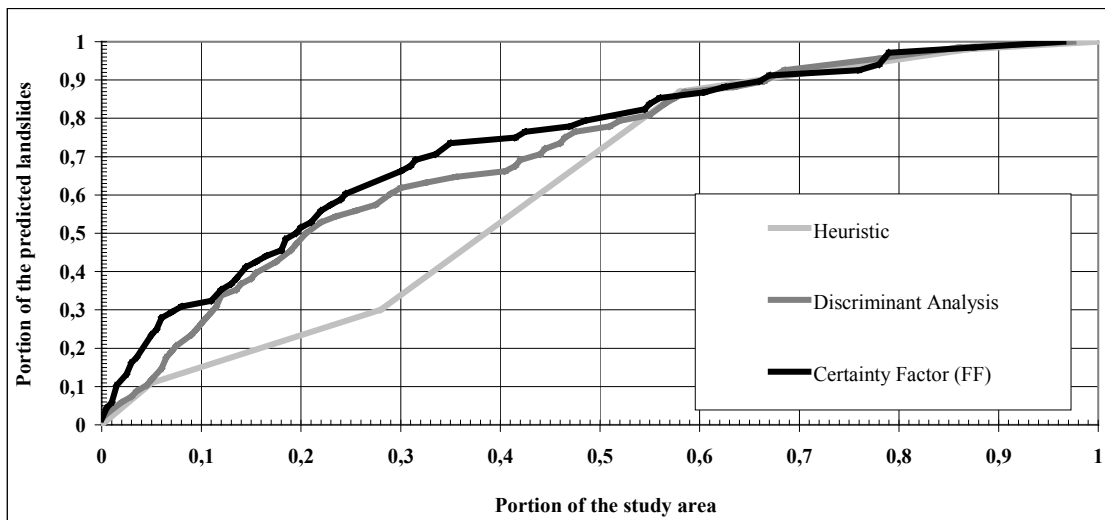


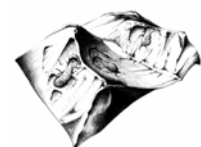
Figura 6.40. Comparación de métodos de análisis de la susceptibilidad.

### 6.1.5 Valor predictivo de los modelos; probabilidad espacio-temporal

Cualquier mapa de susceptibilidad, con independencia de la metodología con la que se haya elaborado, es un modelo y por lo tanto, una simplificación de la realidad; más exactamente, es una hipótesis que trata de representar esa realidad, dado que el conocimiento de los procesos y de los mecanismos que actúan, así como los factores que intervienen, es imperfecto. El único procedimiento para evaluar hasta qué punto el modelo elaborado puede reproducir (predecir) lo que sucederá en el futuro y, por lo tanto, pueda ser utilizado para prevenir futuros daños, es la validación. Evidentemente, la validación debe realizarse con una población de eventos independientes de los utilizados para la elaboración de los mapas. Los métodos de contrastación encontrados en la literatura han sido comentados en el apartado 1.5.2. Los procedimientos seguidos en este trabajo y su justificación se han explicado en el apartado 3.2.4.

Todas las estrategias de validación tienen inconvenientes. Así por ejemplo, aunque dos subáreas tengan características similares nunca serán exactamente iguales; dos poblaciones temporales de deslizamientos tampoco tienen por qué coincidir espacialmente puesto que las condiciones desencadenantes y condicionantes varían con el tiempo; cualquier división de una población de deslizamientos al azar puede crear muestras sesgadas; etc. De cualquier forma, no se debe emplear la población utilizada en el análisis para realizar la validación, ya que ello no permitiría la comprobación de la hipótesis implícita en el mapa, aunque sí que puede proporcionar información acerca de la bondad o no del procedimiento, método y datos utilizados.

Los resultados de la validación pueden variar dependiendo de la estrategia utilizada y de las muestras seleccionadas, tanto para el análisis como para la validación. Sin embargo, tal y como muestra la gráfica (Figura 6.41), los resultados obtenidos con distintas estrategias son muy similares, pudiéndose decir que, al menos en la zona del Bajo Deva, es posible utilizar cualquiera de los procedimientos descritos y que, con



independencia del verdadero significado de las distintas estrategias, se puede conocer *grasso modo* el carácter predictivo del modelo de susceptibilidad.

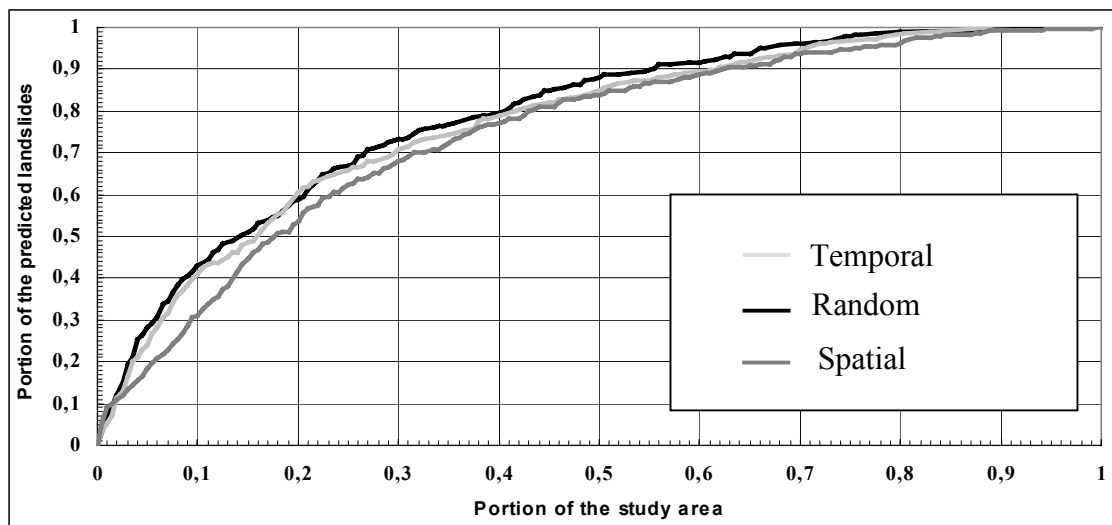


Figura 6.41. Curvas de predicción de modelos de susceptibilidad del Bajo Deva, elaborados y validados utilizando diversas estrategias.

Las curvas presentadas en la figura corresponden a tres procedimientos de validación diferentes. En un caso se ha utilizado una estrategia temporal “inversa”, empleando para el análisis los deslizamientos ocurridos entre 1991 y 1997 y los de 1954-91 para la validación. En el caso de la estrategia aleatoria, la población de deslizamientos superficiales 1991-97 se ha dividido de manera aleatoria en dos muestras. Por último, se ha dividido todo el área de estudio en dos partes, a ambos lados del río Deva, de manera que con los deslizamientos situados en una de ellas se ha elaborado un modelo para todo el área, que ha sido posteriormente validado con los deslizamientos situados en la otra parte.

Las tres estrategias de validación arrojan prácticamente los mismos resultados; esto es, con el 20% del área con valores más altos de susceptibilidad se explican alrededor del 60% de los deslizamientos de validación y aproximadamente un 15% del área puede considerarse estable. En las validaciones realizadas para el municipio de Deva o para el área de Itziar, las diferencias de resultados entre las distintas estrategias de validación

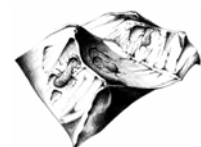


son mayores. Esto es lógico si tenemos en cuenta que estas dos zonas son mucho más pequeñas, por lo que las poblaciones de deslizamientos son mucho menores y aumentan las posibilidades de divergencia entre distintos tratamientos estadísticos. En cualquier caso, según se observa en la figura, las diferencias no son grandes.

Parece claro que la mejor forma de evaluar el valor predictivo del modelo es utilizar una estrategia temporal, puesto que lo que se pretende saber es lo que sucederá al cabo de un cierto tiempo posterior a la elaboración del mapa. Este tipo de validación se ha aplicado con especial profundidad en el municipio de Deva, para el que se han obtenido una serie de clases temporales de deslizamientos, a partir de 7 vuelos de diferentes fechas. Las Figuras 6.42 a 6.44 muestran diversos ejemplos de este tipo de validaciones.

En la Figura 6.42 se presentan las curvas de predicción de los modelos de susceptibilidad elaborados con los deslizamientos ocurridos en el municipio de Deva para los siguientes lapsos temporales: todos los anteriores a 1983, 1970-83, 1954-70 y pre 1954. Todos estos modelos se han validado con la población ocurrida entre 1991 y 1993. Las diferentes curvas de predicción evidencian que *grosso modo* todos los modelos tienen la misma capacidad predictiva en el tiempo y que ésta oscila del 70% al 80% de predicción para el 30% de los valores más susceptibles.

Hay, sin embargo, algunas diferencias interesantes. El modelo que proporciona mejores resultados es el que utiliza todos los deslizamientos, lo cual es lógico; sin embargo, el modelo basado en los deslizamientos anteriores a 1954 es sólo ligeramente peor. Los peores resultados se obtienen con la población correspondiente a 1954-70, que es la menos numerosa, lo cual también es razonable. No obstante, las divergencias observadas probablemente no reflejan simples diferencias estadísticas debidas al tamaño de las poblaciones, sino que pueden deberse a variaciones temporales de la distribución espacial de los agentes causales (tormentas, actuación humana, etc.); estos cambios pueden ser especialmente significativos en lapsos temporales pequeños, como



los utilizados. El efecto descrito resulta todavía más patente en los resultados representados en la Figura 6.43. En esa figura se presenta un modelo único, elaborado con todos los deslizamientos anteriores a 1983, que se ha validado con movimientos posteriores (1983-97, 1983-95, 1985-91, 1991-93 y 1993-97). La curva de traza más regular y previsiblemente más ajustada a la realidad es la elaborada con el mayor número de deslizamientos. La peor es nuevamente la correspondiente a la población de validación menos numerosa y la mejor predicción se obtiene para el lapso 1991-93. Probablemente, aunque no se puede asegurar, esto refleje ciertos cambios en la distribución espacial de los agentes desencadenantes.

En cualquier caso, parece evidente que cualquiera de los procedimientos de validación utilizados puede considerarse adecuado para determinar la capacidad predictiva de los modelos, siendo las diferencias entre éstos limitadas.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la capacidad predictiva de los modelos en el área de La Población de Lillet, es sensiblemente mejor (Figura 6.38). Otros estudios que han aplicado funciones de favorabilidad similares han obtenido resultados también mejores, tal y como describen Luzi y Pergolani (1996), y Luzi y Fabbri (1995), en el área de Fabriano (Italia); de Brum et al. (1998), en un área cercana a Lisboa, obtienen resultados similares a los anteriormente citados. Otros autores, por el contrario, obtienen resultados parecidos al los de este trabajo o incluso peores, tanto en zonas de Colombia como de Japón (Chung et al., 1995; 1997). Todos estos ejemplos han utilizado un número pequeño de variables, coincidentes en la mayoría de los casos con las que en este trabajo han resultado ser las más relevantes. El hecho del diferente comportamiento de los modelos en las distintas zonas en que se han aplicado no tiene una explicación sencilla, pero parece probable que sea una cuestión relacionada con la extensión relativa de las zonas en las que no hay posibilidad de deslizamientos, tal como se ha señalado anteriormente.

La contrastación de los modelos que aquí se presentan, tanto en las zonas estudiadas en este trabajo como en otras áreas con condiciones geomorfológicas bastante

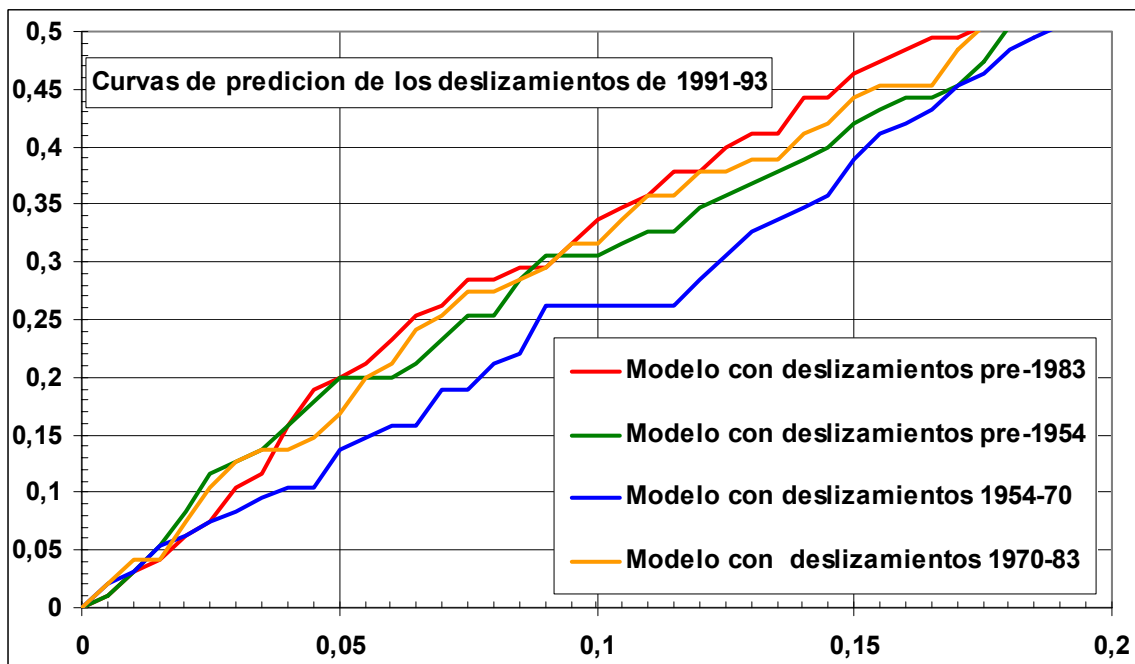
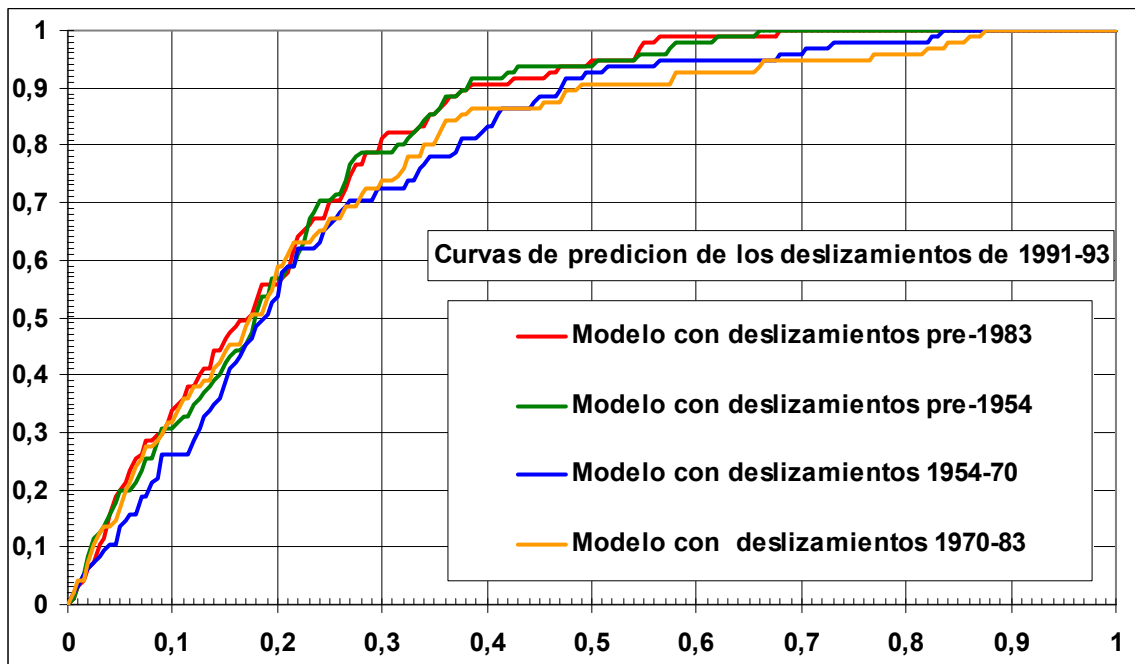


Figura 6.42. Curvas de predicción de modelos de susceptibilidad elaborados con deslizamientos correspondientes a diferentes intervalos temporales y validados con los ocurridos entre 1991 y 1993.

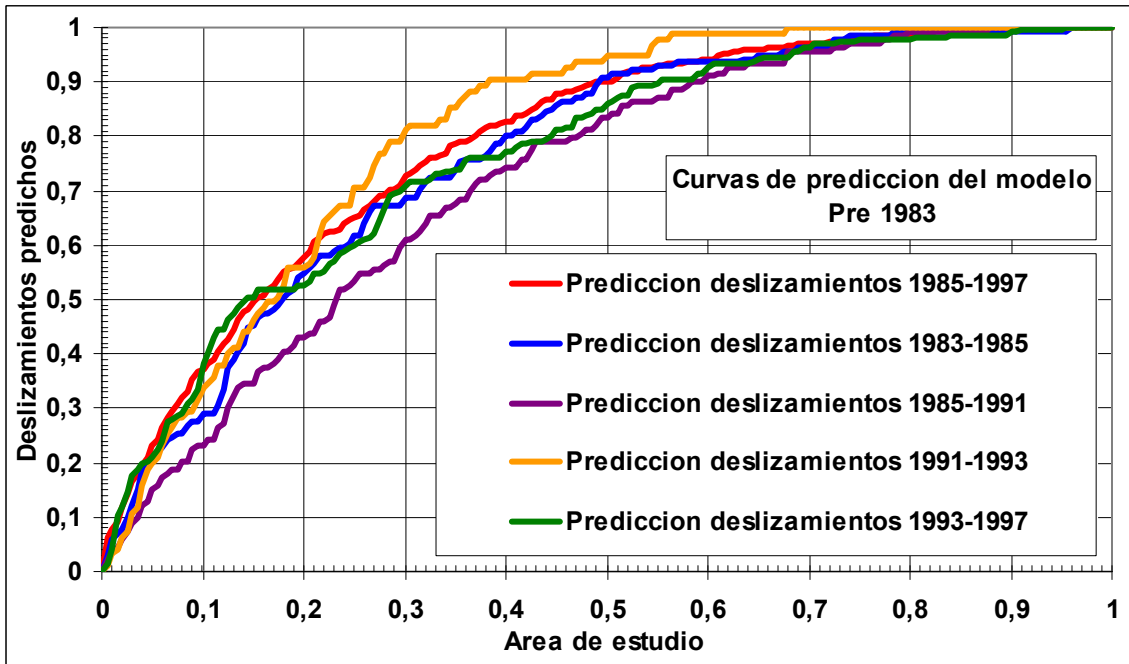


Figura 6.43. Curvas de predicción de un modelo elaborado a partir de los deslizamientos ocurridos anteriormente a 1983 con poblaciones de deslizamientos posteriores.

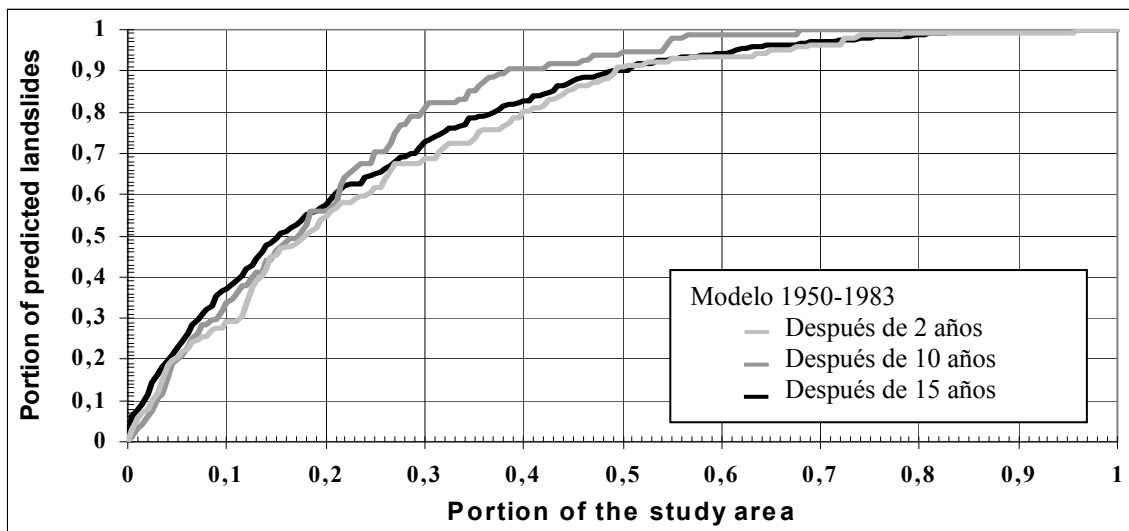


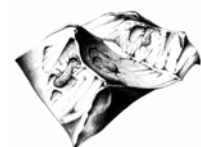
Figura 6.44. Validación de un modelo predictivo del municipio de Deva con los movimientos ocurridos 2, 10 y 15 años después.

diferentes, proporcionan una base razonable para considerar que constituyen una herramienta adecuada, que permite mejorar de manera notable la calidad de las evaluaciones de susceptibilidad. No obstante, esto no debe tomarse como una prueba definitiva de su validez en todo tipo de situaciones geomorfológicas. Una posible vía para una mejor contrastación de este tipo de modelos sería circunscribir los análisis (y las validaciones) a las zonas que no tuvieran condiciones claras de estabilidad (excluyendo llanuras, áreas sin regolito, etc.) en las cuales, como se ha comentado anteriormente, se tiene garantizado *a priori* el acierto.

Si se acepta que el procedimiento es adecuado y que los modelos son coherentes desde el punto de vista matemático, se puede señalar una serie de posibles explicaciones de los defectos en la predicción:

- La población de deslizamientos no es la población total de los eventos ocurridos, ni una muestra aleatoria de la misma.
- Se está incluyendo en el análisis varios tipos de deslizamientos diferentes, que responden a procesos y factores causales distintos.
- Faltan uno o varios parámetros condicionantes o determinantes de la inestabilidad (por ejemplo, nivel freático, estructura, etc.).
- Los parámetros utilizados, aún siendo determinantes, tienen errores y/o están representados por valores inapropiados.
- Las variables incumplen algunos de los requisitos matemáticos, como por ejemplo la necesidad de independencia. Este problema es de difícil solución, puesto que una independencia total nunca ocurre en la naturaleza.
- Los factores desencadenantes presentan variaciones en el tiempo entre diferentes partes de la zona de estudio.
- Los defectos se deben a una combinación de los problemas señalados arriba.

Lo presentado hasta ahora pone de manifiesto que es posible elaborar modelos (mapas) de susceptibilidad a los deslizamientos, validados y con capacidad predictiva conocida. Ahora bien, esa capacidad predictiva tienen una expresión espacial, y carece



de dimensión temporal explícita; es lo que se ha denominado “probabilidad espacial” (capítulo 3; Figura 3.1). Desde el punto de vista de la cartografía de amenazas, esa dimensión temporal resulta de especial interés.

La predicción temporal de los deslizamientos tiene una doble vertiente: por un lado, interesa predecir cuándo puede ocurrir un próximo evento, lo cual sólo se puede abordar para deslizamientos activos individuales, en los que esté instalada la instrumentación correspondiente. Esto, evidentemente, no es aplicable a la cartografía de amenazas. Por otro lado, interesa conocer el intervalo de recurrencia o periodicidad promedio entre eventos sucesivos que afecten a una zona dada. Una posible forma de abordar esto es analizar la variabilidad temporal de los factores desencadenantes principales en la zona de estudio, en general lluvias que superen cierta intensidad. El periodo de recurrencia de precipitaciones por encima de un cierto umbral, junto con el análisis de la distribución temporal de los deslizamientos en el pasado, puede ayudar a establecer ese periodo de recurrencia promedio. Por ejemplo, en la zona del Bajo Deva las lluvias de intensidad suficiente para desencadenar un número alto de deslizamientos se producen con intervalos que no suelen sobrepasar los 5 años. Sin embargo, no es posible dar a ese intervalo de recurrencia promedio una expresión espacial concreta, ya que no se puede saber qué zonas concretas se verán afectadas por las próximas tormentas.

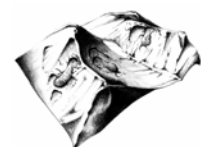
Los modelos presentados en este trabajo ayudan a avanzar en la elaboración de mapas que reflejen la probabilidad espacio-temporal de los deslizamientos. Para poder conocer la probabilidad temporal hay que determinar la edad de los movimientos, o al menos el número producido en un determinado periodo. Eso es lo que se ha hecho en la zona del Bajo Deva.

En la Figura 6.44 se presentan varias curvas de predicción de un modelo elaborado con los deslizamientos ocurridos entre 1950 y 1983, validado con las poblaciones de movimientos sucedidos al cabo de 2, 10 y 15 años. A pesar de que existen algunas diferencias entre los resultados, puede decirse que el comportamiento del modelo es

más o menos el mismo con independencia de la población temporal utilizada y , en general, bastante constante en el tiempo. Esto no quiere decir que el número de eventos sea constante, sino que la proporción de nuevos movimientos correctamente predicha por el modelo permanece aproximadamente constante.

Con independencia de las pequeñas diferencias en las curvas, es evidente que todas ellas, en conjunto, definen una banda de predicción a partir de la cual es posible estimar el porcentaje de nuevos deslizamientos que afectarían a la zona (pixels) con determinado valor de susceptibilidad. Así, según se deduce de las curvas de la Figura 6.44, aproximadamente el 35% de los deslizamientos que ocurran en el futuro, se producirán en el 10% de los pixels con mayor susceptibilidad, y el 60% de aquéllos en el 20% de éstos. Si, a partir del análisis temporal de los deslizamientos (que se comenta en el apartado siguiente) establecemos que, por ejemplo, cabe esperar que en el futuro inmediato ocurran 40 nuevos deslizamientos por año, en el municipio de Deva, podemos decir con bastante seguridad que 14 de éstos ocurrirán en el 10% de los pixels más susceptibles, 24 en el 20%, etc. La probabilidad de que uno de esos pixels experimente un deslizamiento será de  $14/40.000$  al año para el 10% más susceptible,  $24/40.000$  para el 20% más susceptible o bien  $10/40.000$  para los pixels que representan el “segundo 10% más susceptible”. Esto es, el mapa de susceptibilidad puede expresarse en términos de probabilidad espacio-temporal.

En resumen, los diferentes modelos propuestos permiten realizar predicciones de validez contrastable y cuantificable que se pueden expresar tanto en forma de probabilidad espacial como espacio-temporal, siempre y cuando se tenga información sobre la ocurrencia de deslizamientos en el pasado.



### 6.1.6 Errores

La validación del mapa de susceptibilidad es, en sí misma, una estimación de lo que el mapa es capaz de predecir, pero si se pretende profundizar en su comprensión es conveniente analizar los errores de las variables y los del procedimiento de análisis, así como sus implicaciones en el mapa resultante. En este apartado se analizan las posibles fuentes de error y las incertidumbres asociadas a todas las fases de análisis de la susceptibilidad.

De acuerdo con Burrough (1986) y Aronoff (1989) las principales fuentes de error cuando se trabaja con un sistema de información geográfica son las siguientes:

#### Errores de la información de partida:

- Errores geométricos derivados de la georeferenciación global de los elementos cartografiados, tanto en el campo como con técnicas de teledetección. La clasificación de deslizamientos constituye un ejemplo de este tipo de errores.
- Errores semánticos como consecuencia de la sistematización en la clasificación de los elementos, en el campo y en el gabinete.
- Errores en la recogida de datos (medición de datos en el campo, muestreos, etc.).
- Errores debidos al carácter difuso de las unidades naturales. Los ejemplos más evidentes de este tipo de error los constituyen los mapas de litología y espesor de formaciones superficiales.
- Errores ligados a la variación en el tiempo de los elementos a cartografiar. Este error es importante en la cartografía de usos del suelo o de vegetación, que pueden cambiar muy rápidamente.

#### Errores generados durante la introducción de los datos en el SIG:

- Errores de digitalización causados por fallos del operador o por limitaciones en la precisión del sistema digitalizador.
- Errores tipográficos en la introducción de los atributos.



Para limitar este tipo de errores todos los mapas han sido corregidos de acuerdo con la ortofoto digital de 1993. Los posibles errores de etiquetado fueron revisados con sumo cuidado.

Errores inherentes al propio sistema de información geográfica:

- Errores debidos a las limitaciones en la precisión con la que se almacenan las coordenadas y otros datos numéricos en el sistema.
- Errores en la conversión entre formatos vectoriales y matriciales.

El error de rasterización es el único de los dos que presenta cierta relevancia; la disminución del tamaño de la celda reduce enormemente este error.

Errores producidos durante la manipulación y análisis de los datos:

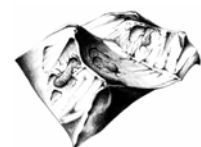
- Propagación de errores producidos en el cruce de mapas.
- Errores debidos al uso incorrecto de algoritmos (falta de lógica y limitaciones).
- Errores derivados de la interpolación (como en los modelos derivados de pendientes).

Este tipo de errores ya ha sido comentado anteriormente. En el Anexo I se comentan los errores relativos a las variables derivadas del MDE.

Errores de los resultados cartográficos y de su aplicación:

- Errores cartográficos debidos a limitaciones de los sistemas de impresión/visualización.
- Aplicación incorrecta o inapropiada de los productos resultantes.

A estos errores hay que añadir un error muy importante, y común en todos los estudios del medio natural, que deriva de la necesidad de generalizar variables para representarlas cartográficamente. En efecto, muchas de las variables que normalmente se cartografían tienen en la realidad una distribución continua y, sin embargo, el cartógrafo hace medidas puntuales, por lo que el número de éstas y su potencial generalización son determinantes. Este es el caso, por ejemplo, del espesor del regolito. Como norma general se puede decir que cuanto mayor sea el tiempo dedicado al estudio de campo y fotointerpretación, menor será el error acumulado.



En general, la mayoría de los errores descritos pueden considerarse casi despreciables, con la salvedad de los relativos a la información de partida y los de manipulación y análisis de los datos.

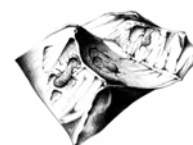
Es importante señalar la diferencia entre error e incertidumbre. El error es la diferencia entre un valor observado, medido o calculado y el valor ideal, real, convencional o estandarizado. El error es también la variación en las observaciones, medidas o cálculos debidos a equivocaciones, imperfecciones del equipo y de las técnicas, limitaciones humanas, cambios en las condiciones del entorno o por otros factores incontrolables. Cuando no existe un valor convencional o estandarizado que sirva de referencia, se debe hablar de incertidumbre entre dos valores (van Westen, 1993). Así por ejemplo, la localización de un punto en el mapa tendrá un error asociado. Por el contrario, la génesis de un determinado rasgo geomorfológico puede no ser interpretada de igual forma por diferentes investigadores, por lo que la comparación entre las diferentes interpretaciones tendrá asociada una incertidumbre. Por supuesto que la cartografía de dicho rasgo tendrá un error de localización pero si, además, su forma es poco evidente, tendrá un error de localización propio de cada investigador y una incertidumbre dependiente de las diferentes interpretaciones de los investigadores. En general puede considerarse que el error de localización es insignificante en comparación con la incertidumbre derivada de la interpretación, y que la incertidumbre está relacionada con la subjetividad, por lo que cuanto mayor sea la interpretación, mayor será la incertidumbre. La valoración de la incertidumbre entre dos mapas de inventario de deslizamientos solo puede hacerse si las herramientas, técnicas y destreza del analista son similares. Normalmente éste no es el caso, por lo que valorar cuantitativamente, y de forma absoluta, la incertidumbre entre estos mapas es difícil.

Algunos de los mapas utilizados en trabajos de este tipo están basados en la fotointerpretación por lo que, en general, llevan implícito un alto grado de incertidumbre. La Tabla 6.17, muestra una estimación de la incertidumbre asociada a una serie de factores importantes en la determinación de la estabilidad de las laderas.

Tabla 6.17. Estimación del grado de incertidumbre de algunos de los factores condicionantes (modificado a partir de van Westen, 1993).

<b>FACTOR</b>	<b>GRADO DE INCERTIDUMBRE</b>
Angulo de la ladera	Bajo-Medio
Orientación de la ladera	Bajo
Cartografía geológica	Bajo-Medio
Estructura geológica	Bajo-Medio
Distribución de la lluvia	Alto
Geomorfología	Medio
Distribución de los movimientos en masa	Medio
Tipología de los movimientos en masa	Medio
Actividad de los movimientos en masa	Medio
Distribución de movimientos en masa antiguos	Alto
Espesor de los suelos	Alto
Condiciones hidrológicas	Alto
Uso del suelo/vegetación	Bajo

De la tabla se deduce que, en conjunto, muchas de las variables utilizadas tienen un alto grado de incertidumbre, bien por el grado de subjetividad, bien por la escasez de datos en los que están basadas. El grado de incertidumbre está relacionado sobre todo con la subjetividad, pero también con la escala de análisis, el tiempo y dinero disponibles para la captura de datos, el tamaño del área de estudio, la experiencia del investigador y la exactitud de los mapas existentes.



Los datos que se han tomado en el campo sobre algunas variables causales han servido como criterio de evaluación de errores en las variables. Si se acepta que los datos de campo son “datos reales”, pueden ser comparados con los datos de los mapas que se pretende valorar. Por supuesto que gran parte de estas variables medidas en el campo tienen asociado un error de medida, que dependiendo del tipo de variable será más o menos grande, pero que en general puede considerarse prácticamente despreciable. Así por ejemplo, la determinación de que un deslizamiento está situado en un pastizal es completamente inequívoca; por el contrario, la medida del ángulo de la zona de ruptura de un movimiento, cuando su estado de conservación no es bueno, conlleva los errores de la extrapolación de la superficie, de la medida con un instrumento y del propio instrumento. No obstante y desde un punto de vista práctico, el error de este tipo de medidas es poco importante a los efectos del análisis que aquí se realiza.

A continuación se describen y se estiman algunos errores e incertidumbres que presentan algunas de las variables utilizadas. En el Anexo I se comentan los errores inherentes a todas las variables empleadas.

#### Errores de los mapas de variables:

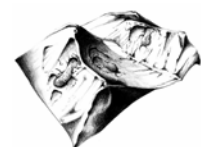
##### a) Errores de los modelos digitales de terreno

De acuerdo con Veregin (1989), los errores existentes en un MDE pueden ser de dos tipos: cartográficos y temáticos. Los errores cartográficos son los que se refieren a la incorrecta localización de los elementos del modelo (coordenadas x, y). En un formato matricial regular todas las coordenadas se asimilan al punto central de cada celda, lo que por sí mismo supone un error estándar prácticamente equivalente a la longitud del lado de una celda y que debería sumarse a otro tipo de errores de georeferenciación. Los errores temáticos son los errores del atributo representado en el modelo (altitud); es decir, de la coordenada z. Este tipo de errores se origina en el proceso de interpolación, aunque los errores de los datos originales pueden también constituir fuentes de error. Sin embargo, actualmente, la mayoría de la información topográfica

viene de origen en formato digital, bien haya sido restituida digitalmente, bien con cualquier otro procedimiento analógico, pero siempre con alta precisión; por ello, este tipo de datos presentan errores muy pequeños, despreciables en comparación con otros errores que están siendo considerados.

Van Westen (1993) calculó diferencias de hasta  $20^\circ$  entre diferentes mapas derivados de dos MDE. Skidmore (1989) estimó diferencias de  $5^\circ$  en el ángulo de la pendiente y  $70^\circ$  en orientaciones, a partir de varios modelos digitales derivados del mismo MDE, utilizando distintos algoritmos de interpolación. Carrara (1988) calculó un error medio en la pendiente de  $1,48^\circ$ , con una varianza de  $15^\circ$ , entre dos modelos digitales de pendientes derivados de un mismo MDE, utilizando el mismo algoritmo, pero en dos SIG distintos.

En este trabajo se ha estudiado el error en dos modelos digitales de pendientes, PENDI y PENDII, a partir de su comparación con datos de campo. Los dos tipos de datos que se comparan son cualitativamente distintos. Un tipo corresponde al ángulo de pendiente derivado del DEM, por lo que es un ángulo medio correspondiente como mínimo al doble del lado de una celda. En los modelos matriciales, la pendiente se calcula para cada celda a partir de la diferencia de elevación de las dos celdas más próximas a ambos lados de la misma. Este es el modelo más simple, pero con el objeto de suavizar los cambios bruscos inherentes en todos los modelos, se suelen usar también 4, 6 y 8 celdas próximas, por lo que la pendiente en una celda nunca es un reflejo de la pendiente media de la longitud equivalente al lado del pixel sino a 2, 3, 4, etc. veces esa longitud). El otro tipo de datos, se tomó directamente en el campo, tratando de reconstruir la superficie original del terreno previo a la rotura. Por esta razón, los ángulos derivados del DEM son ángulos “suavizados” (una evidencia de esto es que en los DEM nunca se alcanzan ángulos de pendiente altos, mientras que en la realidad se pueden alcanzar pendientes verticales, e incluso inversas) y los otros, tomados en el terreno, son ángulos “límite” de estabilidad o cercanos a ellos. Los detalles de los dos modelos digitales de pendientes pueden verse en el Anexo I.



Estrictamente hablando, no es posible comparar los dos tipos de datos, pero la intención no es evaluar los errores de los MD de pendientes, sino si los modelos reflejan los ángulos de pendiente reales en los que la ladera rompe. Desde este punto de vista, y con las debidas cautelas, es razonable comparar ambos grupos de valores.

El error de los modelos digitales de terreno normalmente se describe con el error cuadrático medio (*root mean square error* – RMSE; Monckton, 1994), calculado de la siguiente forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

donde:

$$d_i = a_{ground.i} - a_{dtm.i}$$

donde:  $\alpha$  = ángulo de pendiente en grados medidos en el terreno(*ground.i*) y en el modelo (*dtm.i*)

$n$  = n° de puntos/medidas

El valor resultante fue de 10,5° para PENDII y 4,3° para PENDI.

Según Li (1998), el error se puede describir mejor mediante la desviación estándar del error (S) en lugar del error cuadrático medio:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}}$$

donde:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

$$d_i = a_{ground.i} - a_{dtm.i}$$

$\alpha$  = ángulo de pendiente en grados medidos en el terreno(*ground.i*) y en el modelo (*dtm.i*)

$n$  = n° de puntos/medidas

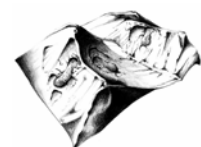
Para la desviación estándar se ha calculado un valor de 10,2° en el caso de PENDII y 4,6° en el caso de PENDI.

El ángulo medio tomado en el campo es de 27,6°, mientras que el ángulo calculado a partir del DEM derivado de Ilwis es de 23.1°, y de 27,2° para el elaborado en Arc/Info. Tal y como cabría esperar, la diferencia en la media de los ángulos es significativa en el caso de PENDII, siendo mayor la media de los ángulos medidos en el terreno, puesto que se asemejan más a los ángulos de rotura. En el caso de PENDI la diferencia es poco significativa.

El error cuadrático medio y la desviación estándar del error para el PENDII son bastante altos, lo que implica que hay una fuerte divergencia entre ambas muestras. Por consiguiente, en casos tales como este, en el que el MDE es de baja resolución, se derivan valores que no reflejan adecuadamente las características del terreno. Por el contrario, PENDI presenta ángulos muy similares a los del terreno.

No obstante, en el análisis de la susceptibilidad mediante funciones de favorabilidad no se usan valores sino clases. Ya que el error en los valores es tan grande, es necesario conocer la influencia que la divergencia entre los valores de sendas poblaciones tiene en la categorización de la variable. Para ello se analizaron los “saltos de clase” de la muestra de campo con respecto a PENDII, definiendo previamente 7 clases de pendiente (< 10°, 10°-15°, 15°-20°, 20°-25°, 25°-30°, 30°-40° y > 40°).

Los resultados de la comparación señalan que solamente el 29% de las celdas, pertenecen a las mismas clases en ambas poblaciones. El 42,5% desciende de clase (los derivados del MDE con respecto a los medidos en el campo) y el 28% asciende. En



conjunto el 71% de las celdas modifican la clase. De este 71% el 41,6% varía sólo en una clase, el 17% se modifica en dos, el 7,5% en tres, el 2,4% en cuatro y el 2,2% en 5 clases. Por consiguiente, aproximadamente el 70% de los valores (29% conservan la clase y 41,6% que varían sólo en una) experimentan una ligera variación, mientras que el resto experimentan una fuerte variación.

Si bien parece que el modelo PENDI refleja con bastante precisión la “realidad del terreno”, en el caso del modelo PENDII no parece ser así. Sin embargo, tanto el error de este último como sus implicaciones en el error de clasificación de la variable puede no tener una implicación muy importante en el error del modelo de susceptibilidad, puesto que desde un punto de vista estadístico el modelo mantiene las diferencias relativas entre los valores, por lo que sigue siendo útil, tal y cómo se comenta más adelante.

b) Errores de otros mapas de variables.

El mapa de deslizamientos es probablemente el más importante en todo el proceso de análisis, por lo que debería ser el mapa más exacto; por ello, sería deseable dedicar una gran parte del esfuerzo en la captura de datos al inventario de deslizamientos.

En la literatura existen numerosas alusiones al carácter subjetivo de la cartografía de movimientos en masa. Además, algunos autores han analizado en detalle el error y las incertidumbres asociados a la cartografía de movimientos en masa (Varnes, 1978; Fookes et al., 1991; Carrara et al., 1992; Guzzetti, 1993; van Westen, 1993; Carrara et al., 1995; Carrara, 2000), y en general puede decirse que el error oscila entre un 50% y un 96%. En la Tabla 6.18 se muestran varios ejemplos de estimación de este tipo de errores. El error total representa todo un conjunto de errores asociados a la identificación de los movimientos en masa, a su interpretación, clasificación, restitución y digitalización (Carrara et al., 1995) y se ha calculado a partir de la siguiente expresión:



$$Error\ total = [(A \cup B - A \cap B) / A \cup B] \times 100$$

siendo A y B las cartografías de movimientos en masa realizadas por distintos operadores.

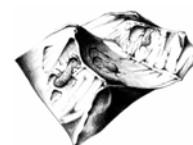
Tabla 6.18. Evaluación del error en la cartografía de movimientos en masa (a partir de Carrara et al., 1992 y Guzzetti, 1993).

<i>AREA</i>	<i>TAMAÑO (km<sup>2</sup>)</i>	<i>EXPERIENCIA DEL CARTÓGRAFO</i>	<i>TECNICA USADA</i>	<i>ERROR TOTAL</i>	<i>ERROR DEL CARTÓGRAFO (estimación)</i>
La Honda	17	igual	igual	52,5%	42%
Tescio	60	igual	diferente	61,8%	52%
Coscerno	130	igual	diferente	61,9%	52%
Carpina	67	igual	diferente	73,0%	63%
Marecchia	46	diferente	diferente	77,9%	68%

Si se comparan los inventarios de deslizamientos de este trabajo con otros inventarios para la misma zona (Tamés et al., 1986), el error alcanza aproximadamente un 90%.

Es obvio, por lo tanto, que la identificación de los movimientos en masa implica un alto grado de incertidumbre y de error. Los factores que condicionan el grado de incertidumbre son:

- La experiencia del investigador en la fotointerpretación y en el reconocimiento de campo.
- El tipo de movimiento en masa.
- El estado de conservación de sus rasgos característicos.
- Las características del área de estudio.
- La cobertura vegetal.
- La escala, calidad y tipo de las fotografías utilizadas.



- La conversión de la información de las fotos aéreas a la base topográfica.
- La digitalización de la información.
- Los objetivos de la investigación y la dedicación.

De la discusión que antecede se podría deducir que, siendo tan grandes los errores en la elaboración de un mapa que se puede considerar como el más importante para la confección y validación de los modelos, el método carece de fiabilidad. Sin embargo, y tal y como se ha demostrado en los apartados anteriores, esto no es así. Las validaciones realizadas con poblaciones de deslizamientos correspondientes a distintos lapsos temporales han permitido establecer sin lugar a dudas que los resultados obtenidos son muy similares, a pesar de que, por la naturaleza de las muestras, el error entre ellas es del 100% (de acuerdo con la definición anterior). Esto sugiere que los errores en la identificación y representación cartográfica de los deslizamientos, por cualquier operador, tienden a distribuirse aleatoriamente por el área de estudio, por lo que no tiene por qué afectar de forma significativa a la elaboración de los modelos. Dichos errores, que pueden ser muy importantes cuando se elaboran mapas de amenazas de acuerdo con procedimientos geomorfológicos tradicionales, se diluyen casi totalmente si se aplican los procedimientos estadísticos aquí propuestos.

Otra contrastación realizada para estimar la importancia de los errores de este tipo de mapas es la llevada a cabo en la zona de Itziar, comparando un modelo de susceptibilidad elaborado a partir de las zonas (pixels) de rotura y otro hecho de acuerdo con procedimientos geomorfológicos para la identificación de las zonas inestables, según un experto conocedor de la zona; el tratamiento matemático ha sido similar en ambos casos. El resultado se muestra en la Figura 6.45. Como se puede apreciar, el segundo modelo representa una mejora de aproximadamente el 10%.

En el caso de otras variables utilizadas en el análisis el error, estimado de acuerdo con los procedimientos antes comentados, es mucho menor, tal y como se muestra en la Tabla 6.19.

Tabla 6.19. Error estimado para algunas de las variables cualitativas utilizadas.

Variable	Error (%)
VEGEI	0,2
VEGEII	3,8
LITOI	0,4
LITOI	1,7

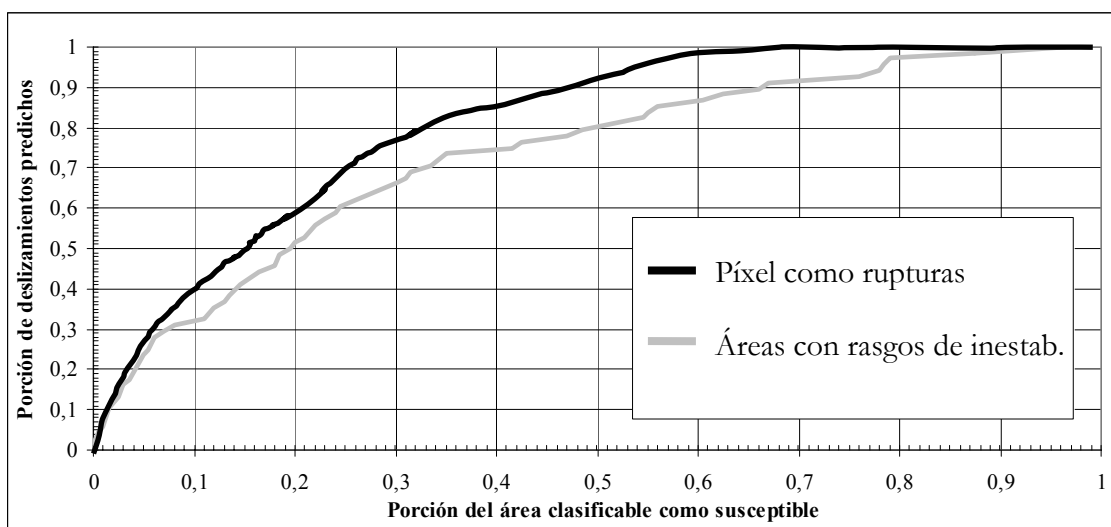
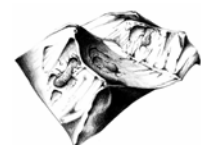


Figura 6.45. Gráfica de validación que muestra las implicaciones de dos procedimientos de cartografía de movimientos en el valor predictivo de los modelos resultantes.

Por otra parte, puede afirmarse que gran parte del error tiene relación con la escala de trabajo. Así, van Westen (1992b, 1993) analiza en el entorno de un SIG, la utilidad de varios procedimientos de cartografía de amenazas a tres escalas (regional, media y local), destacando que los métodos estadísticos son aplicables en todas las escalas, si bien a medida que aumenta la escala empeoran los resultados como consecuencia de la pérdida de precisión de los datos.



El concepto de escala en un SIG es diferente al de la cartografía convencional, ya que en un SIG es posible representar la información disponible a cualquier escala, si bien eso no implica que dicha información tenga el grado de precisión que el detalle de la escala requiere. Un SIG no trabaja a una escala determinada sino con una precisión determinada, por lo que la escala está condicionada por la incertidumbre asociada a los datos originales. Por ello, y puesto que los mapas temáticos de partida tienen escala 1:25.000, ésta ha sido la escala de trabajo. No obstante, la precisión de los datos de partida en pocos casos alcanza realmente la resolución 1:25.000, por lo que los mapas de susceptibilidad finales quizás deban ser considerados como de una escala inferior.

Por tanto, podría decirse que, además de otros tipos de errores, las variables de partida llevan implícito un error asociado que en algunos casos, como la pendiente o el inventario de movimientos, puede ser muy grande. Sin embargo, otra cosa son las implicaciones que tales errores tienen en el error final del modelo de susceptibilidad. La figura 6.46 muestra la comparación entre los mapas de susceptibilidad realizados con las variables más explicativas, pero con la salvedad de que en uno de los casos dichas variables podrían considerarse “óptimas” (PENDI+ORIENTI+MDEI+VEGEI+LITOI) y en el otro caso las variables son de peor calidad (PENDII+ORIENTII+MDEII+VEGEII+LITOI).

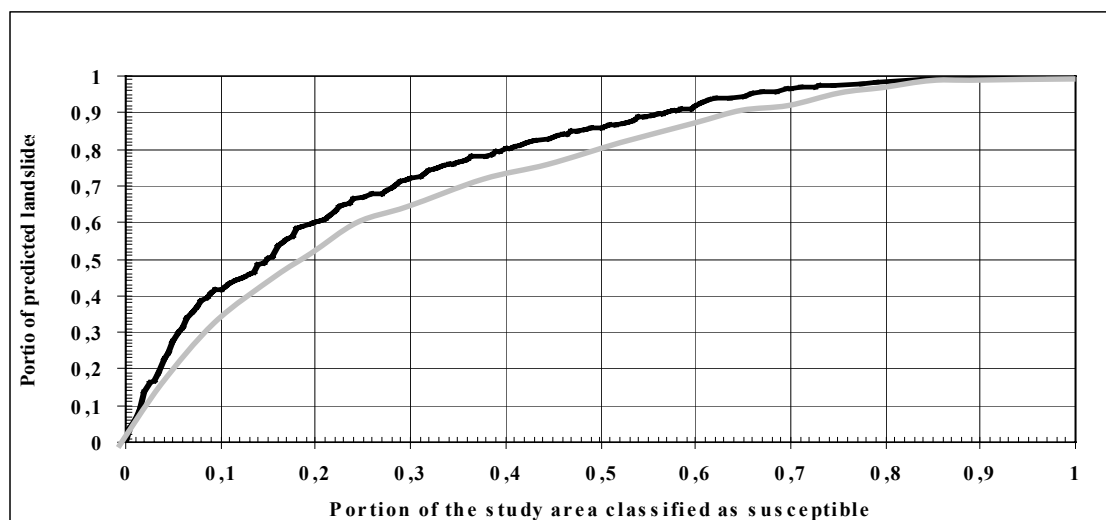


Figura 6.46. Curvas de predicción a partir de modelos elaborados con las “mejores” variables (PENDI, ORIENTI, MDEI, VEGEI y LITOI), y las “peores” (PENDII, ORIENTII, MDEII, VEGEII y LITOI). Las “mejores”

Por supuesto, los errores de las segundas son mucho mayores, tal y como se ha descrito anteriormente, pero en el primer caso ha habido que hacer un esfuerzo muy grande.

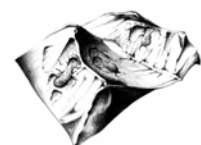
La mejora lograda en la capacidad predictiva del modelo es apreciable, del orden de un 10%, pero el nivel de esfuerzo necesario para lograr la mejora correspondiente en la calidad de los datos es entre el doble y el triple.

### **6.1.7. Aplicaciones de los mapas de susceptibilidad**

La aplicación más directa de los mapas de susceptibilidad desarrollados en este trabajo es su utilización como instrumento de apoyo a la planificación y gestión del territorio, para la prevención de futuras pérdidas potenciales. Dado que los mapas tienen una validez predictiva conocida (al igual que ocurre, por ejemplo, con las predicciones meteorológicas) se pueden utilizar como base para la toma de decisiones con respecto a medidas restrictivas o preventivas.

La metodología aquí presentada, basada en la validación independiente de los modelos, permite no sólo contrastar la hipótesis de partida, sino que confiere a los mapas un valor añadido como herramienta de prevención.

Los mapas de susceptibilidad elaborados mediante estas técnicas analíticas, una vez contrastados adecuadamente, pueden utilizarse de forma directa, como se ha comentado, o pueden servir de base para ulteriores análisis. Así, los mapas de susceptibilidad descritos pueden utilizarse para desarrollar mapas de amenazas, y mapas de riesgos. También pueden aplicarse a estudios de evaluación de impacto ambiental.



### ***6.1.7.1. Análisis de la susceptibilidad en varios municipios de Cantabria***

En los estudios de riesgos promovidos por administraciones públicas, generalmente no es posible llevar a cabo inventarios de movimientos en masa detallados ni generar bancos de datos que incluyan todas las variables que intervienen en los procesos. Además, estos productos requieren un análisis de todos los procesos que generan riesgos, incluyendo todo tipo de movimientos de ladera, inundaciones, etc. Por ello, es necesario hacer simplificaciones, diseñando un banco de datos acorde a las disponibilidades del proyecto e introduciendo “criterios de experto” para suplir las carencias del mismo. Sin embargo, el procedimiento de análisis y las técnicas a aplicar pueden ser semejantes a los utilizados en el presente trabajo.

Las técnicas aquí propuestas se han aplicado, en condiciones que se pueden considerar como las habituales en la realización de este tipo de análisis, para la evaluación de riesgos en cinco municipios de Cantabria, dentro del marco de un proyecto de colaboración entre el Gobierno Regional y la Universidad de Cantabria. Uno de los aspectos que trata este estudio es la susceptibilidad a deslizamientos del terreno. La cartografía original ha sido elaborada a escala 1:5.000, mediante una metodología de tipo directo, pero también se ha probado la aplicabilidad de técnicas estadísticas basadas en funciones de favorabilidad, para ver hasta que punto podrían ser aplicables en estudios ulteriores del mismo tipo, en las condiciones normales para este tipo de trabajo. Los municipios analizados han sido Suances, Ampuero, Torrelavega, Corvera de Toranzo y Luena (Figura 4.4).

Este ensayo se ha llevado a cabo teniendo en cuenta los resultados presentados en el apartado 6.2 (Análisis de la susceptibilidad), en relación con la técnica matemática que mejores resultados ofrece, las variables causales más explicativas, etc.

El análisis espacial se ha llevado a cabo a dos escalas, de acuerdo con los datos de partida. En el caso de los municipios de Suances y Ampuero, los mapas de variables y, por lo tanto, el resultado final, se han realizado con una resolución de 10 x 10 m,

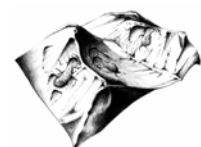
mientras que para el resto de los municipios el tamaño de celda ha sido de 20 x 20 m. Si bien ambas resoluciones distan de la escala 1:5.000, que es la planteada en el proyecto, tanto la información topográfica como la relativa a las restantes variables, no permiten aumentar la resolución final.

Las variables utilizadas en todos los municipios han sido: pendiente, orientación, litología y vegetación, además de los inventarios de movimientos en masa. Estas variables, como se ha comentado en apartados precedentes, generalmente están disponibles o son de muy fácil obtención y explican adecuadamente la susceptibilidad. Todos los movimientos de ladera se han analizado simultáneamente, sin diferenciar entre distintas tipologías. En el caso de los municipios de Suances, Ampuero y Torrelavega, se han utilizado sólo deslizamientos superficiales a partir de la fotointerpretación de los vuelos de 1956 (B/N), 1972 (B/N) y 1988 (Color), verificándolos con criterios de campo. Para el análisis de susceptibilidad se ha seleccionado la población ocurrida entre 1972 y 1988. Por el contrario, en Corvera y Luena se utilizaron deslizamientos superficiales y profundos sin diferenciar, cartografiados en un trabajo previo (González Díez, 1995).

La técnica matemática utilizada en todos los casos fue el cálculo del factor de certidumbre, puesto que es una técnica suficientemente contrastada, arrojando buenos resultados en todos los casos; además, su interpretación es muy sencilla.

Los resultados para los municipios de Suances (Figura 6.47), Ampuero (Figura 6.48) y Torrelavega (Figura 6.49) muestran, en una primera aproximación visual con recorridos de campo, que el acierto es muy alto; el 20 % de los valores más susceptibles explican aproximadamente el 80 % de los deslizamientos inventariados.

Por el contrario, en el caso de los municipios de Corvera de Toranzo (Figura 6.50) y Luena (Figura 6.51), los resultados no fueron tan satisfactorios, probablemente debido a las características del inventario de movimientos en masa utilizado en el análisis de



susceptibilidad. El inventario incluía, en ambos casos, diversos tipos de movimientos, e incluyendo tanto la zona de ruptura como el depósito, lo que determina en gran medida los resultados finales. De hecho, los depósitos de movimientos profundos de grandes dimensiones alteran de forma apreciable los cálculos estadísticos de las zonas de ruptura.

A pesar de que los mapas resultantes están aún por contrastar numéricamente, se considera que este método de análisis de la susceptibilidad es muy apropiado para estudios de este tipo, puesto que es posible generar mapas de forma muy rápida y eficaz, especialmente si se tiene montado y operativo el procedimiento en un SIG adecuado. Una ventaja adicional de estas técnicas analíticas es la posibilidad de generar mapas de susceptibilidad sin disponer de inventario alguno de movimientos en masa, extrapolando los valores de favorabilidad de otras zonas similares que ya han sido analizadas. Además, en la medida en que se están generalizando los bancos de datos digitales por parte de las administraciones y empresas regionales y locales, se podría ahorrar hasta un 90 % de tiempo en la elaboración de los mapas, si se compara con los procedimientos de cartografía directa. Si además se dispone de buenos modelos digitales de terreno, lo que será una realidad en un futuro cercano, se podrá mejorar tanto la resolución final como algunas carencias en las variables de entrada. No obstante, sería necesario reenfocar la identificación y cartografía de movimientos en masa, con el fin de adaptarlas a los requerimientos técnicos del análisis y poder utilizarla en la validación, a fin de explicitar en cada mapa su validez predictiva.

#### ***6.1.7.2. Mapas de amenaza/riesgo***

Una de las aplicaciones de los mapas de susceptibilidad sería su utilización como base para construir mapas de riesgos. Sin embargo, para ello es necesario considerar otras facetas de la amenaza o peligrosidad, como son el desplazamiento y volumen de la masa movilizada, e incluir en el análisis otros aspectos, tales como los elementos expuestos y su vulnerabilidad. En la Figura 6.52 se muestra un diagrama metodológico



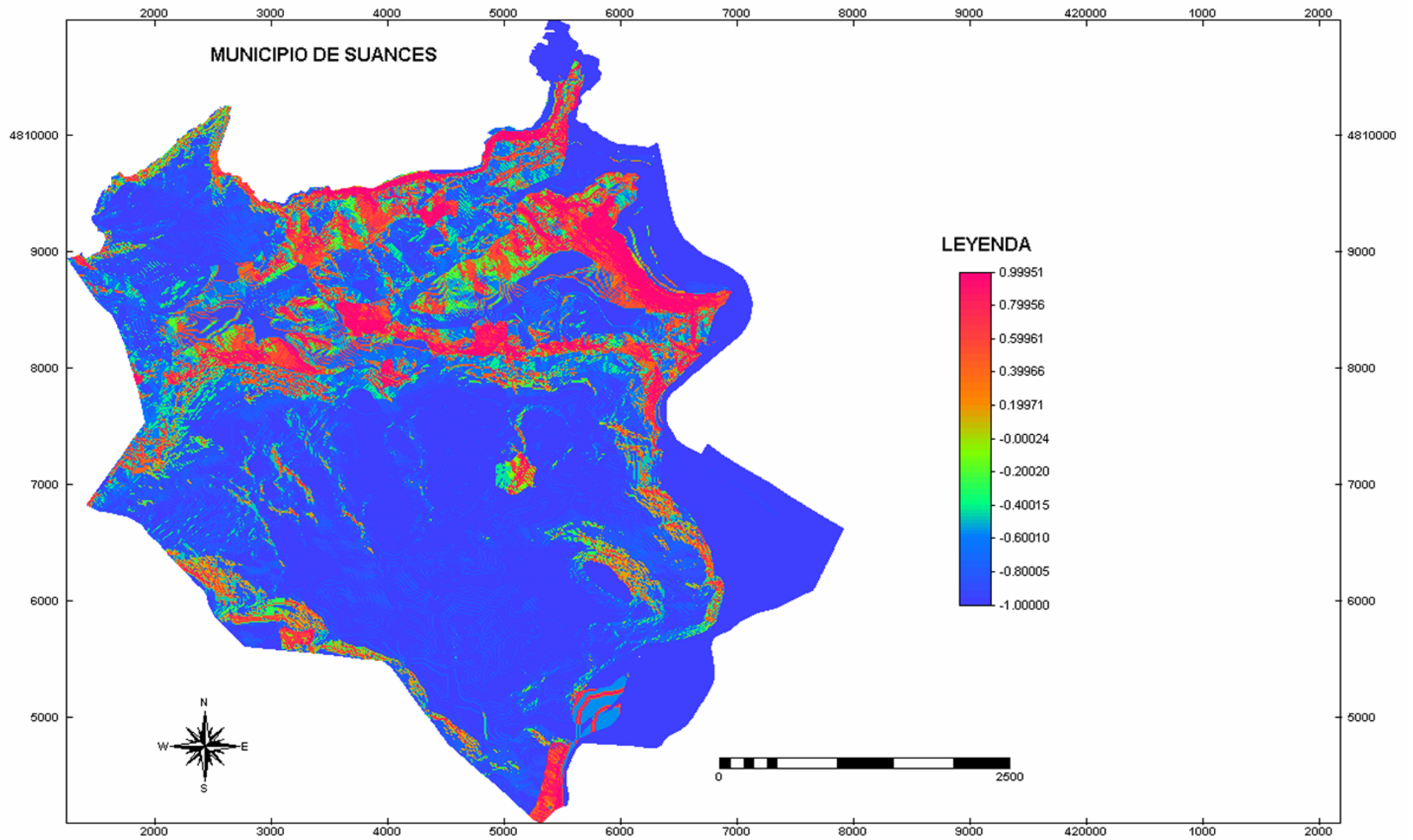


Figura 6.47. Mapa de susceptibilidad de Suances

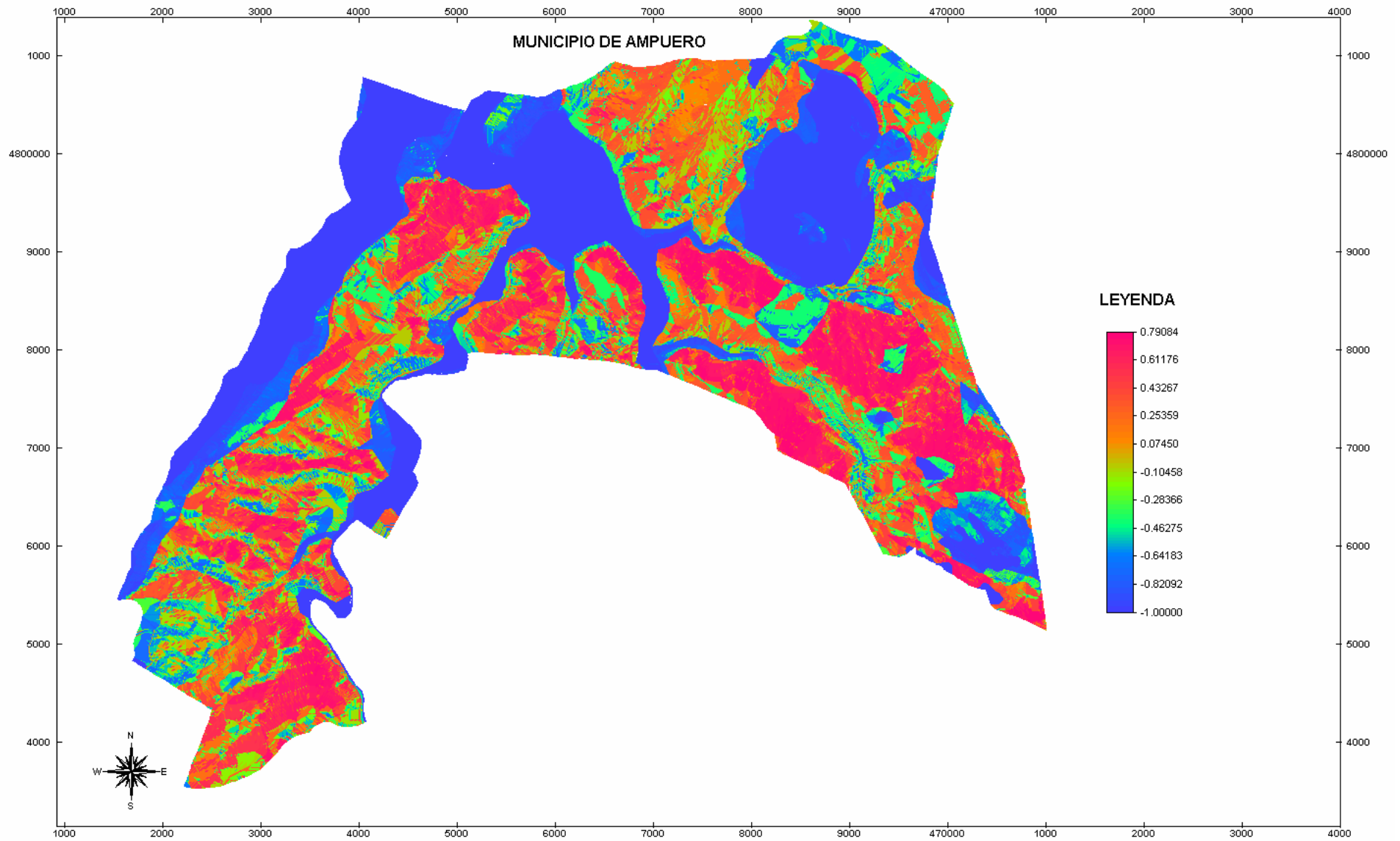


Figura 6.48. Mapa de susceptibilidad de Ampuero

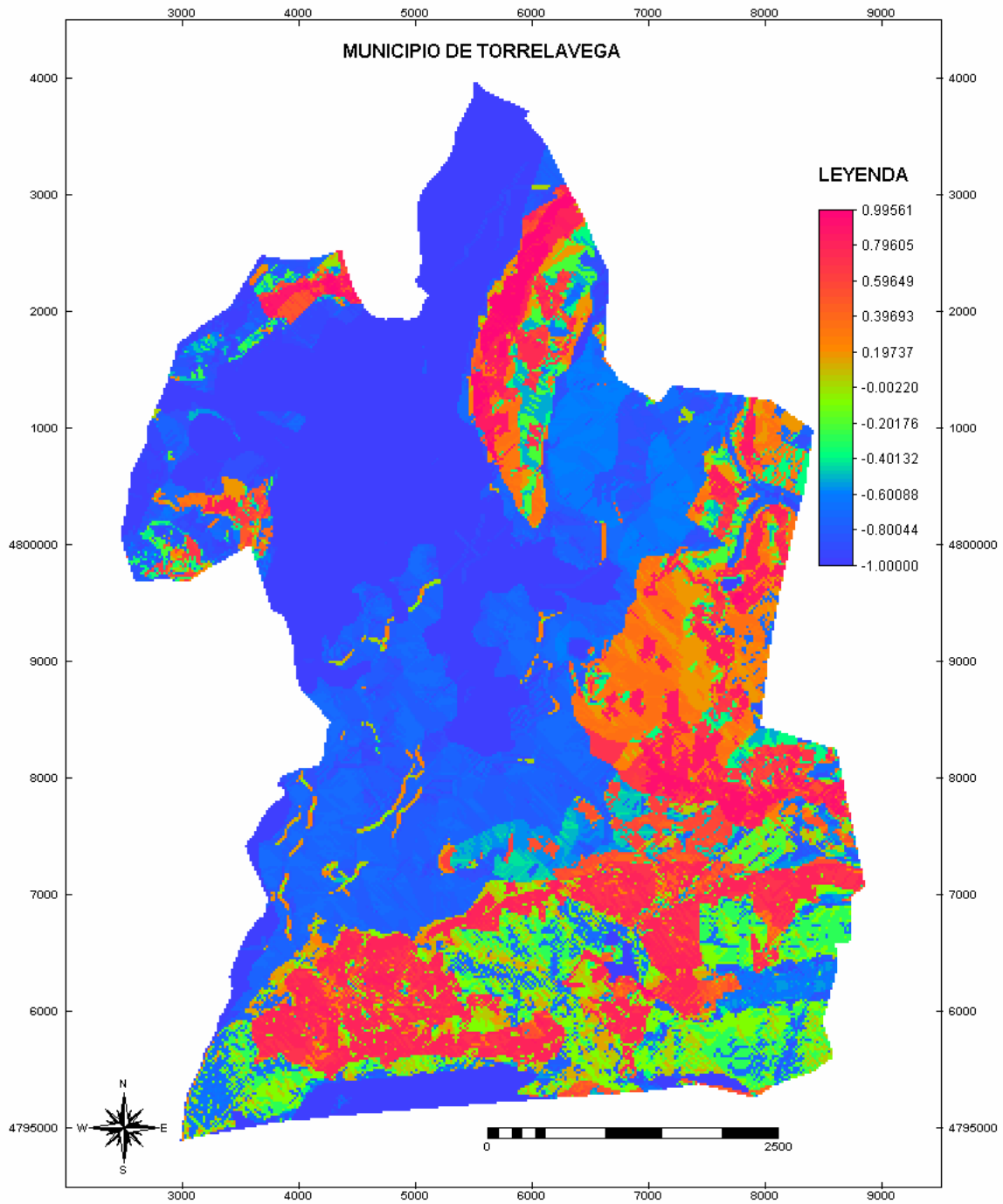


Figura 6.49. Mapa de susceptibilidad de Torrelavega

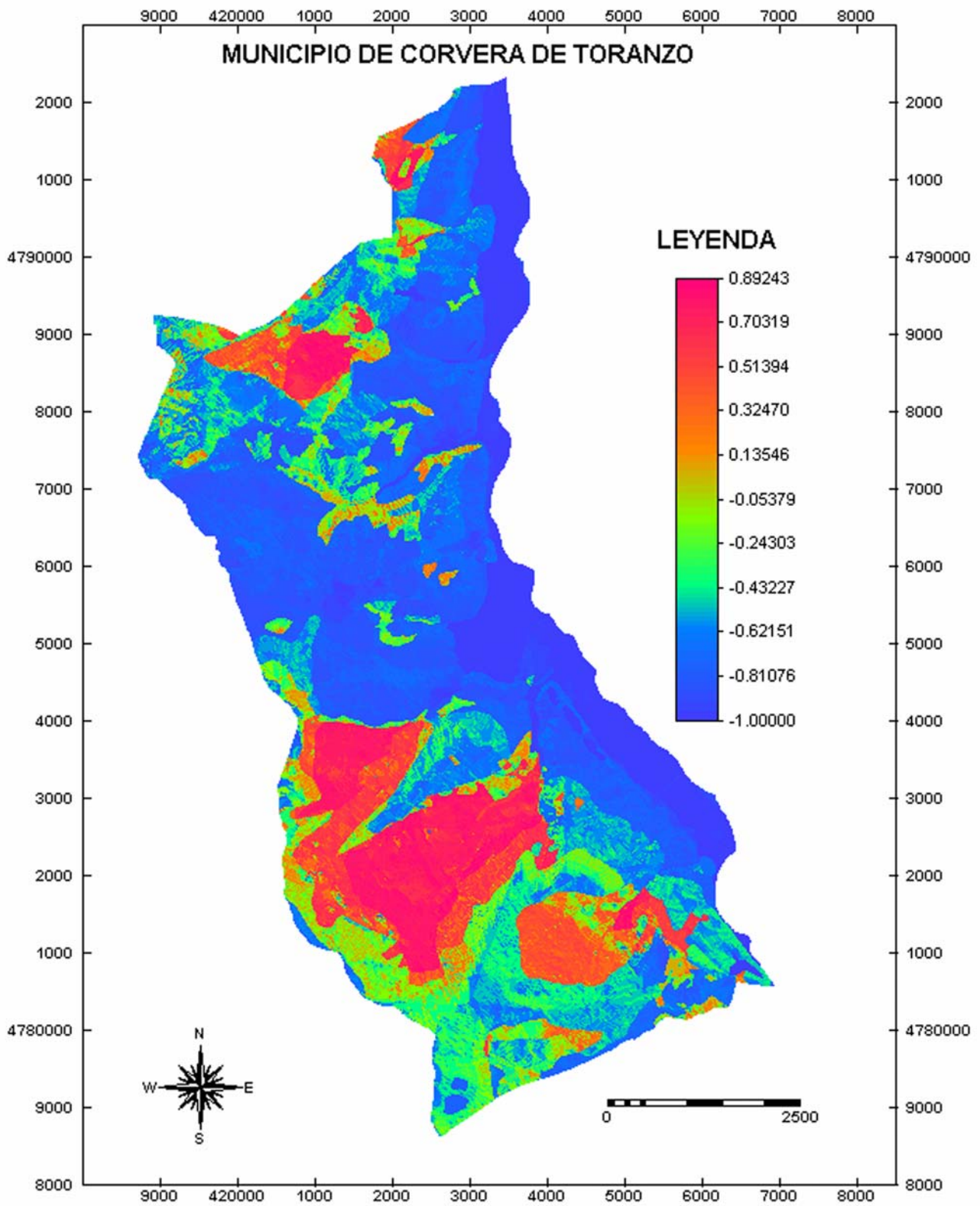


Figura 6.50. Mapa de susceptibilidad de Corvera de Toranzo



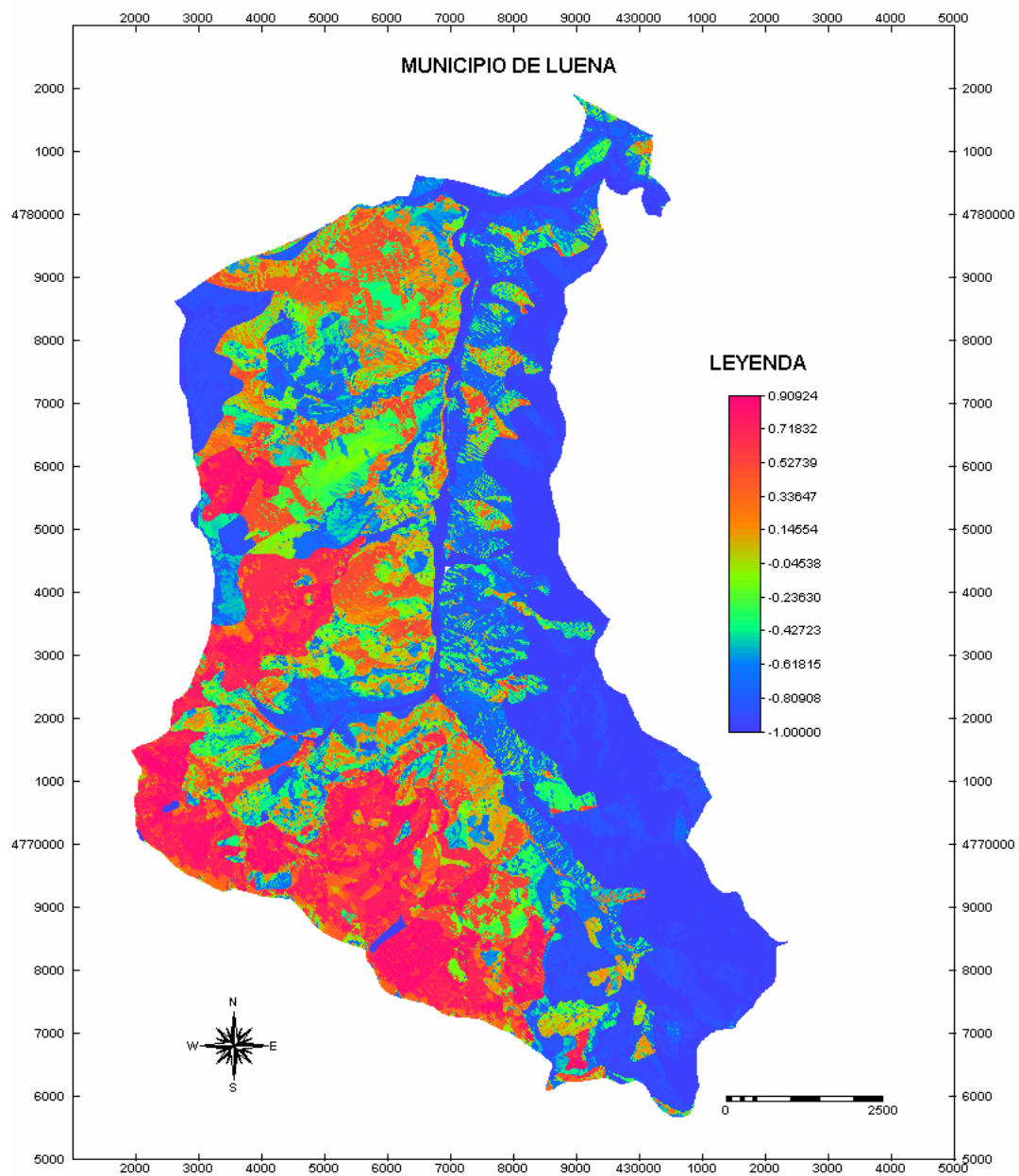


Figura 6.51. Mapa de susceptibilidad de Luena

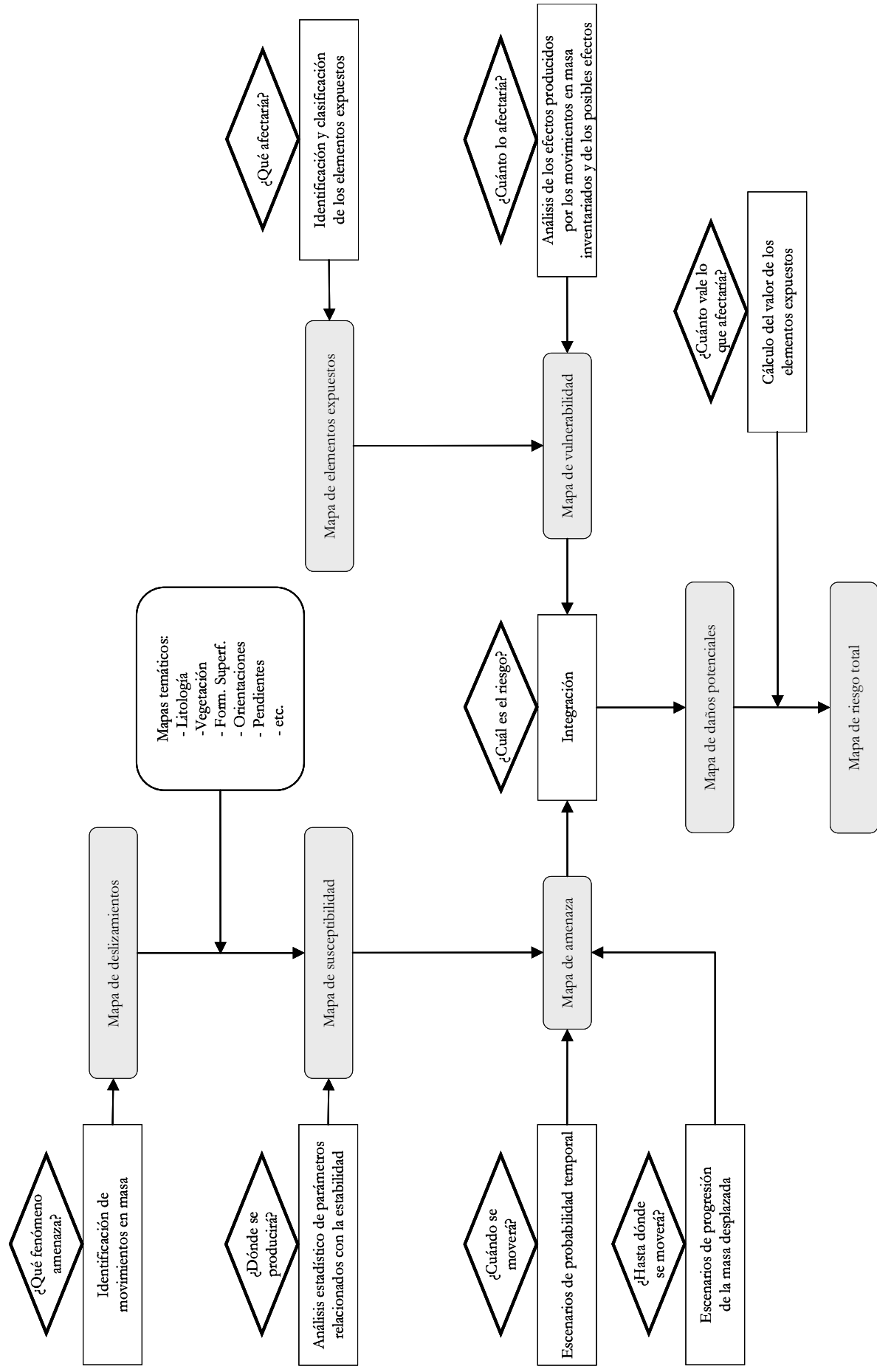


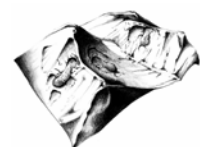
Figura 6.52. Esquema conceptual para la elaboración de mapas de riesgo.

de flujo para la elaboración de mapas de susceptibilidad, amenazas y riesgos para movimientos en masa.

Tal y como se ha explicado anteriormente, a partir del análisis de la probabilidad espacio-temporal es posible transformar los mapas de susceptibilidad en mapas de probabilidad espacio-temporal de rotura. Estos últimos mapas son los que se pueden utilizar para la elaboración de mapas de amenazas y éstos a su vez, para derivar los mapas de riesgos.

Los mapas de amenazas se construyen a partir de los mapas de probabilidad espacio-temporal incorporando el alcance de la masa movilizada. La distancia recorrida por la masa movilizada depende del material involucrado, del tipo cinemático, de las características de las zonas de acumulación y del tipo de rotura. Un ejemplo de aplicación de técnicas de análisis multivariable aplicado al cálculo del desplazamiento de la masa movilizada se presenta en Baeza (1994), que aplica la técnica de regresión múltiple para determinación de la propagación de los movimientos, a partir de parámetros del terreno. Con este método se puede predecir con bastante certeza hasta dónde se desplazará la masa una vez movida. Otro procedimiento más sencillo consiste en definir escenarios de acuerdo con el volumen y desplazamiento promedio de los movimientos ocurridos en el pasado.

En el caso de movimientos en masa muy grandes, es tan importante o incluso más, conocer la progresión de la masa que el lugar de la rotura. Si embargo, en movimientos superficiales y pequeños, como los estudiados, el desplazamiento de la masa no es un factor tan decisivo. Además, la resolución y escala de trabajo hacen que el desplazamiento de la masa no suela superar un pixel; esto es; un pixel correspondiente a la zona de rotura y otro pixel a la de acumulación, no sobrepasando prácticamente nunca 4 pixels de desplazamiento.



Una vez definido el nivel de amenaza, es preciso determinar los otros dos factores de riesgo, exposición y vulnerabilidad, a fin de obtener los mapas de riesgo. Estrictamente hablando esos mapas deberían expresarse en términos monetarios, ya que deben representar las pérdidas probables o esperables para un periodo dado, de acuerdo con el modelo utilizado. La exposición puede expresarse como el valor de los elementos materiales que pueden sufrir daños (personas, edificios, infraestructuras, cosechas, etc.) y que se encuentran en la unidad de análisis (pixel). La vulnerabilidad se puede expresar como la fracción de dicho valor que puede destruirse a consecuencia del proceso correspondiente. El producto Valor  $\times$  Vulnerabilidad  $\times$  Probabilidad expresaría el nivel de riesgo para cada pixel.

Aunque el modelo indicado es sencillo desde el punto de vista conceptual, su aplicación práctica encuentra serias dificultades. En primer lugar, resulta extraordinariamente difícil obtener cifras medianamente fiables de la exposición (valor) y que puedan ser atribuidas a cada pixel. En segundo lugar, es imposible predecir el porcentaje de ese valor (vulnerabilidad) que puede dañarse como consecuencia de eventos futuros. Los procedimientos propuestos por UNDRO (1991) para estimar la vulnerabilidad (empíricos a partir de eventos anteriores en la zona o en zonas similares; parcialmente empíricos, en los que la vulnerabilidad se determina por medio de experimentos en condiciones controladas; teóricos) presentan un alto grado de incertidumbre. El resultado neto es que, sea cual sea el modelo y procedimiento de cálculo que se aplique, las cifras de “pérdidas” que se obtengan tendrán un alto margen de error y servirán, no tanto para identificar el futuro nivel de pérdidas en las distintas zonas, sino para establecer una jerarquía con áreas de mayor o menor magnitud de daños.

Ahora bien, ha de tenerse presente que, a diferencia de lo que ocurre con los mapas de amenazas, los mapas de riesgo no son un fin en sí mismos, sino un medio. El mapa de amenazas puede considerarse como un fin desde el punto de vista científico, pues representa la capacidad de modelizar un proceso físico, lo que implica alcanzar un considerable nivel de comprensión del mismo y de los factores que lo condicionan. El

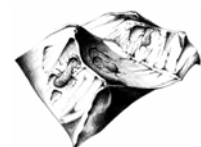


mapa de riesgo, por otro lado, es esencialmente un instrumento de ayuda para la puesta en marcha de medidas para la reducción de los daños futuros, que sería el fin buscado. Por tanto, es posible que la estrategia de elaboración de mapas de riesgo no deba necesariamente pasar por la obtención de cifras representativas de las pérdidas probables.

Los pasos a seguir para la elaboración de mapas de riesgo “cuantitativos” partiendo de los mapas de amenazas serían:

- Identificación y cartografía de “unidades de uso del suelo”, que sean razonablemente homogéneas con respecto a la presencia de elementos dañables.
- Determinación del valor promedio de cada tipo de elemento dañable en esa unidad, a fin de poder referirlo a la unidad de tratamiento (pixel).
- Análisis de los efectos producidos por deslizamientos pasados.
- Introducción de criterios de experto para la estimación de efectos no registrados, indirectos o previsibles.
- Expresión de los criterios anteriores como fracción del valor de cada tipo de elemento que se vería dañada.
- Cálculo, para cada pixel, del producto Probabilidad X Valor X Vulnerabilidad.

Dado que, según se ha indicado, es altamente improbable que se obtengan cifras realistas, se puede plantear una estrategia alternativa de cartografía cualitativa y presumiblemente más útil. Esta estrategia se basa en la consideración de que, si bien el proceso físico determinante de la amenaza es una condición necesaria para que exista el riesgo, una vez presente aquél el nivel de daños producidos depende fundamentalmente de factores socioeconómicos (Burton, 1978). Según Bertens et al. (2001) esos factores incluyen: exposición, preparación y prevención (además de la amenaza). Esos factores reflejan una serie de características que, a su vez, pueden expresarse por medio de diferentes indicadores, cuantitativos o categóricos. Ejemplos de características (e indicadores) para los distintos factores, según los citados autores, serían:



- Exposición: densidad de población, industria (nº de empresas/km<sup>2</sup>), infraestructura (presencia de aeropuerto, hospital, grandes equipamientos), uso del territorio (nº de cabezas de ganado/km<sup>2</sup>).
- Preparación: concienciación de la población (tiempo transcurrido desde el último evento, sistemas de alarma (existencia/no existencia), potencial de evacuación y socorro (existencia/no existencia de planes y organismos específicos).
- Prevención: medidas estructurales (número de actuaciones o inversión en el control de procesos) y no estructurales (existencia/no existencia de ordenanzas reguladoras, porcentaje de la población asegurada).

Para cada uno de los factores citados se elabora un mapa, por procedimientos de agregación (con o sin ponderación), obteniéndose mapas parciales expresados en cinco niveles. La combinación de los cuatro factores (amenaza, exposición, preparación, prevención) permite obtener las clases finales de “riesgo”, en las que además se indican las subclases, correspondientes a cada factor por separado (Figura 6.53). Se puede así identificar tanto el nivel de riesgo como los factores y características más determinantes del mismo, que permitirán identificar las líneas de actuación prioritarias para reducir futuros daños.

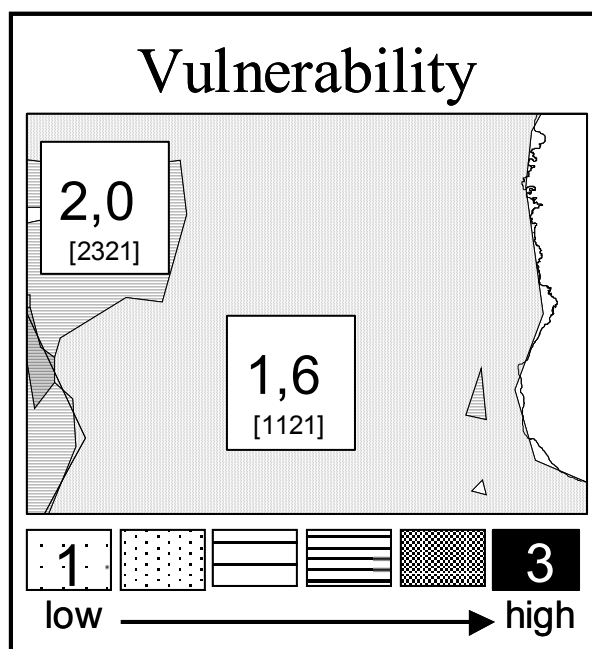


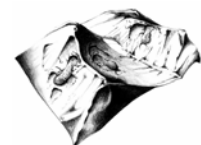
Figura 6.53. Mapa de riesgo con el sentido que se indica en el texto (Bertens et al. 2000).

Como se puede apreciar, el conjunto de las características indicadas puede expresarse por medio de indicadores susceptibles de representación espacial, con diferentes niveles de resolución. Algunas características (fundamentalmente las referentes a la amenaza) pueden reflejarse en unidades como el pixel; para otras, como las referentes a la preparación, es posible que la mejor unidad de análisis sea el municipio. En cualquier caso, todas ellas son incorporables a un tratamiento por medio de funciones de favorabilidad como el anteriormente descrito. La validación, evidentemente, debería hacerse comparando el mapa obtenido con la distribución de pérdidas reales en eventos pasados (cuanto más próximos en el tiempo, mejor). Esta es una línea de trabajo que merece ser abordada pues, de resultar válido el procedimiento propuesto, permitiría la integración de los rasgos naturales y socioeconómicos en un tratamiento único, y la derivación de mapas de riesgos cuya capacidad predictiva podría ser contrastada.

### ***6.1.7.3. Evaluación de Impacto Ambiental***

La evaluación de los impactos de las actividades humanas sobre los procesos geomorfológicos tiene que estar basada en el análisis detallado del comportamiento y dinámica del terreno, previo a cualquier nueva acción. El conocimiento del comportamiento de los procesos en el pasado proporciona criterios muy útiles para predecir la respuesta futura ante posibles intervenciones humanas.

Una aplicación de los modelos de susceptibilidad elaborados mediante técnicas estadísticas de análisis espacial se ha desarrollado en el marco del proyecto GETS (*Geomorphology and Environmental Impact Assessment of Transportation Systems; Training and Mobility of Researchers Programme (TMR)*, Unión Europea, *Contract no. ERBFMRXCT970162*) para el caso de la construcción de una autopista en la zona de estudio.



La construcción de infraestructuras lineales puede producir impactos importantes en la estabilidad de las laderas, afectando tanto a la amenaza como a la vulnerabilidad y, por consiguiente, al riesgo (Varnes, 1984). Según Cavallin et al. (1994), la interacción entre los procesos geomorfológicos y un proyecto puede ser “activa” o “pasiva”, produciendo modificaciones en el potencial destructivo del proceso natural (amenaza), en la posibilidad de daño a los elementos expuestos (vulnerabilidad), introduciendo o eliminando elementos expuestos, o afectando a todos ellos a la vez, con lo cual se modifica el riesgo. De acuerdo con esto, el impacto sobre el riesgo derivado de una determinada actuación puede expresarse de la siguiente forma:

$$I = R_{pre\ proyecto} - R_{post\ proyecto}$$

Obviamente, si el riesgo una vez desarrollada la actuación es mayor, el impacto será negativo. A pesar de que este concepto es simple y claro, su transformación en criterios significativos, cuantificables y operativos no lo es.

Un procedimiento lógico sería determinar el riesgo para diferentes unidades del área de estudio (pérdidas potenciales en vidas o propiedades, expresadas en términos económicos) previamente a la actuación y el riesgo en la situación posterior al proyecto; el impacto sería la diferencia. Sin embargo, como se ha comentado más arriba, esto no es normalmente posible, ni siquiera en el caso de que se conozca bien el riesgo inicial, y mucho menos para las condiciones futuras derivadas de la actuación. Por ello, es necesario desarrollar, en la mayoría de los casos, procedimientos alternativos.

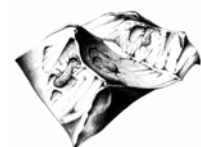
La evaluación del impacto sobre la estabilidad de las laderas requiere el conocimiento previo de la dinámica de las mismas, lo que puede obtenerse a partir del estudio de la actividad en el pasado reciente. Para ello, es necesario llevar a cabo inventarios detallados de los movimientos en masa y de los factores causales que intervienen en el proceso, con el fin de elaborar modelos de riesgos.

La aplicación de modelos determinísticos es una posibilidad, pero en general no es viable para grandes áreas (Hutchinson, 1995) o para evaluaciones preliminares, como es el caso de la mayoría de los estudios de evaluación de impacto ambiental. Una alternativa consiste en la utilización de métodos estadísticos o probabilísticos, los cuales proporcionan mapas cuantitativos de amenazas satisfactorios. Los métodos de análisis de datos espaciales desarrollados en este trabajo ofrecen la posibilidad de aplicar modelos probabilísticos para la determinación de la inestabilidad potencial.

Los mapas de susceptibilidad de deslizamientos obtenidos representan una base firme, cuantitativa y validada, en la que basar la evaluación del impacto y su predicción. Además, la validación de los mismos puede utilizarse para definir escenarios en los que basar el cálculo del riesgo.

Los indicadores de impacto considerados en este análisis han sido: longitud absoluta o relativa de la autopista que intersecte áreas de alta inestabilidad, lo que es particularmente relevante para comparar alternativas; kilómetros de autopista potencialmente afectada por movimientos no producidos por ella; área probablemente afectada, como consecuencia de la autopista (extensión, intensidad). Otros posibles indicadores son: cambios relativos en la susceptibilidad de deslizamientos como resultado de modificaciones en la topografía, en los materiales o en la hidrología (por pixel; para toda la traza); número de nuevos movimientos posiblemente desencadenados por la autopista.

Desde un punto de vista geomorfológico, es obvio que el comportamiento del indicador elegido será bueno, aceptable o malo, si la tasa de movilización es respectivamente más baja, similar o más alta que en el pasado. Las tasas del pasado reciente pueden ser fácilmente determinadas, pero las del futuro tienen que ser estimadas ya que corresponden a una situación nueva.



La evaluación de los impactos se ha llevado a cabo mediante un modelo empírico basado en el análisis de lo sucedido en los últimos años-décadas. La Figura 6.54 muestra un diagrama de flujo metodológico para esta fase del análisis. Una vez elaborado y validado el modelo o mapa de susceptibilidad es posible llevar a cabo un estudio comparativo de diferentes alternativas, de manera muy sencilla, simplemente partiendo de la suposición de que a mayor susceptibilidad, mayor probabilidad de impacto negativo sobre la estabilidad. Si se pretende predecir el impacto que se originará por una determinada actividad, hay que definir escenarios a partir de los cuales sea posible considerar otros factores que intervienen en el riesgo debido a estos procesos. Tales escenarios deben ser formulados a partir del conocimiento del proceso y sus consecuencias en el pasado reciente.

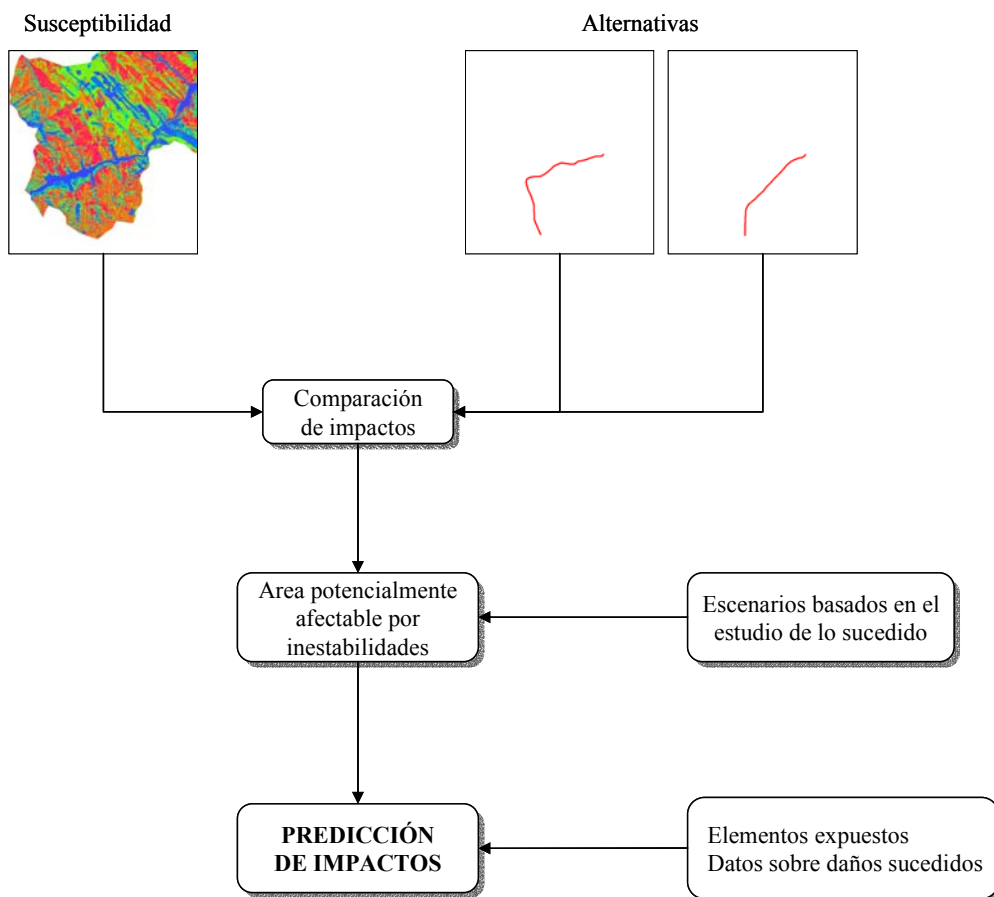


Figura 6.54. Diagrama de flujo metodológico para la evaluación y predicción de impactos.

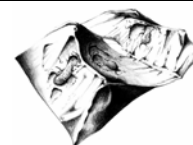
El impacto relativo entre distintas alternativas puede ser fácilmente valorado a través de una operación de cruce entre el mapa de susceptibilidad y los de los respectivos trazados, siendo la mejor alternativa la que interseca un menor número de celdas de alta inestabilidad (o susceptibilidad), tal y como muestra la Tabla 6.20a y b.

Tabla 6.20a. Datos obtenidos a partir del cruce del mapa de susceptibilidad y de la alternativa 1.

INTERSECCION altern./suscept.	ALTERNATIVE	CLASE SUSCEPT.	No. PIXELS	ÁREA	SUSCEPT x ÁREA
alternative1*1	alternative1	1	8	800	800
alternative1*2	alternative1	2	4	400	800
alternative1*3	alternative1	3	1	100	300
...	...	...	...	...	...
alternative1*196	alternative1	196	3	300	58800
alternative1*197	alternative1	197	10	1000	197000
alternative1*198	alternative1	198	8	800	158400
alternative1*199	alternative1	199	1	100	19900
alternative1*200	alternative1	200	5	500	100000
TOTAL			2757	275700	12096900

Tabla 6.20b. Datos obtenidos a partir del cruce del mapa de susceptibilidad y de la alternativa 2.

INTERSECCION altern./suscept.	ALTERNATIVA	CLASES SUSCEPT.	No. PIXELS	ÁREA	SUSCEPT. x ÁREA
alternative2*1	alternative2	1	1	800	100
alternative2*2	alternative2	2	2	200	400
alternative2*3	alternative2	3	2	200	600
...	...	...	...	...	...
alternative2*196	alternative2	196	14	1400	274400
alternative2*197	alternative2	197	6	600	118200
alternative2*198	alternative2	198	5	500	99000
alternative2*199	alternative2	199	9	900	179100
alternative2*200	alternative2	200	2	200	40000
TOTAL			2058	205800	26497500



Para realizar la operación de cruce se ha considerado una banda de 25 m equivalente a la anchura de cada una de las trazas consideradas (presentadas aquí simplemente a efectos de ilustrar el proceso, sin que pretendan representar alternativas reales). El valor final es indicativo del impacto relativo; cuanto mayor sea este valor, mayor será el impacto. Es de destacar que la alternativa 2, a pesar de que intersecta a un menor número de pixels, tiene un valor relativo de impacto prácticamente dos veces superior, puesto que transcurre por lugares en los que la susceptibilidad es mayor.

La predicción de impacto es mucho más difícil y se ha llevado a cabo mediante un procedimiento basado en la definición de escenarios. Los escenarios considerados han sido los siguientes: a) todos los pixels con un cierto nivel de susceptibilidad experimentarán, dentro de un determinado periodo de tiempo, movimientos en masa como consecuencia de la actuación proyectada y el desplazamiento de la masa será similar a los máximos ocurridos durante el periodo de control (desde 1954); b) solamente un pequeño porcentaje de las celdas con mayor susceptibilidad experimentarán movimientos en el mismo periodo de tiempo y el área afectada por los mismos será equivalente a los menores ocurridos en el pasado reciente; c) el porcentaje de los pixels inestables durante el periodo proyectado y su desplazamiento, serán equivalentes a las medias obtenidas en los movimientos ocurridos en el periodo de control. El escenario “más probable” puede ser determinado a partir del valor predictivo derivado de la validación del modelo de susceptibilidad con clases temporales de deslizamientos. La Figura 6.44 muestra varias curvas de predicción resultantes de la comparación entre un modelo elaborado con los movimientos ocurridos entre 1950 y 1983 y los ocurridos 2, 10 y 25 años posteriores. A pesar de que existen algunas diferencias entre las curvas, la tasa de predicción es bastante similar y, en cualquier caso, todas ellas definen una banda que puede ser considerada como “banda de predicción media”. A partir de ésta, es posible deducir la proporción de deslizamientos futuros o el número de deslizamientos que ocurrirán por unidad de tiempo o que se puede esperar que ocurran en el área de estudio. Esto es lo mismo que

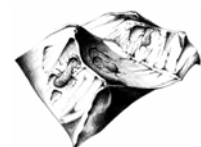


decir la probabilidad de ocurrencia basada en la frecuencia temporal, según se ha puesto de manifiesto anteriormente.

Los datos sobre daños causados por movimientos ocurridos en el pasado pueden ser utilizados para calcular las pérdidas potenciales para cada escenario. Nuevamente, esto puede hacerse a través de la consideración de nuevos escenarios (máximo, medio, mínimo daño causado por movimientos en el pasado) o mediante la intersección entre áreas afectables obtenidas a partir de los escenarios anteriormente descritos, y los elementos y su vulnerabilidad. Un procedimiento alternativo sería determinar los cambios habidos en la susceptibilidad como resultado de las modificaciones de los factores causales, generando un nuevo modelo cuantitativo de susceptibilidad, tal y como se ha procedido en el caso del modelo para la situación previa a la actuación.

La predicción del impacto para una determinada alternativa se ilustra en la Figura 6.55. En la figura sólo se representan los pixels con susceptibilidad superior a 190 (sobre un valor de 200) y, por tanto, los más susceptibles. Los tres escenarios descritos más arriba han sido aplicados para obtener tres posibles mapas de impacto. La intersección de estos mapas con un mapa de elementos expuestos, junto con datos acerca de los daños causados por movimientos en el pasado reciente, pueden ser utilizados para expresar el impacto en términos de “pérdidas potenciales”.

Con el procedimiento descrito, la comparación y predicción de impactos puede hacerse en términos cuantitativos. No obstante, debe señalarse que la susceptibilidad, aunque está directamente relacionada con la probabilidad, no debe considerarse como tal desde un punto de vista matemático, por lo que siempre es necesario definir escenarios de alguna forma. Por ello, el valor del impacto total obtenido (Tablas 6.20a y 6.20b) es un mero valor relativo, sin ningún tipo de unidades. De igual forma, las pérdidas potenciales tendrán sólo el significado de pérdidas promedio para un determinado periodo de tiempo, de acuerdo con el escenario utilizado. Los datos resultantes son útiles para comparar impactos sobre los procesos de ladera con otros tipos de



impactos, pero no deben ser interpretados como una predicción de las pérdidas monetarias. Las dificultades antes señaladas en relación con esta cuantificación son, evidentemente, también aplicables aquí.

La fiabilidad del procedimiento propuesto depende, obviamente, de la cantidad y calidad de los datos de que se disponga. No obstante, solamente con un MDT, un mapa de vegetación y un mapa litológico pueden obtenerse resultados aceptables. De todas formas, para definir escenarios realistas y para poder conocer las pérdidas potenciales, es necesario tener un buen conocimiento del proceso en el pasado reciente y, muy especialmente, datos sobre los daños causados.

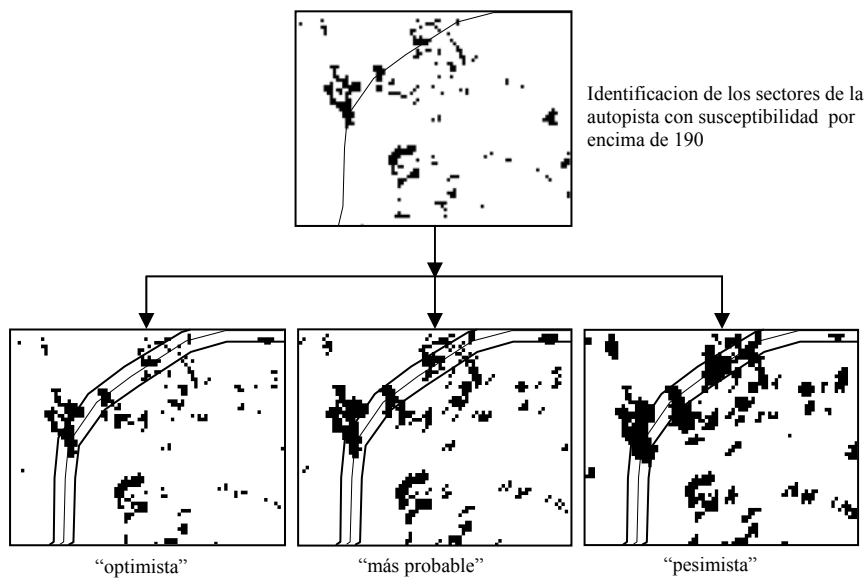


Figura 6.55. Mapas de predicción de impactos derivados de la aplicación de escenarios basados en el análisis histórico de la inestabilidad.

### 6.1.8 Recapitulación

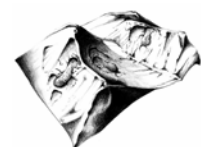
A modo de recapitulación de los puntos e ideas esenciales que se derivan del análisis de susceptibilidad, se estima conveniente presentar aquí un breve resumen, sin perjuicio de un tratamiento más completo y sistemático, en el apartado de conclusiones.

En primer lugar, y como comentario previo, señalar que la aplicación de estos procedimientos tiene unos costos relativamente bajos, incluso si se considera en éstos el esfuerzo de creación del banco de datos. Estos costos son sensiblemente inferiores a los de los métodos geomorfológicos tradicionales. Por otra parte, a diferencia de éstos, permiten multitud de análisis con modelos muy diferentes (y su correspondiente validación), así como la derivación de diversos mapas y modelos a partir de los iniciales.

Los costos de elaboración de los modelos y obtención de los resultados finales, incluyendo la formación del correspondiente banco de datos, puede estimarse entre 10.000 y 30.000 pta/km<sup>2</sup>, con un nivel de detalle equivalente al 1:10.000. Es evidente que esto representa un costo mínimo comparado con los daños que pueden evitarse en el futuro, por medio de la incorporación de este tipo de documento a esquemas preventivos de ordenación territorial.

Según se ha ido poniendo de manifiesto en los apartados precedentes las técnicas de análisis aplicadas, tanto basadas en el análisis discriminante como en funciones de favorabilidad, permiten hacer una evaluación de las variables consideradas, que facilita la selección de aquéllas que resultan verdaderamente significativas para el análisis de susceptibilidad, y la definición del modelo más conveniente a aplicar en cada caso.

Las diferentes técnicas y funciones utilizadas proporcionan resultados bastante similares y con un grado de precisión que puede variar bastante de unas zonas a otras, en función de las características de éstas. En cualquier caso, los resultados son bastante



satisfactorios, claramente mejores que los obtenidos por medio de métodos heurísticos tradicionales.

La validación es una parte intrínseca y esencial de los procedimientos propuestos y permite establecer de manera cuantitativa la capacidad predictiva de los modelos. El resultado final de la aplicación de estos modelos puede plasmarse en mapas de probabilidad espacial (susceptibilidad) o de probabilidad espacio-temporal.

La calidad de los resultados obtenidos por medio de los distintos modelos está determinada en parte por la disponibilidad de información sobre todas las variables intervinientes y en parte por la precisión y calidad de los mapas/datos para cada variable individual. La mejora en la precisión de éstas puede mejorar de manera perceptible los resultados obtenidos pero, en cualquier caso, no puede representar una limitación determinante para la aplicabilidad de los modelos.

Se pueden obtener buenos resultados con un modelo que combine solamente variables derivadas del MDE o, deseablemente, además con litología y vegetación. Para el inventario de deslizamientos que permita tanto el análisis como la validación del modelo, puede ser suficiente la fotointerpretación de un único vuelo. Estas pueden considerarse las condiciones aceptables para aplicaciones rutinarias del método, correspondientes a la fase de desarrollo y uso generalizado.

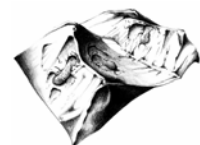
Los modelos estadísticos desarrollados para la obtención de mapas de susceptibilidad pueden aplicarse para la resolución de diferentes tipos de problemas relacionados, como por ejemplo la elaboración de mapas de amenazas y de riesgo o para la evaluación de impactos ambientales.

En el proceso de modelización, análisis y validación seguido, ha sido de especial utilidad el establecimiento de grupos temporales de deslizamientos que han permitido tener diferentes poblaciones de movimientos, las cuales han servido para realizar diferentes tipos de validaciones, tanto prospectivas como retrospectivas. Este tipo de

análisis detallado de la evolución temporal del comportamiento del territorio en relación con el proceso analizado, resulta crucial para la modelización y la validación, así como para el planteamiento de escenarios que sirvan para posteriores aplicaciones; igualmente permite profundizar en el conocimiento del proceso.

La posibilidad de llevar a cabo validaciones con conjuntos de muestras de diferentes periodos ha permitido demostrar la limitada importancia que los errores en la cartografía de movimientos tienen en la calidad de los modelos.

La cartografía de conjuntos temporales de deslizamientos es también enormemente útil para profundizar en el conocimiento del comportamiento y evolución geomorfológica de la zona, a escala temporal corta, y de la posible influencia humana sobre los procesos que determinan dicha evolución. Este aspecto se aborda en el apartado siguiente.



## **6.2. Características geomorfológicas de los movimientos y evolución del relieve**

En este apartado se aborda el análisis de los movimientos de ladera desde el punto de vista geomorfológico, para tratar de establecer las condiciones en las cuales se producen, los factores que determinan su ocurrencia, su dinámica y los efectos que ocasionan. También se trata de establecer las tasas de los procesos de deslizamiento y, a partir de ellas, el papel que dichos procesos juegan en la evolución del relieve, así como las implicaciones que la influencia humana ha podido tener en los mismos.

### **6.2.1 Factores condicionantes**

Según se ha comentado anteriormente, la mayor parte de los movimientos existentes afectan al regolito, sobre todo de alteración. Esto hace que exista una dependencia bastante marcada entre frecuencia espacial de deslizamientos y tipos litológicos. Así, entre los 26 tipos litológicos que se han diferenciado, destacan como especialmente susceptibles los distintos tipos de flysch y las margas. Por el contrario, los deslizamientos son muy escasos o inexistentes sobre las calizas masivas o las coladas volcánicas.

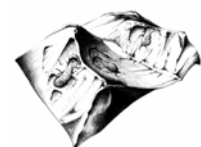
Los movimientos se producen normalmente a lo largo del contacto entre la capa meteorizada y la roca del substrato. Ese contacto no sobrepasa prácticamente nunca los 3 m de profundidad. La meteorización, que se manifiesta claramente por un color ocre que contrasta con el gris de la roca inalterada, se produce con mucha rapidez, como se ha podido constatar durante el del trabajo de campo. En numerosas ocasiones se ha observado que la meteorización ha afectado a espesores de más de 0,5 m en un lapso de 3-4 años, lo que significa que el proceso de neoformación de “material deslizable” es bastante rápido.

Otro factor que condiciona fuertemente la aparición de deslizamientos es, obviamente, la pendiente, y también la morfología de la ladera. La gran mayoría de los deslizamientos observados se produce con pendientes entre  $20^\circ$  y  $35^\circ$ , especialmente en zonas cóncavas (que facilitan la concentración de agua y su consiguiente incorporación al regolito). El contexto geomorfológico en el que ocurren suele corresponder a las zonas de cabecera de los pequeños arroyos, en los que no existen canales definidos (Figura 6.56); los deslizamientos aparecen inicialmente en las partes más centrales de la cabecera y progresan ladera arriba hasta alcanzar la divisoria, que de esta forma se va rebajando paulatinamente (Figura 6.57). Este proceso de retrogresión es bastante rápido, habiéndose observado retrocesos de las cabeceras de algunos deslizamientos de hasta 100 m en unos 40 años.

El avance de estas cabeceras va acompañado de la formación de cauces incipientes que van dando lugar a la formación de nuevos valles. La erosión remontante de estas cabeceras ha producido diversas capturas, fácilmente observables en las fotografías aéreas o en el campo.

También debe señalarse que la mayoría de los deslizamientos se producen a altitudes relativamente bajas, siendo escasísimos los que aparecen por encima de los 600 m. Esto se debe a que esas cotas corresponden en general a relieves formados por rocas competentes, fundamentalmente calizas masivas. Adicionalmente, el grado de cobertura arbórea es también superior en las cotas altas, lo que dificulta la aparición de estos movimientos. Por el contrario, en cotas inferiores a 400 m predominan las praderías, en las cuales se producen con mayor facilidad los deslizamientos.

La influencia de la vegetación en la ocurrencia de deslizamientos superficiales es bien conocida y se pone de manifiesto al analizar la distribución de los movimientos en la zona. Una elevada proporción de los deslizamientos inventariados ( $>80\%$ ) corresponde a laderas cubiertas de prados, cultivos o pastizales, siendo muy escasos los



que aparecen en zonas arboladas. No obstante, este dato ha de tomarse con precaución; las condiciones de observación en zonas arboladas son muy deficientes, tanto sobre fotografías aéreas como sobre el terreno, especialmente para el caso de pequeños deslizamientos, que son mayoría en el área de estudio. Es posible, por tanto, que la frecuencia real de los movimientos en superficies arboladas sea mayor de lo que se desprende de los inventarios realizados, aunque no parece probable que la diferencia sea muy grande, ya que ese tipo de zonas se ha comprobado en el campo con especial detalle.

La orientación predominante de las laderas sujetas a deslizamientos es O y NO, lo cual está relacionado con la dirección preferente de los vientos que aportan precipitaciones a la zona. No obstante, si se consideran las cifras absolutas, el mayor número de movimientos aparece sobre laderas con orientaciones NNE y SSO y, en menor medida, ONO y ESE. Esto es así porque la dirección de las estructuras geológicas es ONO-ESE y porque la red fluvial es aproximadamente perpendicular o paralela a las mismas, lo que hace que esas orientaciones sean las más frecuentes en las laderas de la zona.

Se tiene así, que el “perfil tipo” de los deslizamientos superficiales en el área del Bajo Deva corresponde a: zona de cabecera sobre formaciones flysch, con pendiente entre 20° y 30°, altitud inferior a 300 m, vegetación herbácea y orientación NO.

### **6.2.2. Tipología y dinámica de los movimientos en masa**

Los tipos de movimientos en masa existentes en el valle del Bajo Deva se han identificado a partir del inventario que se resume en las Tablas 6.1 y 6.3, que incluyen un total de 808 movimientos.

Los movimientos presentes en la zona corresponden a modelos cinemáticos bastante distintos, si bien en su gran mayoría se trata de deslizamientos superficiales. En





Figura 6.56. Deslizamientos superficiales ocurridos durante el año 2000 en la cabecera de un pequeño arroyo; su desarrollo es posterior a la tala del bosque que había en esta misma ladera.

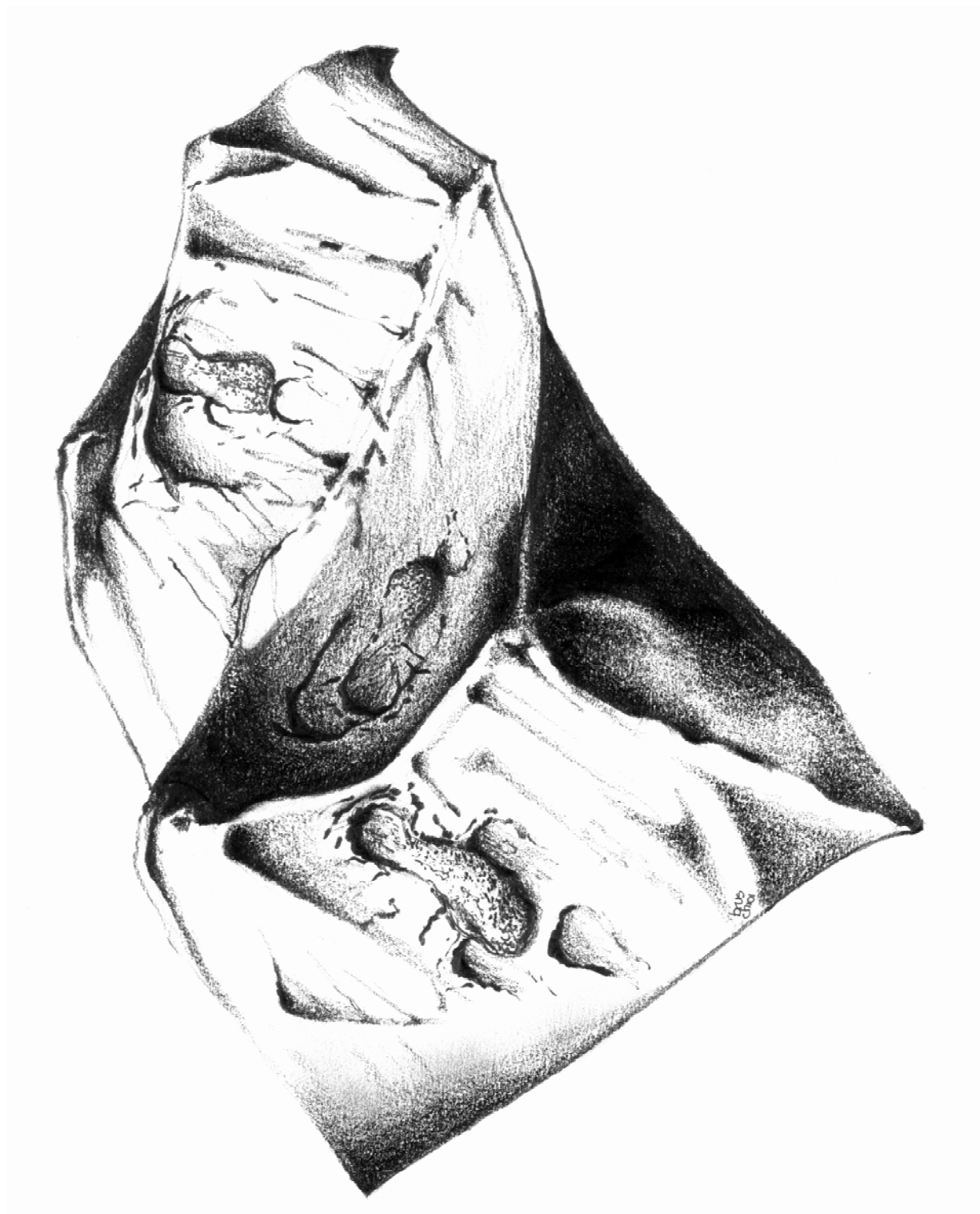
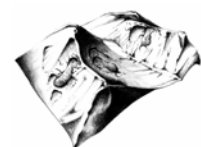


Figura 6.57. Esquema ilustrativo de la evolución de las laderas.

concreto, el 77,7% de los movimientos son de tipo superficial, mientras que sólo el 22,3% afectan a la roca del substrato. El 95% son deslizamientos y el resto corresponden a otras tipologías como caídas, vuelcos y flujos. La mayoría de los deslizamientos son de tipo traslacional (88%) y sólo un 12% corresponden a deslizamientos rotacionales. El perfil que caracteriza a los deslizamientos en la zona sería, por tanto: deslizamiento superficial traslacional, de tipo *debris slide*, que afecta al regolito de alteración. Este perfil corresponde al 70 % de los movimientos identificados. Si, además, tenemos en cuenta lo comentado en el epígrafe anterior, el perfil completo sería: deslizamiento superficial traslacional de tipo *debris slide* que afecta al regolito de alteración sobre formaciones flysch, en zonas de cabecera de pequeñas cuencas, con pendientes de 20° a 30°, con orientación NO, altitud inferior a 300 m y vegetación herbácea (Figura 6.58 y 6.59); ese deslizamiento da lugar en general a una regresión bastante rápida.

Los deslizamientos profundos están fuertemente controlados por la estructura y por cambios litológicos (Figura 6.60). Aparecen mayoritariamente en la costa, a lo largo del curso del río Deva y sus tributarios o asociados a vías de comunicación principales, generalmente desarrollados sobre materiales tipo flysch. Las escasas caídas y vuelcos (con sus correspondientes depósitos de derrubios) se desarrollan en acantilados, tanto en la costa como a lo largo del valle del Deva, asociados a calizas masivas. El resto de los movimientos en masa se producen fundamentalmente en el regolito de alteración, que es el responsable en gran medida de su aparición. La Figura 6.61 muestra la distribución espacial de los movimientos en masa identificados hasta 1991.

En conjunto, los movimientos de ladera representan un proceso muy activo en el valle del Deva, lo que revela una falta de equilibrio en el relieve con respecto a las condiciones (naturales y/o humanas) actualmente existentes y una rápida evolución del mismo. Esa actividad se manifiesta sobre todo en el número de movimientos, aunque la superficie afectada durante el periodo analizado, aproximadamente el 1 %, pueda parecer, a primera vista, no muy grande.



Según Moser y Hohensinn (1983), los deslizamientos superficiales se caracterizan por presentar relaciones entre espesor máximo en la zona de rotura y longitud máxima (D/L), inferiores a 0,1; el volumen movilizado suele oscilar entre algunas decenas y unos pocos miles de metros cúbicos. Los deslizamientos del Bajo Deva presentan una relación D/L promedio equivalente a 0,089 y su volumen medio es ligeramente inferior a 200 m<sup>3</sup> (Tabla 6.21).

En los deslizamientos superficiales se pueden distinguir dos partes: el área fuente o zona de ruptura y el área de transporte-deposición o zona de progresión (Hatano y Oyagi, 1977; Baeza, 1994). La zona de ruptura es la zona en la que se produce un déficit de masa por desplazamiento del material. La zona de progresión corresponde al área de acumulación del material y queda en muchas ocasiones solapada con la zona de ruptura. Gran parte de los deslizamientos superficiales existentes en el Bajo Deva se desarrollan sobre derrubios en condiciones de alta humedad, por lo que pierden la cohesión y dan lugar a depósitos de muy poco espesor que cubren un área extensa y que dejan de ser fácilmente reconocibles cuando se revegetan. La zona de rotura, por el contrario, es mucho más neta, con escarpes bien delimitados entre la misma y la ladera que permanece estable, aunque su parte inferior suele quedar cubierta por el depósito, siendo con frecuencia difícil de delimitar. En ocasiones los deslizamientos de derrubios derivan a flujos, cuando existe suficiente material disponible, abundante cantidad de agua y condiciones geométricas, ladera abajo de la rotura, adecuadas. Existe una gradación entre los deslizamientos traslacionales y los flujos, siendo difícil en muchas ocasiones determinar a cuál de los dos tipos pertenece un determinado movimiento.

En la Tabla 6.21 se resumen algunas de las características geométricas de los deslizamientos superficiales de la zona, establecidas a partir de la muestra de movimientos para la cual se ha obtenido la información correspondiente.





Figura 6.58. Deslizamiento de tipo *debris slide*. Los deslizamientos de estas características son los más comunes en el Bajo Deva.



Figura 6.59. Deslizamientos superficiales sobre derrubios.



Figura 6.60. Deslizamientos profundos (al fondo) cuyas superficies de rotura coinciden con el contacto entre flysch y margocalizas. A la izquierda de la imagen se observan deslizamientos superficiales.

**Figura. 6.61. Distribución de movimientos en masa**

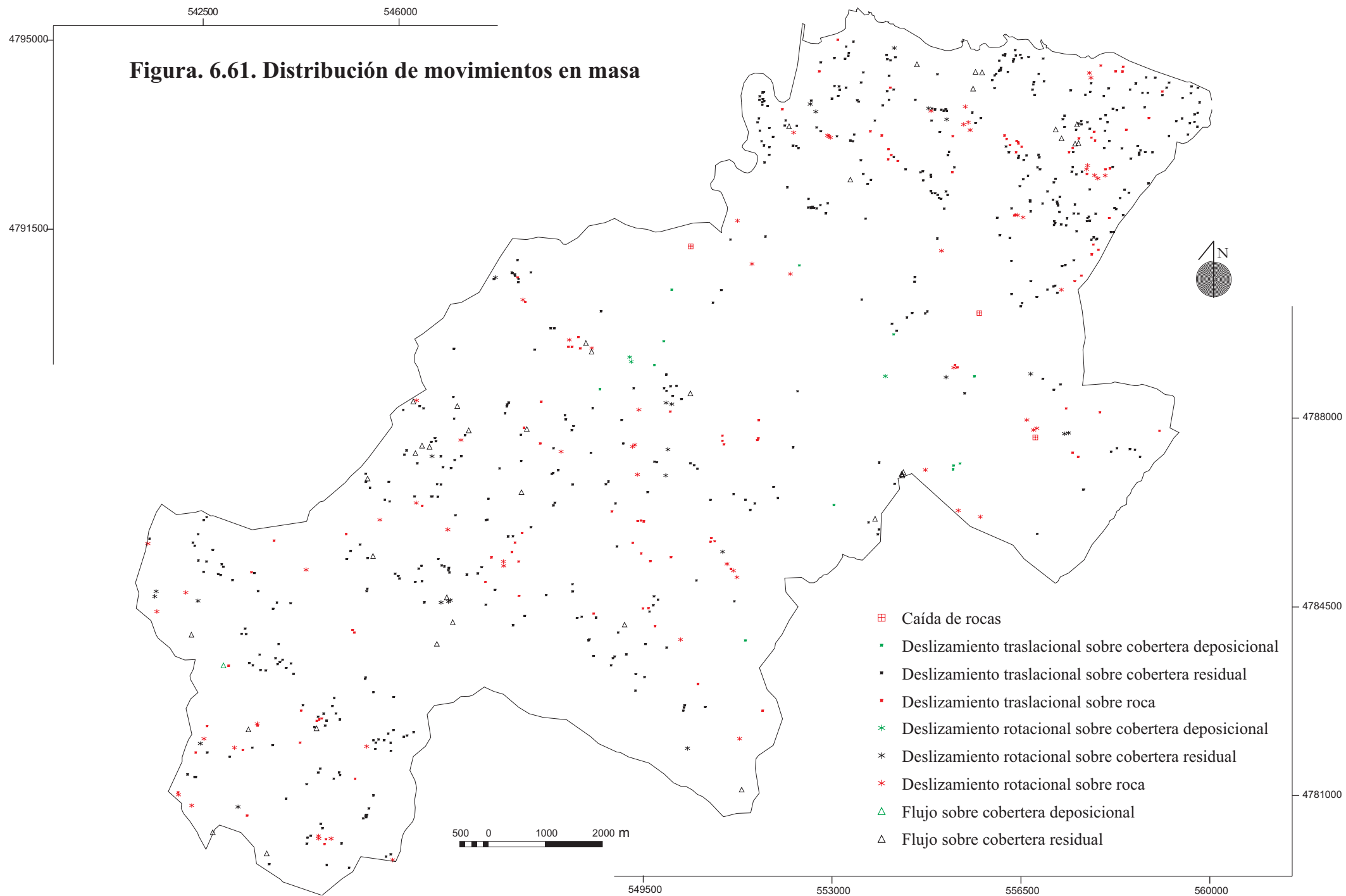




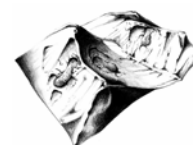


Tabla 6.21. Características geométricas de los deslizamientos superficiales del Bajo Deva.

	<b>Deslizamientos traslacionales superficiales</b>
Tamaño medio	508,7 m <sup>2</sup>
Tamaño medio de la super. de ruptura	158,7 m <sup>2</sup>
Espesor medio	1,2 m
Longitud media en el sentido del movimiento	28,6 m
Longitud media perpendicular al movimiento	23,5 m
Ángulo medio de la zona de ruptura	27,2 °
Volumen medio movilizado	190,5 m <sup>3</sup>

Estos deslizamientos superficiales suelen desplazarse a bastante velocidad, tal y como se ha documentado a través de entrevistas con la población local. Se trata de movimientos rápidos a extremadamente rápidos; es decir, se mueven a velocidades comprendidas entre 1 m/hora y 5 m/s (WP/WLI, 1994; en Dikau et al., 1996). Una evidencia que ilustra muy bien la velocidad de los movimientos es el temor que los ganaderos sienten por sus animales cuando las condiciones hidrológicas hacen que comiencen a producirse deslizamientos. Sin embargo, los volúmenes afectados suelen ser limitados. En términos cinemáticos se puede decir que la energía promedio liberada por estos movimientos es de unos 250.000 Julios.

Como consecuencia de la pequeña magnitud de los deslizamientos, los efectos de cada deslizamiento individual son, por lo general, escasos, si bien los efectos acumulativos pueden ser importantes. Se han registrado tres casas afectadas, pero sólo ligeramente. Las infraestructuras lineales (carreteras y caminos) se han visto afectadas por 31 movimientos. La autopista, por el contrario, y a pesar de los grandes taludes asociados,



prácticamente nunca se ha visto afectada por deslizamientos superficiales (3 casos registrados), debido a las grandes obras de estabilización y protección llevadas a cabo. La mayor parte de los daños han consistido en la destrucción de cultivos (19), de árboles frutales (43) o de repoblación (17), en la rotura de pequeños caminos (22 casos), muros (6), setos (3) y conducciones de agua (5 sucesos). En los demás casos no se tiene constancia de daños materiales, lo cual, evidentemente, no asegura que no se hayan producido. Una evidencia del problema en el área es la preocupación por parte de las autoridades locales y regionales en relación con este proceso, que se ha manifestado en campañas para promover la plantación de coníferas en zonas dedicadas a cultivos y árboles frutales situados en laderas inestables (Aramburu, José María; Diputación Foral de Guipúzcoa; comunicación personal). La importancia de los daños debidos a deslizamientos en las infraestructuras de esta zona ha sido puesta de manifiesto por del Val et al. (1996), quienes señalan la gran cantidad de muros, escolleras, gaviones y bulones existentes a lo largo de las márgenes de las vías de comunicación.

La mayoría de los deslizamientos estudiados corresponden a lo que podríamos denominar “eventos únicos”; dado que en general afectan al regolito y el depósito pierde la cohesión, una vez ocurridos no puede producirse una reactivación. No obstante, sí que se ha constatado, como ya se ha indicado, una tendencia al encadenamiento de movimientos.

### **6.2.3 Distribución espacial y temporal de los movimientos en masa**

El análisis de la distribución espacial y de la ocurrencia temporal de los movimientos puede aportar una información muy valiosa para interpretar la influencia de los distintos factores condicionantes y, sobre todo, desencadenantes de los mismos.

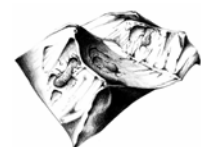
La relación existente entre la distribución espacial de los deslizamientos en el área de estudio y los diferentes factores condicionantes utilizados en el análisis se ha discutido

en apartados anteriores. En este apartado se examina esa distribución espacial para tratar de identificar la importancia de los factores desencadenantes, muy especialmente la influencia humana, en el desarrollo de este proceso.

Las Tablas 6.2, 6.4, 6.5 y 6.6 presentan la distribución de los movimientos en masa en los cuatro municipios estudiados. Las dos primeras tablas incluyen todos los movimientos para los periodos pre-1954 y 1954-91; la Tabla 6.5 contiene solamente deslizamientos superficiales para 1954-91 y la 6.6 el mismo tipo de movimientos, para 1991-97.

Según se aprecia en las tablas anteriores, el 84 % de los movimientos “de aspecto reciente” identificados hasta 1991 son posteriores a 1954. El 16 % restante tiene una edad incierta aunque, teniendo en cuenta el estado de conservación de sus rasgos morfológicos, es muy probable que la mayoría de ellos no tuviera más de una docena de años en 1954.

Esta diferencia en el número de movimientos refleja en parte un aumento en la frecuencia del proceso, a medida que se incrementa el grado de intervención humana sobre el territorio. Por otro lado, es evidente que muchos movimientos acaecidos con anterioridad a 1954, especialmente los de pequeñas dimensiones, han debido desaparecer como rasgos visibles del paisaje, por erosión, revegetación o por ambas. La diferencia en el tamaño medio de los deslizamientos (4.541 m<sup>2</sup> para los anteriores a 1954 y 1.032 m<sup>2</sup> para el periodo 1954-1991), corrobora esta interpretación. Por tanto, el número relativamente reducido de movimientos “antiguos” (entendiendo por tales todos los previos a 1954) refleja en parte una diferencia en el desarrollo del proceso y en parte una insuficiencia en el inventario, derivada de las limitaciones existentes para la observación de movimientos antiguos; no es posible, por el momento, conocer en qué medida influyen estos dos factores.



Esta interpretación se ve reforzada por el análisis de la importancia relativa de los movimientos superficiales y profundos. En el periodo anterior a 1954 se han identificado 36 movimientos que afectan al substrato y 96 de tipo superficial, mientras que en el periodo 1954-91, los números respectivos son 144 y 532. La explicación más razonable de esta diferencia es la señalada anteriormente; el incremento de la actividad humana se debe manifestar sobre todo en el aumento del número de deslizamientos superficiales, y también es de esperar que sean éstos los que desaparezcan más fácilmente con el tiempo.

Resulta también de interés analizar específicamente los datos relativos a los deslizamientos profundos. Como se deduce de la Tabla 6.3, la tasa promedio para la ocurrencia de estos movimientos en el periodo es de aproximadamente 4 por año. Suponiendo que esa tasa haya sido similar en el periodo anterior, tendríamos que los “deslizamientos profundos de aspecto reciente” inventariados para el mismo habrían ocurrido en unos 10 años. Si bien no se puede afirmar con seguridad que esto sea efectivamente así, una comparación entre el grado de conservación de los rasgos micromorfológicos que presentan estos movimientos en la actualidad y los que se observan en las fotografías aéreas de 1954, por un lado, y los rasgos micromorfológicos de movimientos similares más recientes y de edad conocida, pone de manifiesto que eso es muy probablemente cierto.

Aunque, como ya se ha indicado, el inventario de deslizamientos posteriores a 1997 solamente incluye datos de las superficies de rotura de los movimientos superficiales, las observaciones de campo realizadas han puesto de manifiesto que el número de movimientos profundos en el periodo 1991-1997 no supera los 25 en total, muchos de ellos (como en periodos anteriores) reactivaciones de movimientos más antiguos. Esto indica que la tasa anual de movimientos profundos parece haber permanecido aproximadamente constante a lo largo de los últimos 60 años.

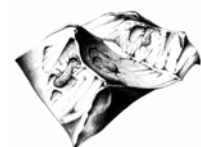
En lo que se refiere al número de deslizamientos superficiales, las tasas promedio que se obtienen para los periodos antes citados son de 14,4 movimientos/año para el

periodo 1954-91 y de 151 movimientos/año entre 1991 y 1997, esto es, un aumento de un orden de magnitud. Nuevamente, hay que tener presente que esta diferencia es consecuencia en parte de la probable desaparición de algunos movimientos antiguos, no incluidos por tanto en el inventario de 1954-91 y en parte de un aumento real en la frecuencia de estos procesos en tiempos recientes. También, como se ha comentado al describir las características de los inventarios, hay que tener presente que los datos anteriores a 1991 probablemente se deban aumentar un 30 % aproximadamente, para incluir los pequeños deslizamientos no observables en las fotografías aéreas. Evidentemente, esa corrección es poco significativa en comparación con las diferencias observadas. A pesar de que los datos para el periodo anterior a 1954 son más imprecisos, si admitimos que los movimientos superficiales de “aspecto reciente” identificados para el mismo no deben tener más de 10 años, nos encontramos con una tasa aproximada de 5 movimientos/año. Esto corrobora la interpretación antes avanzada.

La distribución de los movimientos por municipios revela las diferencias existentes en la constitución geológica de los mismos, así como el diferente tipo y grado de intervención humana sobre el territorio.

Según se aprecia en las Tablas 6.5 y 6.6, la mayor frecuencia relativa en la ocurrencia de deslizamientos superficiales se da en los municipios de Deva y Eibar. Estos municipios son los que presentan una mayor extensión de formaciones de tipo flysch (ver Anexo I: mapa litológico), en las que se producen con mayor facilidad movimientos superficiales, y también los que tienen mayor grado de intervención o modificación de los usos del territorio; en el caso de Deva esto se refleja, sobre todo, en la gran extensión ocupada por praderías y, en menor medida, cultivos.

La comparación con la distribución de intensidades de precipitación en el área de estudio (ver Anexo I: modelo digital de intensidades de precipitación) pone de manifiesto que los cuatro municipios son muy similares con respecto a la intensidad de



lluvia; lo mismo ocurre con las pendientes medias (Anexo I: modelo digital de pendientes). Esto permite descartar que las diferencias indicadas se deban a dichos factores. También se puede descartar, como se comenta más adelante, la actividad sísmica.

Con el fin de analizar con mayor detalle el desarrollo temporal de estos procesos, se ha llevado a cabo un análisis minucioso del municipio de Deva. Este análisis cubre los lapsos temporales que se muestran en la Tabla 6.7, establecidos a partir de los vuelos correspondientes a las fechas indicadas. El análisis se ha limitado a la fotointerpretación para la localización de las zonas de rotura de deslizamientos superficiales y no ha incluido la realización de reconocimientos de campo adicionales. Se trata, por tanto, de poblaciones comparables para todos los periodos considerados.

El análisis de la frecuencia de movimientos en el municipio de Deva, para los seis lapsos temporales analizados (más un lapso adicional con límite inferior indeterminado) confirma la idea apuntada a partir de los datos anteriores. Hay un aumento claro y acelerado de las frecuencias anuales para cada periodo, con la única excepción del correspondiente a 1983-85, durante el cual tuvieron lugar las fuertes lluvias de agosto de 1983-85, las más intensas durante el periodo analizado, que originaron numerosísimos deslizamientos en toda la cornisa cantábrica.

#### **6.2.4 Factores desencadenantes**

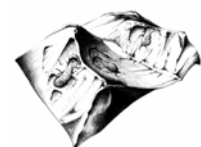
Naturalmente, es muy difícil, por no decir imposible, establecer el agente causal directo de la gran mayoría de los deslizamientos inventariados, especialmente si se tiene en cuenta que su número total se acerca a los tres millares, distribuidos en 140 km<sup>2</sup> y ocurridos a lo largo de unos 50 años. Los datos recogidos en el campo (Tablas 6.2 y 6.4) indican que en aproximadamente el 40 % de la superficie afectada por deslizamientos se han apreciado algunos indicios de influencia humana directa o indirecta. Esa influencia deriva de actividades tales como cambios en la cobertera

vegetal, modificaciones hidrológicas, cambios de pendiente, etc. No obstante, solamente en el 7 % de los casos esa influencia se puede considerar como directa y claramente establecida. Los datos antes presentados sugieren que la influencia humana indirecta debe ser bastante más importante de los que se aprecia a partir de las observaciones de campo realizadas.

Los factores desencadenantes de los movimientos de ladera son bien conocidos (Terzaghi, 1950; Varnes, 1978; Jahns, 1978; Palmquist y Bible, 1980; Costa y Baker, 1981; Hansen, 1984b; Hutchinson, 1988, 1995; Alexander, 1993); aparte de la intervención humana, incluyen las precipitaciones, la sismicidad y los socavamientos erosivos.

En la zona de estudio los socavamientos erosivos juegan claramente un importante papel desencadenante en algunos grandes deslizamientos de la costa, en el municipio de Deva. En el interior se han observado unos pocos casos en los cuales el socavamiento basal, producido por el río Deva o por alguno de sus tributarios, han originado deslizamientos; de éstos aproximadamente una docena han ocurrido en el periodo analizado (a partir de 1954). Por tanto, se puede decir que este agente tiene un significado prácticamente anecdótico como causa directa de movimientos de ladera en el área de estudio. Evidentemente, el proceso general de encajamiento de los valles tiende a crear las condiciones geomorfológicas que propician la aparición de deslizamientos en las laderas.

La actividad sísmica puede considerarse, *a priori* como un factor desencadenante más probable, dado que la zona de Guipúzcoa es la que presenta una sismicidad más elevada en toda la cornisa cantábrica (Martín, 1984; en Díaz de Terán et al., 1997). No obstante, un análisis más detallado de los datos existentes pone de manifiesto que esto no ha debido ser así, al menos durante el periodo analizado.



Según se desprende del Estudio Sismológico del País Vasco (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1986), el área de estudio carece de actividad sísmica significativa durante la época instrumental (a partir de 1907). El comportamiento de la zona, por tanto, se puede considerar estable.

En el periodo comprendido entre 1847 (evento más antiguo datado) y 1984 se han inventariado en el País Vasco 106 terremotos; de éstos, 14 corresponden a la época histórica y 92, de magnitud mayor o igual a 2, corresponden a la época instrumental. Los terremotos se localizan fundamentalmente en la mitad oriental del País Vasco, hasta el punto de que no aparece ningún registro instrumental en su mitad oeste. El área de estudio se localiza aproximadamente en el límite entre ambas. La mayor concentración de seísmos coincide *grosso modo* con el curso del río Oria y corresponde, con toda probabilidad, con una discreta actividad tectónica del desgarre profundo que sigue su misma dirección y condiciona el desplazamiento de la falla de Leiza. Esta falla es la probable continuación de la falla Norpirenaica (Aller y Zeyen, 1994).

Mientras en el Pirineo Navarro se han detectado una serie de terremotos de foco profundo (55-60 km), típicamente pirenaicos, en el País Vasco la profundidad hipocentral suele ser inferior a 10 km, siendo muy raros los que se sitúan entre 10 y 30 km (sólo 9). Por consiguiente, la sismicidad de la zona es epidérmica y de baja actividad (Mezcua y Martínez, 1983), asociada a reajustes tectónicos del basamento que soporta la potente serie sedimentaria mesozoica. Las magnitudes son coherentes con este planteamiento, ya que sólo en 4 ocasiones se ha superado el grado 4.

El riesgo sísmico de la zona de estudio, situada al oeste de Guipúzcoa, puede considerarse casi nulo. Así, en el Estudio Sismológico del País Vasco, se recomienda no instalar una red sísmica local, ni siquiera con carácter temporal, puesto que no se consideró preciso acotar el fenómeno con mayor precisión. En la zonificación de riesgo sísmico de Martín (1984), el área de estudio se sitúa dentro de la zona de isomáximas sentidas de grado V-VI.

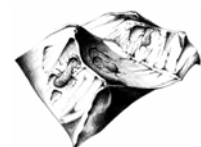


Keefter (1984) señala que un terremoto con magnitud de 4 en la escala de Richter probablemente no generaría deslizamientos. También sugiere que las caídas de rocas, los deslizamientos de rocas y los deslizamientos de suelos se desencadenan con los terremotos más débiles, mientras que los grandes flujos de tierras y las expansiones laterales son resultados de terremotos más grandes. Keefter y Wilson (1989) en un estudio de más de 40 terremotos históricos, encontraron que los deslizamientos traslacionales de tierras son, junto a las caídas de rocas y los deslizamientos traslacionales de rocas, el tipo más frecuente. En el mismo trabajo se menciona que el área afectada por deslizamientos desencadenados por seísmos es insignificante para magnitudes inferiores a 4,0. Los efectos de los eventos de magnitud 4 se producen sólo a algunos centenares de metros del epicentro, mientras que para que los efectos se constaten a 10 km del epicentro, la magnitud debe ser superior a 5,0.

Cotecchia (1978) encontró una fuerte asociación entre neotectónica, terremotos e inestabilidad de laderas. Es importante señalar la diferencia que existe entre roturas directamente relacionadas con eventos sísmicos y aquellas roturas relacionadas indirectamente. Éstas últimas se deben a las variaciones hidrostáticas inducidas por los terremotos y generalmente se producen reactivando superficies de deslizamientos previos en arcillas (Hutchinson, 1987). Los deslizamientos directamente relacionados suelen ocurrir en un entorno de aproximadamente la mitad de la longitud de onda del evento sísmico (Hutchinson, 1987).

Bolton (1975) encuentra que los movimientos ocurridos en terrenos arcillosos se producen siempre con eventos de magnitudes superiores a 5,5 pudiendo llegar la distancia epicentral a cientos de km. El principal mecanismo es la licuefacción de materiales granulares o arcillas blandas, bien en forma masiva, bien en niveles o lentejones interestratificados. Un nivel freático alto facilita este proceso.

No se tiene constancia de ningún deslizamiento que haya podido originarse en la zona como consecuencia de alguna sacudida sísmica. A pesar de las numerosas entrevistas



mantenidas con los habitantes de la zona durante los recorridos de campo y de las consultas efectuadas a técnicos de la Diputación Foral, no se ha obtenido referencia alguna de la ocurrencia de tal evento, al menos en los últimos 60 años.

Aunque esto permite afirmar que la actividad sísmica no puede considerarse en la zona un factor desencadenante significativo, no debe interpretarse en el sentido de descartarlo de forma total y absoluta. En una zona que presenta un menor nivel de riesgo sísmico, como el valle del Pas, en Cantabria (González, 1995), se ha identificado al menos un deslizamiento ocurrido en 1932 con motivo de un leve terremoto. En la misma zona, un análisis de la tipología, cronología y distribución espacial de los deslizamientos en relación con fallas de actividad neotectónica conocida, ha permitido identificar un episodio, hacia 5000-5600 BP, en el cual se produjeron numerosos deslizamientos muy probablemente desencadenados en gran parte por movimientos sísmicos. Por tanto, aunque para el periodo de estudio aquí considerado no haya evidencias de eventos de este tipo en el valle del Deva, no es descartable que hayan ocurrido en periodos anteriores o que puedan ocurrir en el futuro.

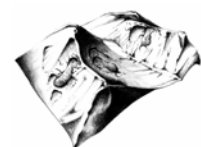
Los mayores seísmos registrados en la zona en la época instrumental son uno de 1985 de magnitud 3,2 e intensidad 3, epicentro en Eibar e hipocentro a 6 km de profundidad y otro con epicentro en la costa entre Deva y Zumaya, con magnitud ligeramente inferior a 3. Ninguno de los dos produjo deslizamientos. Ha habido otros dos eventos, de magnitud entre 4 y 5 pero con epicentros a 11 y 15 km de la zona de estudio, que tampoco desencadenaron ningún movimiento de ladera.

Merece la pena señalar que los años con mayor actividad sísmica (en el número de seísmos pero no los de mayor magnitud) fueron 1982 y 1983, con 45 y 13 eventos respectivamente. Estos años, especialmente el segundo, corresponden también a años con muchos episodios de precipitaciones intensas, por lo que la posible (aunque poco probable) influencia de dicha actividad quedaría enmascarada.

Las precipitaciones son, por lo tanto, el único factor desencadenante natural que puede considerarse significativo para la práctica totalidad de los movimientos inventariados.

Existen datos que ponen claramente de manifiesto la importancia de las precipitaciones intensas como agente desencadenante de deslizamientos, especialmente superficiales, en la zona del Bajo Deva. En concreto, las intensas lluvias de agosto de 1983 (113 y 128 mm, los días 25 y 26, respectivamente, medidos en Eibar; Tamés et al., 1986) y de julio de 1988 (70 mm/24h; Duque et al., 1991), así como las de octubre y diciembre de 1992 (140 mm/24h y 130 mm/24h respectivamente, en Lastur, Deva; Diputación Foral de Guipúzcoa, 1999), desencadenaron un alto número de movimientos. Aunque, como es lógico, no se puede determinar el número total de los deslizamientos producidos por esos cuatro eventos, no es arriesgado decir que muy probablemente alcance el 40 % de los acaecidos entre 1954 y 1997. Los mejores datos existentes al respecto son los relativos a las precipitaciones de 1983 y 1988. La Tabla 6.7 muestra el alto número de deslizamientos ocurridos en el municipio de Deva en el periodo 1983-1985, que abarca el 4,6 % del periodo analizado pero incluye el 17,5 % del total de los movimientos inventariados durante el mismo. Por otra parte, a raíz de las tormentas de julio de 1988 se identificaron en los municipios de la zona de estudio y en el de Motrico un altísimo número de nuevos deslizamientos (Duque et al., 1991) que se utilizaron para tratar de validar los mapas de peligrosidad anteriormente elaborados (Tamés et al., 1986; Cendrero et al., 1987c).

Ahora bien, el análisis de la distribución temporal de los deslizamientos en el municipio de Deva (Tabla 6.7) muestra una clara tendencia al aumento de la frecuencia con el tiempo, especialmente marcada durante los años 90 (con la salvedad del evento excepcional de 1983 antes citado). Ese aumento en la frecuencia de los deslizamientos superficiales no parece mostrar relación con la evolución de las precipitaciones, tanto si se consideran las lluvias anuales totales (Figura 6.62), como la frecuencia de días con lluvias de intensidad superior a un determinado valor.



Se han examinado las posibles relaciones entre la distribución temporal de precipitaciones y la frecuencia de deslizamientos (esa frecuencia se expresa en las gráficas como “tasas de movilización”, en mm/año; más adelante se trata este aspecto con más detalle). Para ello se han contrastado las precipitaciones anuales totales (Figura 6.62) y el número de eventos con precipitaciones superiores a 50, 75 y 100 mm (Figuras 6.63, 6.64 y 6.65). En el primer caso, aunque la tendencia general que se observa cuando se realiza un ajuste lineal es un cierto aumento (Figura 6.62), es evidente, tanto a partir de la gráfica bruta como del ajuste polinómico, que la tendencia en los últimos 20 años es decreciente, coincidiendo precisamente con el periodo de mayor aumento de las tasas de movilización (frecuencia de movimientos).

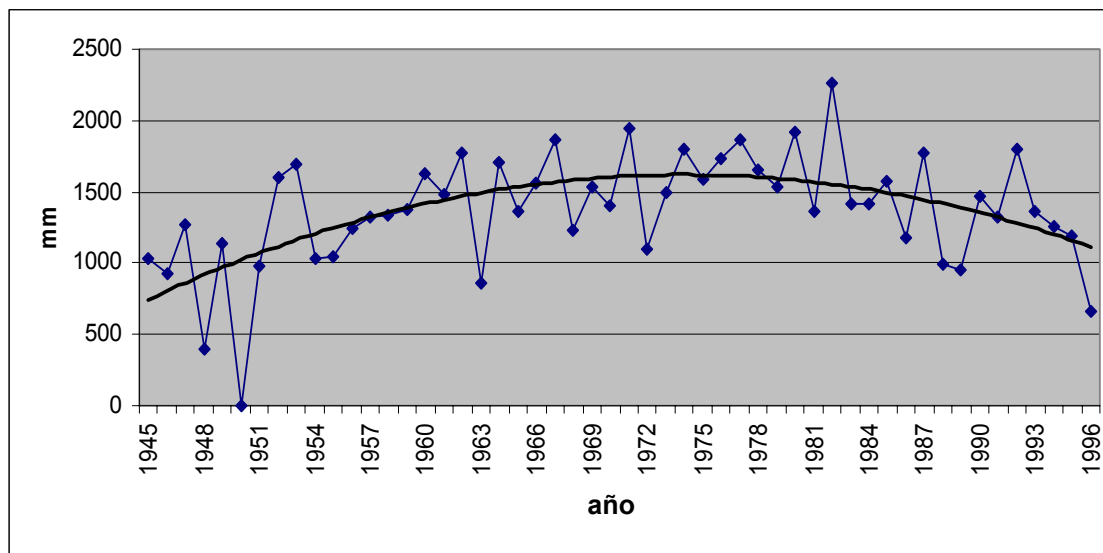


Figura 6.62. Precipitaciones totales anuales registradas en el observatorio de Eibar.

Una tendencia *grosso modo* similar es la que se observa en la frecuencia de días precipitación total  $\geq 50$  mm (Figura 6.63); hay una levísima tendencia general al aumento de las mismas, pero una disminución en las últimas dos décadas.

La distribución de eventos con precipitaciones  $\geq 75$  mm (Figura 6.64) es la que guarda un mayor paralelismo con la variación en la tasa de movilización, con una clara tendencia al aumento desde mitad de la década de los setenta. Si bien hay también una

fuerte disminución al final del periodo; precisamente el que muestra un mayor aumento de las tasas (con excepción del evento singular de 1983).

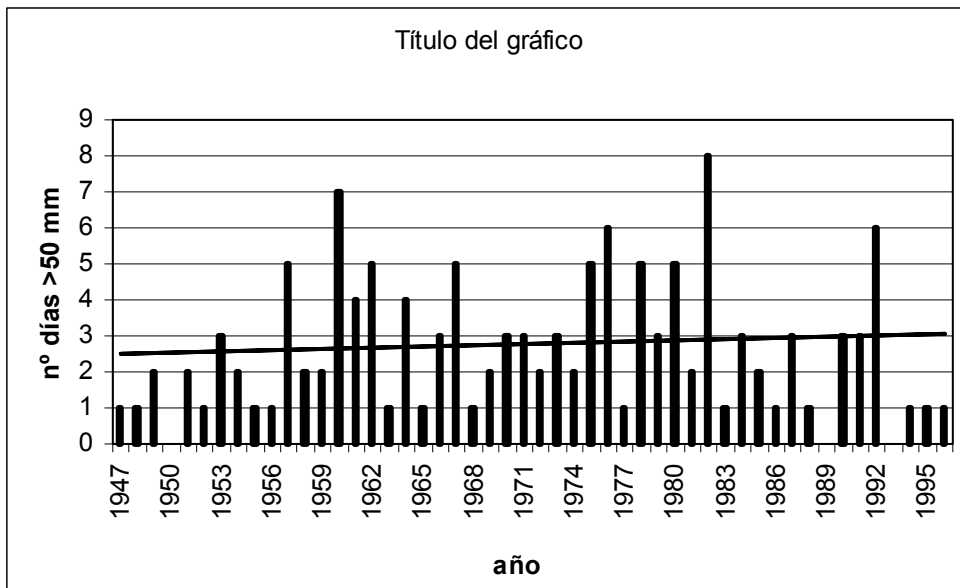


Figura 6.63. Número de días anuales con precipitaciones totales diarias iguales o superiores a 50 mm.

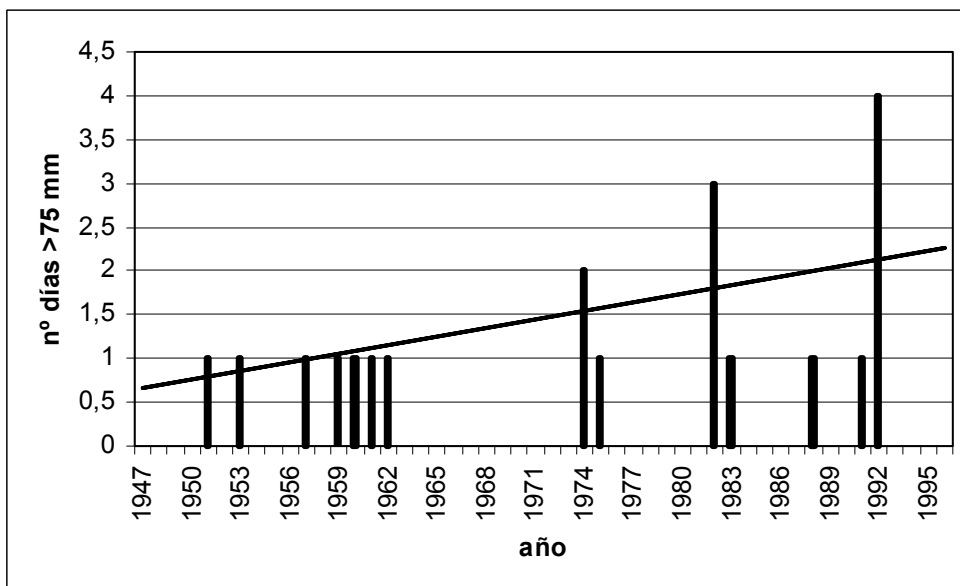
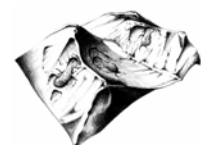


Figura 6.64. Número de días anuales con precipitaciones totales diarias iguales o superiores a 75 mm.



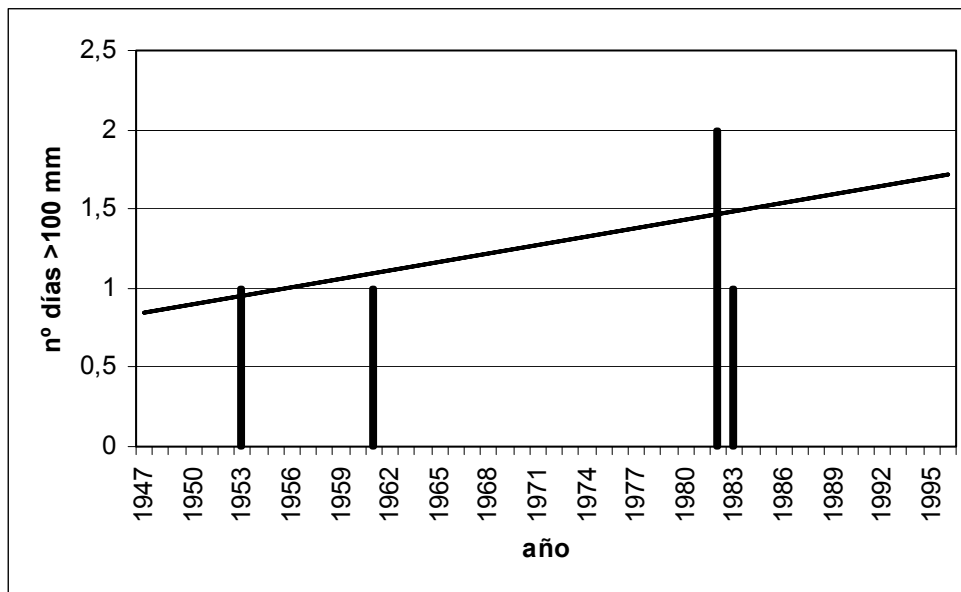


Figura 6.65. Número de días anuales con precipitaciones totales diarias iguales o superiores a 100 mm.

Finalmente, los días con precipitaciones superiores a 100 mm (Figura 6.65) son claramente muy escasos y no guardan relación con la variación de las tasas de movilización.

También se ha analizado la frecuencia de las tormentas en la región (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1999), entendiendo por tales los eventos que presentan algunas de las siguientes características: intensidad de lluvia  $\geq 60$  mm/h, durante 10 minutos;  $\geq 40$  mm/h, en 20 minutos;  $\geq 30$  mm/h, en 30 minutos;  $\geq 20$  mm/h, en 60 minutos;  $\geq 15$  mm/h, en 120 minutos; o en conjunto  $\geq 30$  mm/h para el total de la tormenta. En el citado trabajo se presenta un análisis detallado de la distribución de las tormentas a lo largo de los últimos 100 años (y sobre todo de los últimos 20 años) y se llega a la conclusión de que hay una casi imperceptible tendencia al aumento de la intensidad de las mismas, equivalente a 2 mm/h en un siglo, si bien dicha tendencia no es clara, pues podría deberse simplemente a la mejora de los procedimientos y equipos de medida (op. cit., p. 25). Esa levísima tendencia al aumento de la intensidad de las tormentas, no explica los aumentos señalados en la ocurrencia de deslizamientos.

También se ha examinado la frecuencia de los eventos tormentosos durante todo el periodo analizado, a partir de los datos de la estación de Monte Igueldo (San Sebastián) y de las estaciones de Lastur y Mendaro (en y junto al municipio de Deva, respectivamente), si bien para éstas últimas sólo se dispone de información a partir de mediados de los 80 (Figuras 6.66 y 6.67). La primera gráfica muestra una leve tendencia al crecimiento durante el periodo analizado, con una serie de ciclos de 10-15 años de duración. En lo que se refiere a Mendaro y Lastur, ambas muestran la misma ciclicidad (en la medida que es perceptible a partir de los datos existentes), así como una cierta tendencia al aumento en los aproximadamente 11 años cubiertos (8 en el caso de Mendaro). Los valores obtenidos para promedio de eventos tormentosos por año para los periodos analizados, en relación con la frecuencia de deslizamientos son 19 (1991-93) y 17,2 (1993-97) para las dos estaciones en conjunto y 4,8 (1985-91), 9,5 (1991-93), 8,2 (1993-97) para Lastur. Mendaro no presenta variaciones en los promedios para los periodos que cubre.

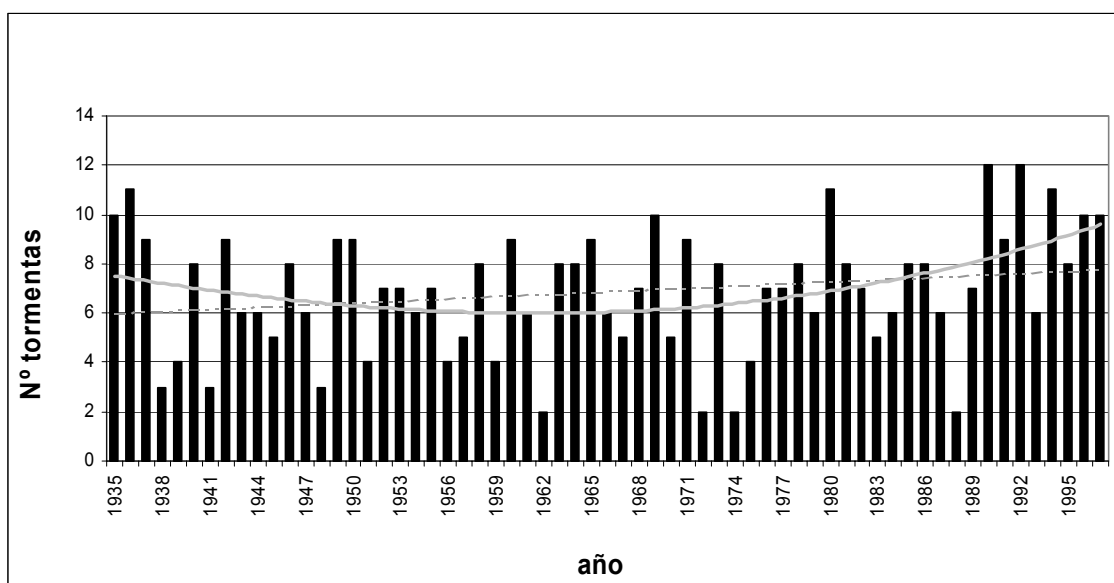
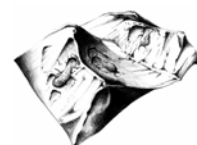


Figura 6.66. Número de tormentas anuales registradas en el observatorio de Monte Igueldo.

Esto es, al igual que en el caso de los días con precipitaciones  $\geq 75$  mm, hay una posible tendencia general al aumento de la frecuencia, si bien en la última década dicha



tendencia es a la disminución, lo contrario de lo que ocurre con la frecuencia de deslizamientos.

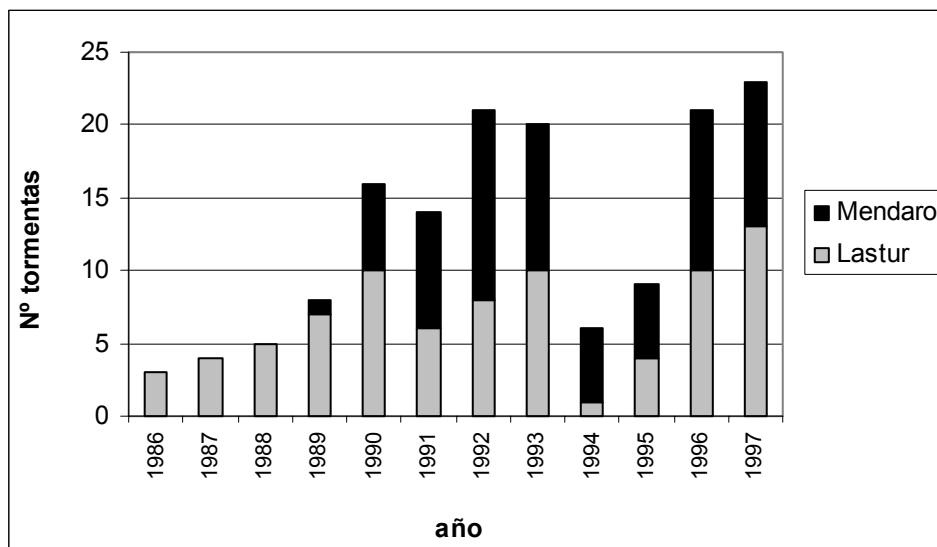


Figura 6.67. Número de tormentas anuales en los observatorios de Mendaro y Lastur (Deva).

Por todo ello, parece que la tendencia general al aumento observado en las tasas de movilización no guarda relación con las variaciones que, a lo largo del periodo, presentan las precipitaciones. La única salvedad es que tal vez las lluvias más significativas para desencadenar deslizamientos sean las intensidades superiores a 75 mm (o próximas a este valor), si bien esto, tal como se ha señalado, no concuerda con lo ocurrido en la parte final del periodo estudiado.

En resumen, es indudable el papel de las precipitaciones de carácter torrencial en el desencadenamiento de deslizamientos en la zona y puede afirmarse que son, con diferencia, la principal causa directa e inmediata de los mismos. Sin embargo, existe una tendencia de fondo al aumento de estos procesos, que no puede atribuirse a la lluvia como factor causal. La explicación más plausible de dicha tendencia es la influencia humana.



Como ya se ha indicado anteriormente, la influencia directa de la intervención humana como factor desencadenante se ha constatado, a través del trabajo de campo, en el 7% de los deslizamientos identificados para el periodo anterior a 1991. Las actividades que habitualmente desencadenan los movimientos son descalces por excavación o la eliminación de la cobertera vegetal. Es evidente que ambos tipos de actuaciones deben aumentar con el tiempo, como consecuencia de un mayor grado de intervención sobre el territorio que, a su vez, debe estar relacionado con el aumento de población. Sin embargo, también resulta claro que esa causa directa no explica aumentos de las tasas de deslizamientos (expresadas en N°/km<sup>2</sup>/año) como los que se muestran en las Tablas 6.22 y 6.23, de aproximadamente un orden de magnitud en unos 40 años (o menor, dado que los periodos iniciales de la etapa analizada corresponden a lapsos temporales amplios).

Tabla 6.22. Tasas de movilización para la zona del Bajo Deva (N°/km<sup>2</sup>/año).

	Todos los mov. Pre-1954 (¿10 años?)	Todos mov. 1954-91	Desliz. Superf. 1954-91	Desliz. Superf. 1991-97
Deva	0,12	0,18	0,13	1,53
Mendaro	0,06	0,06	0,05	0,45
Elgoibar	0,08	0,11	0,09	0,75
Eibar	0,10	0,14	0,11	1,30
Media	0,09	0,13	0,10	1,10

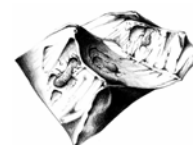


Tabla 6.23. Tasas de movilización para deslizamientos superficiales en el municipio de Deva.

Deva	Nº desliz./km <sup>2</sup> /año	Hab./km <sup>2</sup>
Pre-1954	-	72,2
1954-70	0,14	81,7
1970-83	0,15	90,4
1983-85	1,36	96,9
1985-91	0,44	96,7
1991-93	0,91	96,3
1993-97	1,07	97,9

Por otro lado, tal como se presenta en las Tablas 6.2 y 6.4, en aproximadamente un 40 % de los casos se ha constatado sobre el terreno alguna influencia “posible” o “probable” de las actividades humanas. Esto es claramente insuficiente para explicar los aumentos observados en las tasas de movilización (frecuencia).

Una posibilidad es que dicha influencia no se ejerza de modo directo, sino que la actuación humana, que se produce de formas muy diferentes y, en ocasiones, difusas sobre casi todo el territorio (construcción de nuevas infraestructuras, urbanización, viviendas aisladas, mejora de caminos, cambios en los sistemas de cultivo, modificaciones en la hidrología superficial y subterránea, actuaciones forestales y cambios de uso del territorio en general), actúe como “agente preparatorio” que, sin provocar directamente los deslizamientos, facilite su aparición cuando actúan otros agentes desencadenantes; por ejemplo, lluvias de una determinada intensidad que sin esa “preparación previa” causarían un número reducido de movimientos, podrían desencadenar muchos si ha habido ese tipo de intervenciones sobre el territorio.

Para tratar de ver hasta qué punto se puede establecer una relación entre la tasa de deslizamientos y los factores socioeconómicos citados, se ha analizado la evolución de

la población en los municipios de la zona de estudio y la del PIB (Producto Interior Bruto) en la provincia.

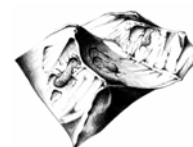
En la Tabla 6.24 se presentan las densidades de población para los cuatro municipios, considerando que este parámetro puede mostrar una relación con las tasas de movilización por procesos de ladera por unidad de superficie. En primer lugar se presentan los datos correspondientes a los años 1985 y 1999; el año 1985 es el primero para el que existen datos sobre Mendaro, municipio creado en esas fechas. En segundo lugar, se muestran las densidades de población para 1950 (que se considera representativo del periodo pre-1954) y los promedios para los periodos 1954-91 y 1991-97.

Tabla 6.24. Evolución temporal de la densidad de población (hab./km<sup>2</sup>) para los municipios del Bajo Deva.

Municipio	1985	1999	1950	1954-91	1991-97
Deva	96,9	97,9	77,2	86,7	97,5
Mendaro	68,5	56,0	-	-	57,3
Elgoibar	311,5	262,8	169,0	207,8	274,3
Eibar	1613,5	1304,0	752,2	1252,1	1371,2

El examen de las tasas correspondientes a todos los movimientos, para los periodos pre-1954 y 1954-91 (Tabla 6.22), muestra un ligero aumento de las mismas, salvo en el caso de Mendaro. Ese aumento puede ser parcialmente aparente, ya que la probabilidad de la “no-inclusión” en el inventario es mayor para los movimientos más antiguos.

Los incrementos en las tasas de movimientos en masa en Deva, Elgoibar y Eibar (aceptando como válidas, con las reservas anteriores, las cifras pre-1954) oscilan entre 37% y 5%. A su vez, las densidades de población muestran aumentos entre 12% y



66%, aunque los mayores incrementos entre ambos valores no corresponden a los mismos municipios.

Entre los periodos 1954-91 y 1991-97 las tasas de deslizamientos superficiales se incrementan aproximadamente un orden de magnitud (oscilando entre un factor 8,3 en Elgoibar y 11,8 en Deva y Eibar). Para el mismo periodo, la población aumentó en dichos municipios 32%, 12% y 10% respectivamente.

Según se aprecia a partir de las cifras anteriores, entre pre 1954 y 1954-91, se registran aumentos no demasiado diferentes de las tasas de deslizamiento y las densidades de población, si bien la magnitud de los incrementos de ambas no muestra un comportamiento homogéneo en los tres municipios para los cuales es posible la comparación.

En el segundo lapso temporal considerado (1954-91 a 1991-97), sin embargo, hay una fuerte diferencia en el crecimiento de ambas tasas. La densidad de población muestra aumentos moderados, del 10% al 32% y las tasas de deslizamientos se multiplican prácticamente por 10, de forma bastante similar en los tres municipios.

El análisis de las densidades de población para 1985 y 1999 permite otro tipo de comparación, aunque evidentemente dicha comparación no se pueda realizar de manera directa con los periodos para los cuales se han obtenido datos sobre los deslizamientos. Los citados datos muestran una disminución de la densidad de población en Mendaro (18%), Elgoibar (12%) y Eibar (19%) y un ligero aumento en Deva (1%). Por el contrario, durante la década de los noventa se ha producido un fortísimo aumento de las tasas de deslizamiento con respecto al periodo anterior. Estos datos sugieren que no hay una relación causal directa entre número de personas en la zona y la frecuencia de deslizamientos.

Los datos correspondientes al municipio de Deva permiten un análisis temporal algo más fino. En la Tabla 6.23 se comparan las densidades de población y las tasas de

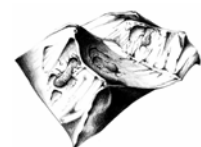
deslizamientos para los lapsos temporales establecidos. Ambos parámetros muestran una tendencia general de aumento, si bien en el caso de la población ese incremento es del 20% desde 1954 y en el caso de los deslizamientos es del 760%; esto es, 38 veces mayor.

Parece claro, en conjunto, que la posible influencia indirecta o difusa de la intervención sobre el territorio se relaciona en parte con la densidad de la presencia humana en dicho territorio pero, también, que eso no representa una relación causa-efecto directa y que no explica de forma satisfactoria la evolución observada en el proceso.

Una explicación alternativa de la mayor intervención sobre el territorio es, como se ha señalado anteriormente, el aumento de la actividad como consecuencia de la mejora del nivel económico de la población, tanto en los propios municipios analizados como, sobre todo, en el entorno, puesto que el aumento de la riqueza a nivel provincial o regional se manifiesta en todos los municipios.

A fin de explorar ese tipo de relaciones con más detalle, se ha examinado la evolución en el municipio de Deva, en relación con tres indicadores diferentes, que reflejan la “capacidad de intervención” sobre el territorio: densidad de población, producto interior bruto por persona y producto interior bruto (PIB). Los datos de densidad de población utilizados son los referentes al municipio de Deva, mientras que el PIB total y *per capita* se refieren al conjunto de Guipúzcoa; esto es así porque se considera que la “capacidad de intervenir” sobre un determinado territorio está en gran medida determinada por las condiciones socioeconómicas de su entorno, ya que los agentes causantes de la intervención son con frecuencia externos al área analizada.

Los tres indicadores señalados están, por supuesto, relacionados entre sí; posiblemente el más significativo sea el PIB total, ya que integra tanto el número de personas como la capacidad de cada persona para influir sobre el territorio (PIB *per capita*).



El modelo que subyace en la interpretación es el propuesto por la OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo) para el establecimiento de indicadores de sostenibilidad (OCDE, 1994; Moldan y Billharz, 1997); esto es, el modelo DF-P-S-I-R (*Driving Force, Pressure, State, Impact, Response*) o, más simplificado, P-S-R. La fuerza motriz que influye sobre el territorio es la combinación de personas más tecnología y nivel de riqueza, que se plasman en las presiones que representan la construcción de infraestructuras, la implantación de nuevos usos agrarios, etc., las cuales dan lugar a impactos sobre el territorio que modifican su estado (por ejemplo, cambios de la cobertura vegetal, en la morfología del terreno o en las condiciones hidrológicas) que provocan una “respuesta geomorfológica” de los sistemas naturales, en forma de aumento de las tasas de deslizamiento y de erosión; a su vez, esto da lugar a una respuesta social, que se materializa en actuaciones para evaluar, prevenir o mitigar los riesgos correspondientes.

En las Figuras 6.68, 6.69 y 6.70 se presentan las variaciones temporales de los tres indicadores de fuerza motriz (o presión) considerados, en relación con las variaciones en el indicador de respuesta (tasas de movilización por deslizamientos). Una correlación entre ambos tipos de indicadores sería el reflejo del funcionamiento del territorio como un sistema en el cual la señal de entrada (fuerza motriz) es procesada, dando lugar a una señal de salida (respuesta, tasa de movilización de materiales).

Un primer análisis de las figuras, muestra que, a grandes rasgos, las tendencias de variación de ambos grupos de indicadores son coincidentes. Ahora bien, mientras los indicadores de presión presentan aumentos de tipo lineal durante el periodo analizado, el aumento en el indicador de respuesta es de tipo exponencial; esto es, parecería que el procesamiento de la señal de entrada en el sistema implica un efecto multiplicador de sus efectos en la señal de salida. De los tres indicadores citados, la densidad de población es la que presenta menores variaciones, siendo éstas casi imperceptibles durante la etapa de mayor aumento en la frecuencia de deslizamientos.

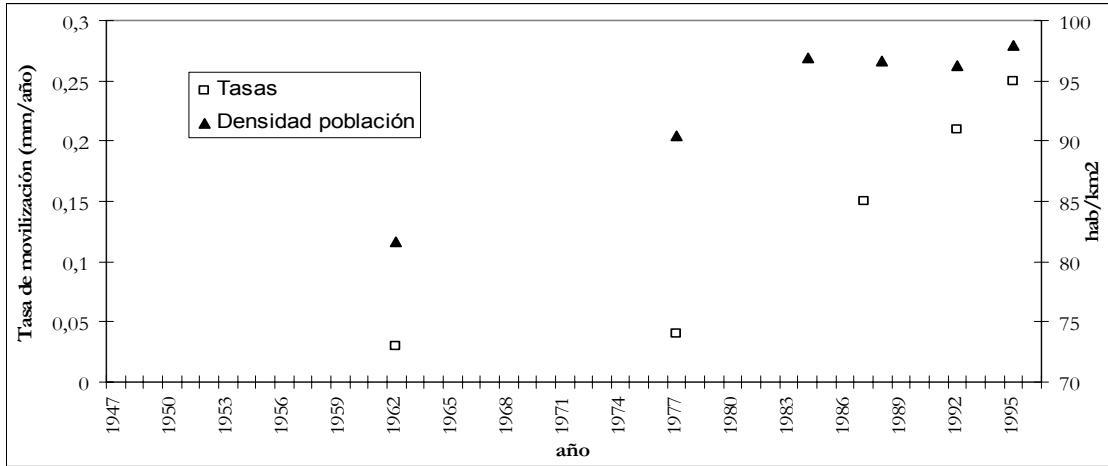


Figura 6.68. Evolución temporal de las tasas de movilización de deslizamientos y de la densidad de población

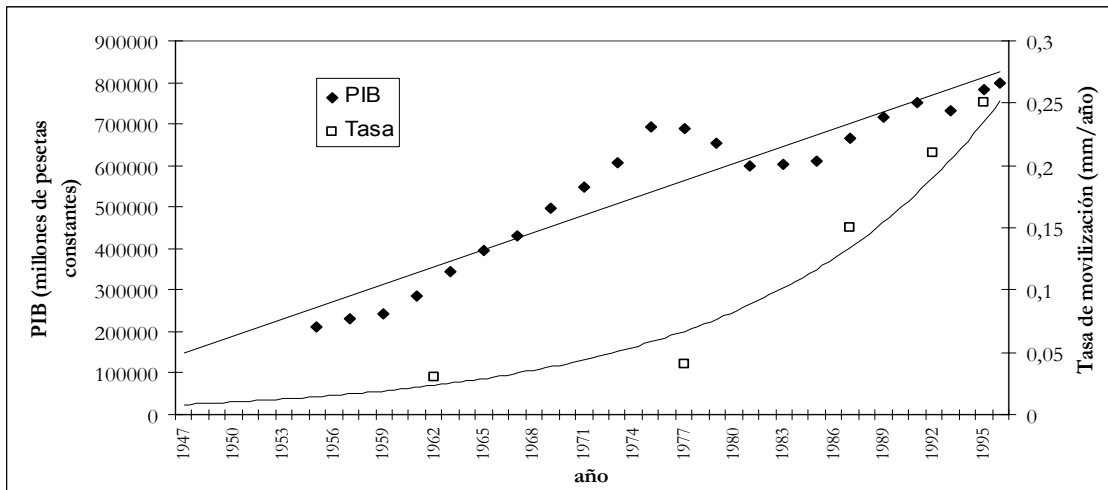


Figura 6.69. Evolución de las tasas de movilización de deslizamientos en relación con la variación temporal del PIB.

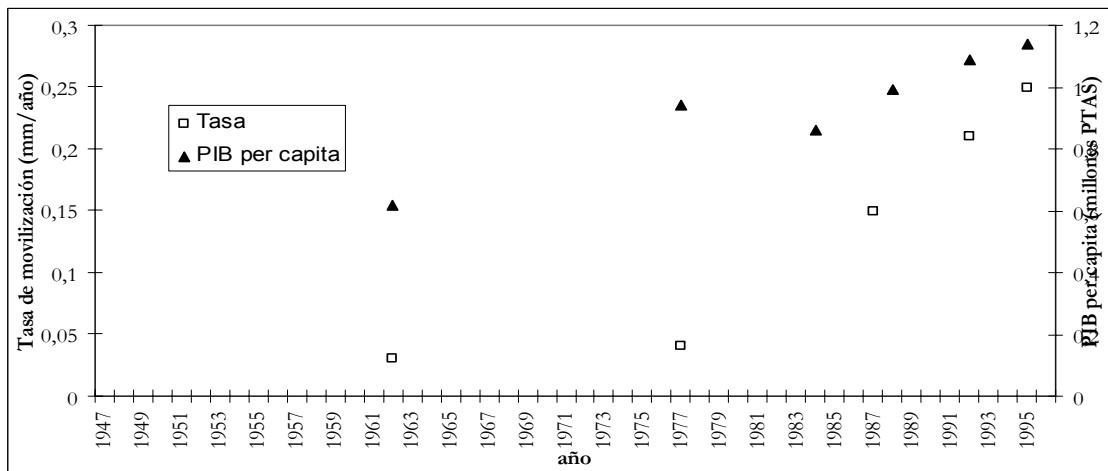
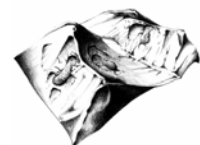


Figura 6.70. Evolución de las tasas de movilización en relación con el PIB *per capita*.



Evidentemente, el dato relativo a los deslizamientos ocurridos durante el periodo 1983-85 se sale claramente de la tendencia general y refleja condiciones excepcionales en el detalle, bien conocidas, que no invalidan la lectura de la tendencia general indicada. A fin de corregir la distorsión que implica la existencia del episodio más importante de deslizamientos en el periodo más corto de los analizados, se ha obtenido el promedio de los periodos 1983-85 y 1985-91, representándose el punto correspondiente en las gráficas. Los valores “en bruto” de dichos periodos se han mantenido sobre dichas gráficas, únicamente como referencia para comparación visual.

Es interesante señalar que, así como los episodios de lluvias intensas de los años 80 y 90 dieron lugar a abundantes deslizamientos (Figuras 6.62 y 6.64), episodios de intensidad comparable en los años 50-60 no han tenido un reflejo apreciable en la estabilidad de laderas. Esto es coherente con la hipótesis antes avanzada, la menor intensidad de la “actuación preparatoria previa” en esas fechas explica que las consecuencias inmediatas e la lluvia fueron mucho menores.

La gráfica de la Figura 6.71 muestra la posible relación entre PIB y tasa de movimientos (según se aprecia y por las razones antes apuntadas, se han promediado los periodos 1983-85 y 1985-91). Es evidente el aumento “paralelo”, a lo largo del tiempo, de PIB y tasa de movilización. Aunque el número de puntos utilizado es muy reducido para asegurar la obtención de ajustes significativos, se han intentado ajustes con distintos tipos de funciones; el mejor ajuste obtenido es el que se muestra en la figura, el cual indica que la relación entre ambas variables no es aleatoria y responde, más o menos, a una función de tipo exponencial (o logarítmica). Evidentemente, esto no debe interpretarse en el sentido de que la ecuación de ajuste obtenida representa un modelo de tipo determinístico con valor predictivo, ni siquiera para la zona de estudio; los procesos que se están analizando son complejos y en ellos intervienen múltiples variables, naturales y humanas, por lo que no es realista pretender modelizarlos con precisión utilizando únicamente dos de dichas variables.



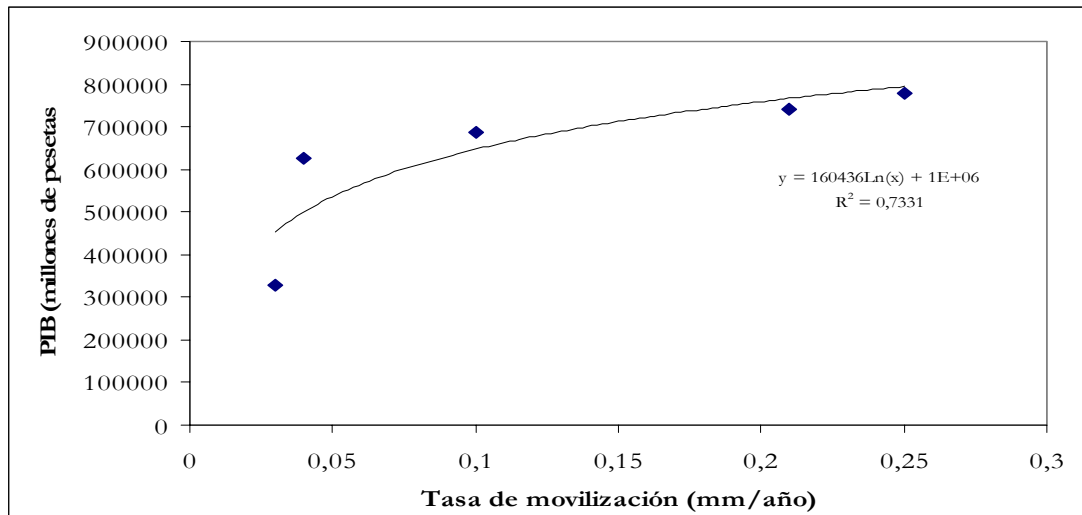
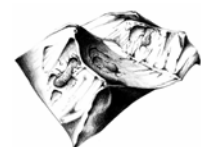


Figura 6.71. Relación entre la evolución del PIB y la tasa de movilización.

Otro efecto que hay que tener presente al interpretar las posibles relaciones entre PIB y tasa de movilización es el posible desfase temporal entre “acción preparatoria” y efecto. Analizando las gráficas (Figuras 6.69 y 6.70) se aprecia que hay un aumento marcado del PIB hasta los años 70, coincidente con un crecimiento moderado de las tasas de movilización, mientras que los fuertes aumentos de éstas, en los años 80 y 90, corresponden a una etapa durante la cual el crecimiento del PIB fue mucho más moderado. Una posible interpretación de esto es que los aumentos en el PIB no tienen un reflejo significativo en la intervención sobre el territorio hasta que dicho PIB alcanza cierto nivel y que, a partir de éste, pequeños incrementos en el PIB se reflejan en grandes aumentos en el grado de intervención (alternativamente, que la intervención sobre el territorio tiene pocos efectos sobre la inestabilidad de laderas hasta que aquélla sobrepasa un cierto umbral; o una combinación de ambas). Otra interpretación, que parece más lógica, es que existe un desfase temporal entre los cambios en la fuerza motriz (PIB) y el reflejo de ésta en la respuesta geomorfológica del territorio (tasa de movilización). Esto es, el aumento en el PIB tarda un cierto tiempo en traducirse en una mayor intensidad de intervención sobre el territorio y ésta, a su vez, produce en un tiempo posterior efectos sobre la estabilidad de laderas. De ser esto así, el fuerte aumento del PIB en el primer tramo de la figura podría explicar el marcado incremento



de las tasas de movilización del segundo tramo, siendo el desfase temporal en la cadena FM-P-I-S-R de 10-20 años.

Lo que sí se puede afirmar, como resultado del análisis presentado, es que el modelo P-S-R resulta adecuado para describir el comportamiento del territorio en lo referente a la respuesta geomorfológica a la intervención humana; que esa intervención está determinada, fundamentalmente, por la combinación personas + riqueza y que, de no producirse respuestas sociales acordes con los impactos detectados sobre el estado, la respuesta del sistema geomorfológico (movilización, denudación) seguirá aumentando a medida que crezca la población y el nivel de bienestar de ésta.

A la vista de todo lo anterior, podemos concluir que la intervención humana sobre el territorio, consecuencia de la intensificación de las actividades económicas, es un factor fundamental en la ocurrencia de deslizamientos en la zona, especialmente los de tipo superficial. Ese factor actúa en ocasiones como desencadenante directo, pero en la mayoría de los casos representa una influencia indirecta y “difusa” a modo de “agente preparatorio”, en cierto modo y salvando las diferencias, como ocurre con el proceso general de encajamiento de los valles.

Resultados similares se han obtenido por parte de González-Díez (1995) y González-Díez et al. (1999) en el valle del Magdalena-Pas (Cantabria) para el Holoceno. Los citados autores encuentran dos periodos de aumento marcado de las tasas de deslizamiento, correspondientes a la ocupación de la zona por parte de los pobladores neolíticos y a la etapa de la industrialización, a partir de finales del siglo XVIII. El aumento de las tasas de movilización desde la etapa pre-neolítica hasta la post-industrial es de un orden de magnitud.

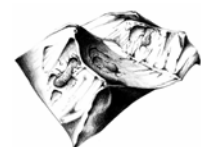
Aunque las observaciones que aquí se comentan corresponden solamente a parte de dos valles de la cornisa cantábrica, no hay razón para pensar que las relaciones y procesos descritos hayan sido sustancialmente diferentes en otras zonas de la misma, o incluso en otras zonas similares de países industrializados de clima templado oceánico.

Dado que la tendencia general en el mundo es el aumento de la población y de la riqueza *per capita*, es razonable pensar que estamos ante una manifestación de la dimensión geomorfológica del cambio global.

### 6.2.5 Contribución de los movimientos en masa a la evolución del relieve

El análisis de los movimientos en masa en la zona del Bajo Deva permite también cuantificar el significado de los mismos en el proceso general de evolución del relieve. Los datos para los 808 movimientos anteriores a 1991 posibilitan el cálculo del volumen total movilizado. Los 628 deslizamientos superficiales inventariados representan un volumen total de 125.600 m<sup>3</sup> (Tablas 6.1 y 6.3). De este volumen, 19.200 m<sup>3</sup> son anteriores a 1954 y 106.400 m<sup>3</sup> corresponden a 1954-91. Además, teniendo en cuenta lo comentado en relación con el inventario del periodo 1991-97, el número de dichos deslizamientos debería aumentarse un 30 % aproximadamente. Dado que estos deslizamientos “previsiblemente existentes pero no visibles en las fotografías aéreas” son de pequeñas dimensiones, se toma la cifra de 100 m<sup>3</sup> como volumen promedio de los mismos.

Por otro lado, los deslizamientos profundos representan un volumen de 462.345 m<sup>3</sup> para el periodo anterior a 1954, 1.845.657 m<sup>3</sup> entre 1954 y 1991, y 9.540 m<sup>3</sup> entre 1991 y 1997 (estimación a partir de las observaciones que se han comentado anteriormente). En este cálculo no se incluyen los movimientos en acantilados costeros. El volumen de los deslizamientos superficiales para el último periodo sería de 181.400 m<sup>3</sup>, aceptando que los tamaños promedio de los mismos son similares a los del periodo anterior a 1991, lo cual es bastante evidente.



Partiendo de los datos anteriores, y suponiendo (con el fin de normalizar las cifras) una distribución uniforme de dichos volúmenes en toda el área de estudio, 140 km<sup>2</sup>, se obtienen “las tasas de movilización” que se muestran en la Tabla 6.25.

Tabla 6.25. Volúmenes movilizados por deslizamientos superficiales en los cuatro municipios del Bajo Deva.

Periodo	Volumen inventario (m <sup>3</sup> )	Corrección por no visibles (m <sup>3</sup> )	Tasa (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	Tasa (mm/año)
1954-91	106.400	15.960	24	0,02
1991-97	181.400	-	216	0,22

En el caso del municipio de Deva (Tabla 6.26) los volúmenes se han calculado considerando que el tamaño promedio de los deslizamientos superficiales inventariados es similar al indicado anteriormente y añadiendo un 30 % de deslizamientos adicionales (previsiblemente existentes pero no detectables en las fotografías aéreas, según se ha comentado anteriormente, y con el volumen promedio citado). Además se ha considerado un volumen adicional correspondiente a deslizamientos profundos (no incluidos en este inventario) equivalente a la proporción que éstos representan en el inventario de 1991.

Las tasas de movilización así calculadas muestran, como es lógico, unas tendencias generales de variación similares a las que presentan las anteriormente expresadas en forma de N°/km<sup>2</sup>/año. Pero a diferencia de las anteriores éstas permiten evaluar la importancia de los desplazamientos en masa en el proceso general de evolución del relieve. Las cifras obtenidas muestran que esa contribución ha pasado de 0,03 mm/año a 0,25 mm/año en lo que se refiere a los deslizamientos superficiales y de 0,2 a 0,42 mm/año si se tienen en cuenta los deslizamientos profundos. Estas cifras tienen el significado de tasas mínimas, pues a pesar de que se han hecho las correcciones pertinentes para tener en cuenta las limitaciones de los inventarios, es evidente que

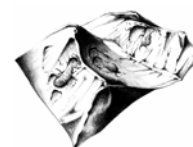
habrá deslizamientos no tenidos en cuenta, especialmente los pequeños movimientos de no más de 20 m<sup>2</sup> de superficie que se producen con mucha frecuencia y que generalmente desaparecen en unos pocos meses. Una estimación conservadora de la aportación de esos movimientos al volumen total sería de alrededor de un 10% adicional.

Tabla 6.26. Volúmenes movilizados por movimientos en masa en el municipio de Deva.

Periodo	Volumen Inventario (m <sup>3</sup> )	Corrección Mov. no visibles (m <sup>3</sup> )	Volumen Corrección Mov. profundos (m <sup>3</sup> )	Total	m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /año	Tasa Superficiales (mm/año)	Tasa Total (mm/año)
Pre-1954	55600	8340	-	-	-	-	-
1954-70	21800	3270	140000	165070	198	0,03	0,20
1970-83	20800	3120	121500	145420	215	0,04	0,21
1983-85	28200	4230	18700	51130	492	0,31	0,49
1985-91	26600	3990	56100	86690	278	0,10	0,28
1991-93	19000	2850	18700	40550	390	0,21	0,39
1993-97	44600	6690	37400	88090	424	0,25	0,42

Como ya se explicó en el apartado 6.2.2, el proceso general de evolución del relieve en la zona está muy determinado por los deslizamientos, que desagregan el material y facilitan su rápida erosión y arrastre hacia los cursos de agua. Ese proceso erosivo tiene lugar de forma bastante rápida, y se ha observado en numerosas ocasiones que depósitos de deslizamiento de poco espesor en relación con su extensión desaparecen en unos pocos meses, en parte por arrastre erosivo y en parte por revegetación.

Resulta por tanto de interés comparar las “tasas de movilización” obtenidas con tasas de erosión o de denudación determinadas de manera independiente, a fin de evaluar la importancia relativa de ambos procesos.



Determinaciones realizadas en parcelas experimentales en la zona de estudio o en zonas adyacentes de características similares (Edeso et al., 1991) han proporcionado tasas de erosión entre 1 Tm/ha/año (en los casos en los que existe cobertura vegetal) y 200 Tm/ha/año (en ausencia de cobertura vegetal y con suelos muy degradados).

Los valores correspondientes al tipo de situaciones más frecuentes en el valle del Deva, esto es, laderas cubiertas de pradería o de pinares, oscilan en general entre 1 y 5 Tm/ha/año. Esto representa entre 0,05 y 0,25 mm/año. En el caso de zonas con la vegetación degradada, el promedio de los valores obtenidos es alrededor de 55 Tm/ha/año; esto es, unos 2,5 mm/año, que representarían los valores máximos de erosión para condiciones limitadas en el tiempo y en el espacio. Los primeros valores son de una magnitud similar a las tasas de movilización obtenidas en este trabajo y los últimos aproximadamente un orden de magnitud superiores.

La comparación de ambos tipos de tasas permite hacer un cálculo inicial del parámetro *RLR* (*Relative Landslide Rate*) propuesto por González Díez (1995) y Cendrero y Dramis (1996). Dicho parámetro expresa la importancia relativa de los deslizamientos en el proceso general de denudación de una zona.

$$RLR = \frac{R_m}{R_d}$$

siendo:  $RLR$  = Tasa relativa de deslizamientos

$R_m$  = Tasa de movilización

$R_d$  = Tasa de denudación

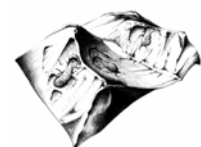
Hay que advertir, no obstante, que la comparación entre las cifras de este trabajo y las de los citados autores debe realizarse con cierta cautela, dado que en el valle del Deva se han utilizado tasas de erosión medidas en parcelas experimentales o estimadas a partir de la USLE (*Universal Soil Loss Equation*) y en las otras zonas se emplearon tasas

de denudación determinadas a partir de volúmenes perdidos entre superficies de edad conocida o de sedimentos acumulados en depresiones cerradas, también en lapsos temporales conocidos.

Las tasas de movilización obtenidas en la zona de estudio durante el periodo analizado oscilan entre 0,03 y 0,31 mm/año para deslizamientos superficiales y 0,2-0,5 para el conjunto de los movimientos en masa. Como promedio de las tasas de erosión en zonas protegidas se puede tomar 0,15 mm/año, siendo 2,5 mm/año una situación erosiva extrema, correspondiente a situaciones muy localizadas y efímeras. Estas cifras proporcionan valores de *RLR* entre 0,2 y 2 para el caso de los movimientos superficiales en zonas bien vegetadas; 1,3-3,3 para el conjunto de los movimientos, también en zonas bien vegetadas; por último, 0,08-0,2 para el conjunto de los movimientos, en zonas muy desprotegidas. Esto es, los valores de *RLR* oscilarían, a grandes rasgos, entre 0,1 y 3, siendo los valores que corresponden a las condiciones más representativas de la zona de estudio en el momento actual, entre 0,2 y 2. Los valores que se pueden tomar como promedios actuales, teniendo en cuenta las condiciones existentes en el Bajo Deva, son 0,4 mm/año para la tasa de movilización correspondiente a todos los movimientos y 0,35 mm/año para la erosión hídrica superficial, lo que equivaldría a  $RLR = 1,1$ .

Los valores indicados, aunque presentan una serie de incertidumbres, coinciden razonablemente con los obtenidos con González Díez (1995) en el valle del Magdalena-Pas, en Cantabria (0,2-0,5 mm/año) o por Cendrero y Dramis (1996) en las Islas Canarias (0,2-1 mm/año). Si además se tiene en cuenta que los citados autores consideran las tasas de denudación (lógicamente, mayores que las de la simple erosión hídrica superficial), la similitud es todavía mayor, ya que la consideración de dicha tasa en el caso del Deva daría lugar a la obtención de valores más bajos de *RLR*.

De lo anterior se pueden extraer algunas conclusiones. En primer lugar, a grandes rasgos, la *RLR* parece representar un valor relativamente “constante” en zonas



diferentes desde el punto de vista de los procesos geomorfológicos y humanos, y también en periodos de tiempo muy diferentes, tal como sugieren Cendrero y Dramis (1996). En segundo lugar, la importancia relativa de los movimientos en masa en la zona del Deva, en lo referente a la evolución del relieve, parece ser superior en la actualidad a la encontrada en las otras zonas descritas. Esto es coherente con lo anteriormente indicado, al tratar de las características dinámicas de estos movimientos. En tercer lugar, el hecho de que sea aproximadamente en la última década cuando se obtienen valores de  $RLR$  superiores a la unidad, sugiere que la situación actual tiene un carácter “metaestable”; esto es, no se concibe a largo plazo (en sentido geomorfológico), una situación en la cual el volumen de material movilizado por deslizamientos sea superior al volumen total denudado. Más pronto o más tarde, ese material desagregado deberá ser erosionado y arrastrado fuera de la zona de origen.

A pesar de las dudas sobre la posibilidad de que la  $RLR$  represente una “constante” relativamente generalizable para diferentes ambientes geomorfológicos, no parece aventurado plantear que los datos presentados para dicho parámetro sugieren que el proceso general de denudación y evolución del relieve está en gran medida determinado por los movimientos en masa. En otras palabras, la erosión y denudación estarían limitadas por la preparación previa de los materiales a través de los procesos de deslizamiento, y dicha denudación no sobrepasaría en general ciertos límites si no existieran esos movimientos previos. Las diferencias entre los dos grandes modelos de laderas, las “*weathering-controlled slopes*” y las “*transport-limited slopes*” de Selby (1982) podían ser bastante menores de lo que, en principio, se pudiera esperar, desde este punto de vista.

Volviendo a la consideración de las variaciones en las tasas de movilización, se aprecia la considerable importancia de la influencia humana en las mismas (y, por tanto, de manera indirecta, en la denudación). Puede estimarse que en el valle del Deva esa influencia implica que dichas tasas se multiplican aproximadamente por diez (Figura 6.71). Según se ha comentado con anterioridad, aumentos similares se han obtenido en Cantabria por González-Díez (1995) y González-Díez et al. (1999), si bien las tasas de



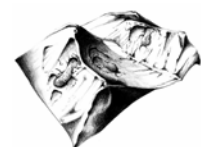
movilización absolutas que obtienen para los tiempos recientes (1970-95) son casi un orden de magnitud superiores.

Lo resultados presentados indican que las tasas de ocurrencia de deslizamientos han experimentado aumentos achacables a la influencia humana directa o indirecta de al menos un orden de magnitud y muy posiblemente dos órdenes de magnitud desde los tiempos pre-neolíticos hasta la actualidad y que la mayor parte de ese aumento ha ocurrido en las últimas décadas (o, como mucho, dos siglos). Por lo anteriormente señalado, cabe esperar que algo similar haya ocurrido con las tasas de denudación, tanto por efecto de la movilización como por simple erosión hídrica superficial, no necesariamente determinada por aquélla. Edeso et al. (1991) han observado que en zonas sometidas a una importante actuación, como consecuencia de repoblaciones forestales, las tasas de erosión pueden pasar de 0,1 mm/año a 10 mm/año.

Desde el punto de vista geomorfológico, hay dos interesantes consecuencias. La primera consecuencia es que tal vez se puedan definir dos grandes etapas, correspondientes a dos grandes modelos de evolución del relieve, con diferencias cualitativas y cuantitativas: la etapa pre-industrial, dominada por los agentes naturales del modelado y la post-industrial, en la cual el principal agente modelador sería la acción humana, que daría lugar a tasas generales de denudación considerablemente mayores; la segunda consecuencia, derivada de la anterior, es que muy probablemente el proceso general de denudación y degradación del relieve en la actualidad se produce a ritmos entre uno y dos órdenes de magnitud superiores que hace sólo unos siglos.

Las tasas de movilización determinadas para la zona, así como los datos existentes sobre las tasas de erosión y las estimaciones presentadas sobre la denudación arrojan cifras comparables a las obtenidas por otros autores en diferentes zonas.

Así, según Owens y Watson (1979), las tasas generales de denudación son del orden de 0,01-0,05 mm/año en zonas bajas y de 0,1-0,5 mm/año en áreas de montaña (Young,



1974; Slaymaker, 1977). Una estimación de las tasas de erosión promedio en regiones templadas y húmedas o semihúmedas por parte de Corbel (1964) arroja cifras de 0,15-0,03 mm/año. En lo que se refiere a las tasas de denudación en grandes cuencas fluviales, Strakhov (1967) propone valores de unos 0,03-0,08 mm/año y Selby (1982) de unos 0,04 mm/año en el caso del valle del Misissipi.

Tasas de erosión de suelo de 0,14-0,067 mm/año se han descrito por parte de Eardley y Viavant (1967) en Utah. Ruxton y McDougall (1967) han encontrado tasas de 0,06-0,8 en Papua. En una región forestal de Nueva Zelanda, Crocier (1984) presenta tasas de 0,03-0,5 mm/año. Para periodos mucho más prolongados, Clark y Jagger (1964) han obtenido en los Alpes tasas promedio de entre 0,004 y 1 mm./año. González Díez (1995) y González Díez et al. (1999) en el citado estudio sobre el Holoceno del valle Magdalena-Pas (Cantabria) han encontrado una tasa promedio de incisión fluvial de 0,5 mm/año y de 0,1 a 3 mm/año para la denudación. En Canarias, para los últimos 4 millones de años, se han encontrado tasas de 0,27 mm/año (Cendrero y Díaz de Terán, 1985). En Galicia se han determinado tasas del orden de 0,01 mm/año (Benito et al., 1991) y en las Bárdenas Reales de 4-10 mm/año (Nava, 1995).

Otro tema de interés en relación con la evolución del relieve en la zona es la persistencia de los deslizamientos como rasgos perceptibles del paisaje (Figura 6.72); lógicamente, esa persistencia ha de estar relacionada con las dimensiones de los mismos. Anteriormente se ha indicado que los pequeños movimientos que se producen en el valle del Deva pueden desaparecer completamente en menos de un año (el depósito) o unos pocos años (la corona).

González Díez et al. (1999) analizaron la relación existente entre los deslizamientos de diferentes edades, ocurridos a lo largo de los últimos 100.000 años aproximadamente, y encontraron una relación lineal del tipo de la presentada en la Figura 6.73. Aunque, según se ha mencionado, el contexto geomorfológico y los tipos de movimientos en masa en ambas zonas son bastante diferentes, se ha extrapolado a partir de la ecuación



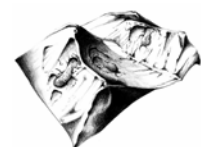
Figura 6.72. Esta fotografía ilustra la escasa persistencia de los deslizamientos superficiales en el paisaje. La foto superior fue sacada en el invierno de 1999, mientras que la inferior se tomó en la primavera de 2001.



de ajuste, con el fin de comparar los tamaños así obtenidos con los existentes en el valle del Deva.

De acuerdo con esa extrapolación, los deslizamientos de más de 50 años deberían tener un tamaño superior a 1.875 m<sup>2</sup> para ser identificables actualmente en el paisaje. Esto coincide en lo esencial con lo observado en el valle del Deva; prácticamente todos los deslizamientos observables en las fotografías aéreas de 1997 o en el terreno y que son también observables en la foto de 1954 tienen dimensiones superiores a las indicadas. Igualmente, la mayoría de los deslizamientos <1.000 m<sup>2</sup>, visibles sobre las fotografías de 1954, han dejado de ser perceptibles en las fotos recientes o sobre el terreno. Las observaciones realizadas en el valle del Deva, por tanto, confirman la posibilidad de utilizar ciertos rasgos morfométricos como criterio de datación de estos movimientos, tal como sugiere González Díez (1995).

En resumen, los datos obtenidos permiten afirmar que, si bien las precipitaciones intensas son el principal agente causal directo de la mayoría de los deslizamientos en la zona de estudio, la influencia de las actuaciones humanas constituye una acción preparatoria fundamental, que ha dado lugar a un aumento de las tasas de movilización de un orden de magnitud. Esta influencia humana ha dado lugar a que se instale en la zona un nuevo “modelo de evolución geomorfológica”, cuantitativa y cualitativamente distinto del que ha operado anteriormente.



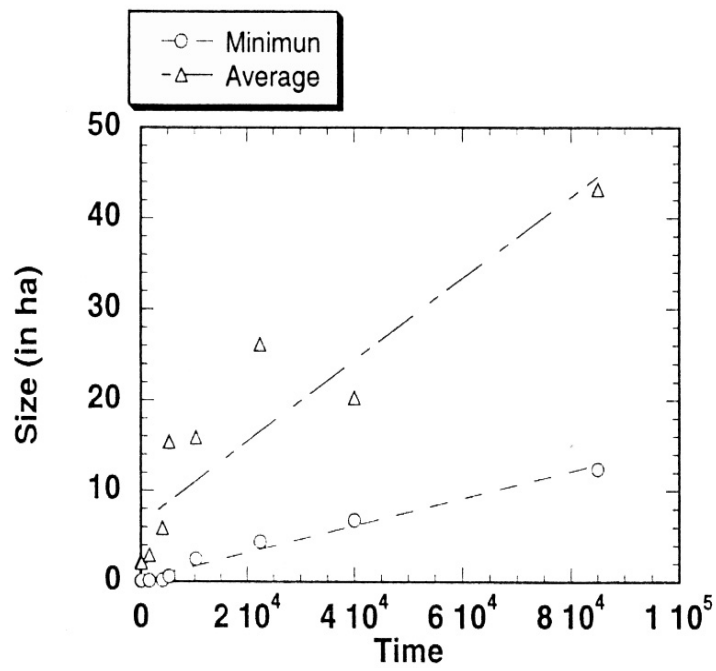


Figura 6.73. Correlación entre edad y tamaño medio y mínimo de deslizamientos (González Díez, 1995).

### 6.2.6 Aplicación del Cs-137 al análisis de los deslizamientos superficiales

En los apartados anteriores se pone de manifiesto el interés que presenta el análisis detallado de la ocurrencia temporal de los movimientos en masa recientes, entendiendo como tales aquellos acaecidos en los últimos 50 años.

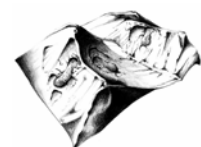
La caracterización temporal de dichos movimientos se puede abordar, según se ha mostrado, por medio del análisis de fotografías aéreas de distintas fechas. Esto tiene dos inconvenientes principales: el número de vuelos disponibles y, por tanto, los lapsos temporales identificables son limitados y por otro lado, no se puede determinar con precisión la edad de los movimientos, sino solamente el intervalo dentro del cual ocurrieron.

Para tratar de resolver este problema, se ha ensayado la aplicación de técnicas basadas en las medidas de Cs-137, con el fin de ver hasta qué punto permitirían realizar dataciones de dichos movimientos.

El fundamento del método se ha comentado en el capítulo de metodología. En este apartado se presentan los resultados obtenidos y su interpretación.

El muestreo para el ensayo del método se ha llevado a cabo sobre dos deslizamientos del municipio de Deva (Figura 6.74), uno de 1983 y otro de 1992. Los análisis han sido realizados por J. Soto (Grupo de Física Médica, Departamento de Ciencias Médicas y Quirúrgicas, Universidad de Cantabria).

El punto I corresponde a un deslizamiento de derrubios que evoluciona a flujo (Figura 6.75). Está situado junto al caserío San Martín, muy próximo al límite municipal con Zumaya. El deslizamiento no se observa en los fotogramas de 1991 o anteriores y



aparece con rasgos muy claros y sin vegetación en las fotos de 1993; en la fotografía de 1997 aparece casi completamente revegetado. Por lo tanto, a partir del estudio de fotografías aéreas y de entrevistas con los propietarios de la finca, se ha podido fijar su edad en 1992. En este deslizamiento se han recogido muestras en seis puntos: dos (A y F), situados por encima de la cabecera y considerados estables; otros dos (B y C), situados en la zona del escarpe principal; los otros dos puntos (D y E) en los lóbulos del depósito.

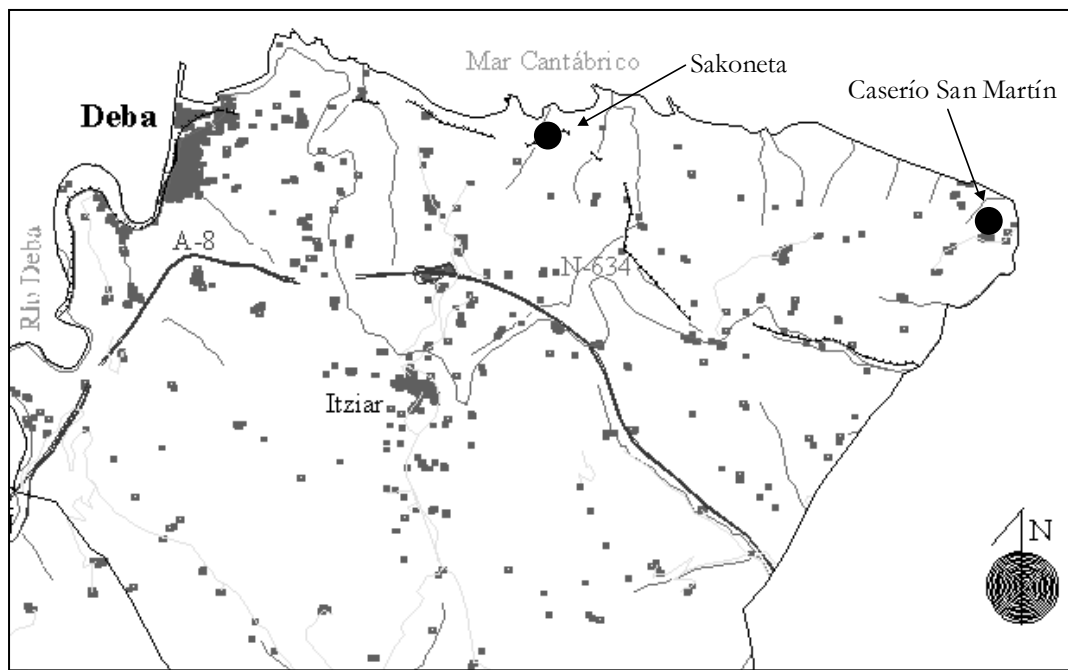


Figura 6.74. Localización de los deslizamientos estudiados mediante técnicas de Cs-137.

El deslizamiento II también es un deslizamiento superficial de derrubios que evoluciona a flujo en la zona de progresión (Figura 6.76). Se encuentra situado junto a la playa de Sakoneta. Su fecha, establecida igualmente a partir de las fotografías aéreas de 1983 y 1985 y de entrevistas con los propietarios, corresponde a 1983. En este deslizamiento se han recogido muestras en cinco puntos: los puntos A y B se han tomado en zonas no movidas; los puntos C y D en el escarpe principal; el punto E, en el depósito.





Figura 6.75. Deslizamiento I, junto al caserío de San Martín.



Figura 6.76. Deslizamiento II, junto a la playa de Sakoneta.



Tanto los perfiles de concentraciones como la carga total de Cs-137 obtenidos, son diferentes según se trate de un punto estable, del escarpe o del depósito. En los puntos estables, las concentraciones de Cs-137 son elevadas en las capas superficiales, llegando hasta 50 Bq/kg, y disminuyen progresivamente al aumentar la profundidad (ver Anexo V). Las concentraciones de Cs-137 obtenidas en las zonas de depósito son, en general, inferiores a las obtenidas en los puntos estables y el perfil de concentraciones no es decreciente en profundidad sino que es irregular. Por último, las concentraciones del isótopo encontradas en los escarpes son muy pequeñas, próximas o por debajo del límite de detección.

Estas diferencias se reflejan también en la carga total de cesio en cada uno de los puntos estudiados. La carga total se calcula multiplicando la concentración de Cs-137 por la densidad del nivel y por su espesor (2,5 a 5 cm); posteriormente se suman todas las cargas de los niveles muestreados con lo que se calcula la carga total de todo el perfil (o punto). Los resultados se muestran en la Tabla 6.27.

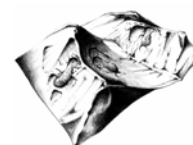
Tabla 6.27. Carga total de Cs-137 (en Bq/m<sup>2</sup>) de los deslizamientos estudiados.

Deslizamiento	Zonas estables	Escarpes	Depósitos
I (S. Martín) 1992	>4.800 (A), 2.560 (F)	490 (B), LID (C)	840 (D), 2.600 (E)
II (Sakoneta) 1983	5.700 (A), 3.300 (B)	190 (C), 5.508 (D)	3.360 (E)

LID: por debajo del límite de detección.

>: la carga total puede ser mayor puesto que la parte inferior del perfil todavía tiene carga detectable.

Tanto las características de los perfiles en los puntos estudiados, como las cargas totales calculadas, son explicables por el comportamiento del Cs-137 en el terreno y por el proceso de deslizamiento en sí. Los puntos estables deben presentar, en principio, perfiles decrecientes con la profundidad. Esto es consecuencia del depósito de Cs-137 en superficie y su transporte “probabilístico” hacia niveles más profundos.



Este tipo de perfil se ha encontrado en estudios realizados en suelos no perturbados (Chamard et al., 1993).

Las cargas totales en los puntos estables analizados (IA-IF y IIA-IIB) presentan valores próximos a 5.000 Bq/m<sup>2</sup>, junto con otros próximos a 3.000 Bq/m<sup>2</sup>. Los valores altos de dichas cargas son similares a los encontrados en puntos estables de pluviometría similar, como corresponde a la homogeneidad prevista en la sedimentación de cesio (Blagoeva y Zikovsky, 1995).

En el caso del punto IIA hay una distribución decreciente con la profundidad, como era de esperar. Por el contrario, el punto IA muestra una notable homogeneidad en la distribución de Cs-137. La interpretación de este hecho es que ese punto probablemente ha sido roturado en algún momento del pasado, con la consiguiente homogeneización del perfil. Esta interpretación se ve corroborada, por un lado, por el hallazgo de fragmentos de ladrillo a unos 30 cm de profundidad y, por otro lado, por la carga total algo más baja que presenta el perfil, lo que sugiere una cierta erosión, lo que es lógico si el suelo ha sido arado en algún momento.

Por el contrario, los puntos estables con cargas totales bajas parecen haber sufrido una pérdida de suelo por erosión de niveles superficiales, ya que siguen manteniendo concentraciones de cesio decrecientes con la profundidad. La diferente situación de los puntos muestreados explica el distinto comportamiento del terreno en los dos tipos de puntos. Así, mientras que los de carga total mayor se recogieron en lugares de mayor cota y más alejados de los deslizamientos, los segundos fueron muestreados cerca de los correspondientes escarpes. Esta diferencia sugiere que dichos puntos, supuestamente estables, pueden haber sufrido algún tipo de erosión, que no ha sido detectada visualmente.

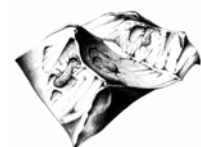
Las muestras obtenidas en cicatrices o superficies de deslizamiento presentan siempre concentraciones muy bajas (<550 Bq/m<sup>2</sup>, para la carga total), también de acuerdo con el comportamiento esperable. La distribución vertical de la concentración de estos

puntos ayuda a establecer la cronología relativa de los distintos escarpes presentes sobre la zona de despegue. Así, en el deslizamiento I, el punto B presenta una mayor carga total y una heterogeneidad en el perfil, mientras que el punto C tiene concentraciones inferiores al límite de detección en todos los niveles. Esto sugiere que este escarpe es más reciente que el anterior. En el caso del deslizamiento II, la situación existente es prácticamente la misma, e indica que el punto C debe corresponder a un escarpe algo más reciente dentro del conjunto. Esto es, los datos de Cs-137 indican que estos movimientos no corresponden a un episodio único, sino a una sucesión de movimientos menores, a lo largo de un cierto lapso temporal, difícil de acotar.

Los datos obtenidos sobre los depósitos de deslizamiento arrojan, nuevamente como era de esperar, valores intermedios entre los anteriores. Las cargas totales oscilan aproximadamente entre 800 y 3.300 Bq/m<sup>2</sup>, lo que se interpreta como el resultado de una cierta erosión, consecuencia de la movilización de la masa deslizada. El perfil de concentraciones en estos puntos (ID-IE y IIE) muestra varios máximos relativos, que se interpretan como debidos a flujos sucesivos, lo que es coherente con lo obtenido a partir de las medidas en los escarpes. Esto es, los depósitos de deslizamiento muestran un doble efecto sobre el Cs-137: por un lado, una mezcla del perfil con una cierta homogeneización, así como la superposición de varias coladas; por otro lado una erosión y pérdida de Cs-137 debido a la perturbación del material superficial.

La comparación entre las concentraciones de Cs-137 en las cicatrices de deslizamiento analizadas muestra que la diferencia relativa (en relación con la zona estable adyacente) es algo mayor en la cicatriz más reciente, si bien esta diferencia es pequeña. Esto es, parece que los datos de Cs-137 obtenidos permiten establecer una cronología relativa entre ambos movimientos (al igual que entre escarpes de un mismo movimiento), pero no una cronología absoluta.

De acuerdo con estos resultados, parece que la datación de deslizamientos recientes a partir de la carga total de los puntos del escarpe sería posible si se incrementara la

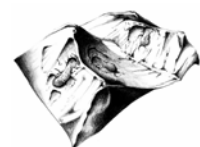


exactitud y capacidad de detección de concentraciones pequeñas. Esto implica disminuir el límite de detección del método, aumentando el volumen de la muestra y el tiempo de recuento. Por otra parte, sería necesario realizar un muestreo más detallado para conocer con exactitud las concentraciones anormalmente altas que presentan algunos puntos, así como aumentar la profundidad de los perfiles, con el fin de tener un mejor control de las concentraciones en niveles bajos. Se estima que si se mejoran ambas condiciones, el método podría ser adecuado para una datación suficientemente precisa de los deslizamientos recientes.

A partir de los resultados expuestos se puede deducir que la utilización del Cs-137 podría emplearse como técnica de datación, si se mejora el método de detección. Por otra parte, el estudio de los perfiles de concentraciones del isótopo de Cs y de las cargas totales ofrecen perspectivas interesantes para el análisis de la evolución de los deslizamientos. La dinámica de los deslizamientos es siempre compleja, produciéndose además reactivaciones y erosiones posteriores que, en general, no son fácilmente reconocibles al cabo de un breve tiempo, por lo que técnicas como esta u otras similares pueden ayudar a clarificar los procesos acontecidos.

Es indudable que, en ausencia de dataciones obtenidas por otros medios, el Cs-137 ofrece la posibilidad de datar deslizamientos, lo que puede ayudar a establecer la probabilidad temporal de los mismos y a validar los mapas de susceptibilidad. Sin embargo, esta técnica es costosa y exige un esfuerzo considerable. La profundización en la aplicación de estos métodos y el establecimiento de su validez y precisión de forma más detallada se sale de las posibilidades y del marco del presente trabajo.

A modo de síntesis de lo presentado en este capítulo, se señala que el estudio de la distribución espacial y temporal de los movimientos en masa en una zona es fundamental para profundizar en el conocimiento de los mismos. Ese mejor conocimiento, según se indicaba en el planteamiento inicial, sirve para conocer la evolución pasada de este proceso, los agentes causales del mismo y su contribución a la evolución del relieve. El análisis de los datos espaciales mediante SIG ayuda enormemente a la comprensión del proceso y, sobre todo, al desarrollo y aplicación de herramientas predictivas con respecto a su comportamiento futuro.









## Cap. 7 Conclusiones



## 7. CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen las conclusiones alcanzadas como consecuencia del desarrollo del trabajo realizado. Esas conclusiones se han avanzado ya en los capítulos precedentes, pero se presentan aquí agrupadas en relación con los dos grandes problemas que se han abordado: desarrollo, aplicación y contrastación de métodos y herramientas cuantitativos para el análisis de la susceptibilidad; análisis cuantitativo de la evolución geomorfológica del proceso y de su significado.

### **Análisis de la susceptibilidad**

- La sistematización de los bancos de datos digitales en SIG permite, por un lado, aplicar de forma eficiente procedimientos estadísticos para el análisis de la susceptibilidad mediante toda una serie de técnicas de análisis de datos espaciales y, por otro lado, llevar a cabo de forma rápida multitud de análisis basados en dichos datos. La mayoría de los ensayos realizados en este trabajo no hubieran sido posibles sin este tipo de banco de datos digitales.
- En la confección de esos bancos de datos, es fundamental incluir los metadatos, que resultan imprescindibles para que otros operadores puedan utilizar los datos incluidos, así como interpretar adecuadamente su significado.
- El banco de datos se ha diseñado y concebido a partir de un modelo de rotura concreto, referido a un tipo específico de deslizamiento; esto representa un esfuerzo considerable y poco frecuente y constituye una novedad en lo que se refiere a la elaboración de modelos basados en funciones de favorabilidad.
- La selección de las variables que deben incluirse en el análisis puede hacerse a partir de análisis factorial de componentes principales y de otros estadísticos, o a partir de un análisis sensibilidad consistente en análisis-validación con muestras independientes de deslizamientos y diversas combinaciones de



variables. Este último procedimiento tiene la ventaja de que la selección implica una validación independiente, lo que le confiere mayor robustez.

- La capacidad predictiva de los modelos, en general, mejora a medida que se aumenta el número de variables. No obstante, las variables pendiente, orientación, elevación, litología y vegetación, constituyen la combinación que representa el mejor equilibrio esfuerzo/precisión. Es razonable pensar que estas variables sean las más adecuadas en otras zonas, al menos para el mismo tipo de movimientos.
- Algunas variables como la rugosidad, la insolación o el espesor de las formaciones superficiales, no tienen ninguna influencia en los modelos de susceptibilidad obtenidos. En algunos casos esto se debe probablemente a la forma concreta de expresar la variable, pero en otros posiblemente refleje el hecho de que las variables son poco importantes o redundantes con otras.
- La transformación de las variables continuas en categóricas no influye en el resultado del análisis de susceptibilidad, siempre y cuando no se utilice un número demasiado pequeño de clases.
- A partir del MDE se pueden caracterizar toda una serie de rasgos del terreno de forma bastante satisfactoria. Las variables que expresan la geometría del terreno reflejan de forma implícita otras variables más directamente relacionadas con el proceso: vegetación, litología, espesor de regolito, etc. Las formas del terreno son el resultado de la actuación de diferentes procesos sobre materiales con estructura, composición y propiedades físicas determinados, dentro de un contexto climático que condiciona, entre otras cosas, la vegetación. La correlación entre geometría y variables como litología, vegetación y espesor de regolito, etc. es suficientemente buena como para que sea posible modelizar las últimas a partir de las primeras. Por tanto, el MDE ofrece la posibilidad de ser utilizado para mejorar la precisión de la cartografía de variables como la geología o la vegetación.
- Las variables derivadas del MDE se caracterizan por su gran objetividad, por ser de obtención automática, y muy económica. Ello apunta a que se deba trabajar más sobre estas variables y no tanto sobre otras que en general se habían

considerado como más determinantes, y cuya obtención no es posible mejorar de forma sustancial, de momento, a bajo coste.

- Las distintas funciones aplicadas para el análisis de la susceptibilidad tienen significados distintos y los valores que se obtienen presentan rangos de oscilación también diferentes. Si embargo, el orden relativo de los valores puede utilizarse para la elaboración de mapas que son comparables.
- Todos los métodos de análisis aquí utilizados son válidos, pues los resultados obtenidos son muy similares, lo que representa una validación indirecta. El método que proporciona mejores resultados (aunque sólo ligeramente) es el factor de certidumbre. Para mejorar la capacidad predictiva de los modelos sería conveniente irlos ajustando por medio de modificaciones mediante criterio de experto y de análisis de sensibilidad repetidos, consistentes en análisis-mapa-validación-análisis-mapa-etc., lo que permitiría mejorar los resultados.
- Se han observado diferencias entre la validez predictiva de los modelos desarrollados entre las dos zonas en las cuales se han aplicado. Esas diferencias parecen deberse sobre todo a la extensión relativa de las áreas sin riesgo y, en menor medida, a la distorsión del proceso por intervenciones humanas. La eliminación de las áreas claramente sin riesgo al inicio de este tipo de análisis permitiría determinar de manera más fiable la validez predictiva de los modelos.
- Los modelos de tipo estadístico o “probabilístico” proporcionan mejores resultados que los de tipo heurístico analizados, y ofrecen la posibilidad de ajustes sucesivos, a través de la validación, que permiten mejorar su calidad.
- El procedimiento de validación que aquí se presenta proporciona una base razonable para considerar que constituyen una herramienta adecuada, que permite mejorar de manera notable la calidad de las evaluaciones de susceptibilidad. No obstante, esto no debe tomarse como una prueba definitiva de su validez en todo tipo de situaciones geomorfológicas.
- Las técnicas utilizadas proporcionan modelos que permiten realizar predicciones de validez contrastable y cuantificable, que se pueden expresar tanto en forma de probabilidad espacial como espacio-temporal, siempre y



cuando se tenga información sobre la ocurrencia de deslizamientos en el pasado.

- La validación constituye una herramienta de análisis que resulta fundamental. Una validación sistemática, en las distintas fases del proceso, permite no solamente establecer la validez de los modelos, sino que también sirve para seleccionar las variables, determinar la mejor forma de categorizar éstas, identificar imprecisiones en los datos de entrada, definir las funciones más adecuadas, etc.
- Una de las aportaciones novedosas de este trabajo ha sido poner de manifiesto que la validación constituye un instrumento básico en el conjunto del análisis, y no solamente un medio para establecer la validez predictiva de los modelos. Esa validación debe llevarse a cabo para la totalidad del modelo de susceptibilidad, de manera casi continua y, evidentemente, implica la separación de la población total de deslizamientos en al menos dos muestras. Las curvas de validación obtenidas corresponden a una función que representa la validez predictiva de los distintos valores del modelo.
- Igualmente es novedoso el análisis multitemporal llevado a cabo, como parte del proceso de validación, tanto de forma predictiva como postdictiva.
- Para conocer el carácter predictivo de los modelos es posible utilizar igualmente cualquiera de las estrategias aplicadas en este trabajo: división de la población de forma aleatoria, de forma espacial, o temporal, aunque cada uno de ellos tenga sentido y limitaciones diferentes.
- Las validaciones temporales llevadas a cabo para diferentes lapsos temporales arrojan resultados muy similares. Esto pone de manifiesto que el principio del actualismo implícito en los procedimientos de análisis de susceptibilidad, es válido. Naturalmente, esto implica la consideración de lapsos temporales adecuados, de al menos unos cinco años.
- El análisis sistemático de las implicaciones que los errores de los datos referentes a las distintas variables que intervienen en el proceso tienen en el resultado final, es otra de las características novedosas de este trabajo.

- Los errores en la identificación y cartografía de movimientos en masa pueden ser grandes (para cualquier operador), pero tienden a distribuirse aleatoriamente, por lo que no tienen por qué afectar de forma significativa a la elaboración de los modelos. Tal como se ha mostrado, dichos errores, que pueden ser muy importantes cuando se elaboran mapas de amenazas con procedimientos geomorfológicos, se diluyen casi totalmente si se aplican los procedimientos estadísticos aquí propuestos.
- Una alternativa al inventario de movimientos pasados es la identificación y delimitación, por criterio experto, de las áreas afectadas en el pasado por deslizamientos y de las que presentan signos claros de inestabilidad. La comprobación realizada ha mostrado, a través de la validación, que este procedimiento mejora en un 10% los resultados. Probablemente esta sea la mejor manera de combinar los procedimientos geomorfológicos tradicionales y los métodos probabilísticos basados en SIG.
- Hay otros errores significativos que pueden afectar a distintas variables, tanto derivadas del MDE como obtenidas por otros medios. En el caso de las primeras, posiblemente los errores más importantes afectan a las variables relativas a la cuenca vertiente, por estar basadas en el principio de conexión entre celdas.
- Los errores en otras variables derivadas del MDE, como por ejemplo la pendiente, o en variables categóricas de obtención directa, como la litología o la vegetación, aunque a primera vista pueden parecer importantes, tienen en la práctica una influencia relativamente pequeña en los resultados finales (siempre, claro está, que se mantengan dentro de los límites habituales y razonables).
- La utilización de datos más precisos para las diferentes variables ha permitido mejorar la capacidad predictiva de los modelos en un 10%, pero a costa de duplicar o triplicar el esfuerzo necesario para la toma y revisión de los datos.
- La aplicación de estas técnicas de forma rutinaria para estudios de amenazas permite generar mapas de susceptibilidad de forma muy rápida y eficaz, especialmente si se tiene montado y operativo el procedimiento en un SIG. Con estos procedimientos se podría reducir el esfuerzo necesario entre un 50% y un



90%, en comparación con los procedimientos heurísticos y/o de cartografía directa. No obstante, esto requiere reenfocar la identificación y cartografía de movimientos en masa, diferenciando los distintos tipos cinemáticos y representando por separado las zonas de ruptura y las de acumulación.

- Los métodos propuestos, siempre que incluyan una validación temporal, permiten la elaboración de mapas de amenazas, en forma de probabilidad espacio-temporal de rotura. Una evaluación más completa de la amenaza requiere, además, la evaluación o predicción del avance y alcance de la masa deslizada.
- Se ha abierto la posibilidad de adaptar los métodos aquí desarrollados para la elaboración de mapas de riesgo, a través de la incorporación al tratamiento mediante funciones de favorabilidad de variables tanto físicas como socioeconómicas.
- Se ha puesto de manifiesto que estos métodos pueden utilizarse como herramientas para la evaluación de impacto ambiental, tanto para la comparación de diferentes alternativas de actuaciones que puedan afectar a la estabilidad de las laderas, como para realizar ciertas predicciones; esto último requiere un conocimiento del comportamiento de los procesos en el pasado, que permita formular escenarios acordes con la realidad de la zona.

## **Evolución geomorfológica**

- Aproximadamente el 1% del área del Bajo Deva ha sido afectada por movimientos en masa en los últimos 50 años.
- El “perfil tipo” de los movimientos en masa de la zona del Bajo Deva corresponde a: deslizamiento traslacional que afecta al regolito de alteración, desarrollado en zonas de cabecera de pequeñas cuencas sobre formaciones flysch, con pendientes entre 20°-30°, altitud inferior a 300 m, vegetación herbácea y orientación NO.



- El modelo general de evolución del relieve en la zona está determinado, a largo plazo, por el encajamiento fluvial. Ese encajamiento, junto con otros agentes, determina la aparición de deslizamientos que, a su vez, desencadenan un proceso de retrogresión hacia las líneas de cumbres, con la formación de nuevos valles (en ocasiones capturas) y el paulatino rebajamiento del relieve. Este proceso presenta un importante control estructural. Los deslizamientos actúan como mecanismo directo de denudación y también de forma indirecta, como agente disgregador de los materiales, que facilita su posterior erosión hídrica.
- Se ha determinado que la relación entre tasa de movilización y tasa de erosión/denudación en la zona estudiada, expresada a través del RLR, presenta valores similares a los encontrados en otras zonas, con contextos geomorfológicos diferentes y en épocas muy distintas. Esto apoya la idea de que dicho valor puede tener el significado de una “constante geomorfológica” en ambientes morfoclimáticos muy diferentes. El valor actual de la RLR en el valle del Deva sugiere que la intervención humana ha dado lugar a una situación “metaestable”, con un aumento en el valor de ese parámetro, indicativo de una tasa de aporte de material movilizado que supera la capacidad de denudación del sistema.
- Los datos obtenidos en el Bajo Deva en relación con la persistencia de los movimientos en masa como rasgos visibles del paisaje coinciden, a grandes rasgos, con la extrapolación de las tendencias determinadas en otra zona de la cornisa cantábrica para el Pleistoceno Superior-Holoceno. Esto confirma la posibilidad de utilizar ciertos rasgos morfométricos como criterio de datación.
- Existe una clara tendencia al aumento en la frecuencia de los deslizamientos con el tiempo, patente tanto a través del análisis de toda la zona del Bajo Deva en tres lapsos temporales, como del análisis detallado del municipio de Deva en siete lapsos. Ese aumento equivale aproximadamente a un orden de magnitud en 40 años. Ese aumento ha sido acelerado y sigue una tendencia de tipo exponencial, en lo relativo a deslizamientos superficiales; no obstante, la frecuencia de deslizamientos profundos parece haber permanecido aproximadamente constante.



- El factor causal directo e inmediato de la mayoría de los deslizamientos son las lluvias de carácter torrencial. Sin embargo, existe una tendencia al aumento de estos procesos que no puede atribuirse a la lluvia como factor causal.
- En el 7% de los deslizamientos inventariados el agente causal inmediato ha sido la intervención humana. En el 40% de la superficie afectada se ha apreciado cierta relación directa o indirecta con la actividad humana.
- Los datos existentes no muestran correlación entre la tendencia al aumento en la frecuencia de deslizamientos con el tiempo y factores desencadenantes tales como sismicidad, incisión basal o precipitaciones.
- Se ha puesto de manifiesto que la actividad humana juega un papel fundamental, de tipo indirecto y “preparatorio”, en el desarrollo de estos procesos, facilitando la actuación de otros agentes desencadenantes, como las lluvias, y aumentando fuertemente sus efectos.
- Se ha encontrado una buena correlación entre tasa de movilización/frecuencia de deslizamientos y PIB. Este parámetro se interpreta como indicador de la capacidad de intervención sobre el territorio y, por tanto, de la intensidad de esa actuación preparatoria que contribuye a desestabilizar las laderas a través de diferentes procesos.
- La relación entre actividades humanas y deslizamientos parece ajustarse al funcionamiento del territorio como un sistema que obedece al modelo Fuerza Motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta. El aumento de la población, riqueza y capacidad tecnológica (expresados a través del PIB) constituyen la fuerza motriz que determina las diferentes presiones que afectan al territorio, siendo el aumento de las tasas de deslizamiento una respuesta geomorfológica del sistema a las mismas.
- El hecho de que relaciones similares entre intensidad de intervención y tasa de deslizamientos se hayan constatado para tiempos pasados y en otras zonas, sugiere que estamos ante una dimensión geomorfológica del cambio global, cuya fuerza motriz es la combinación del aumento de personas sobre el planeta y de su capacidad económica.

- Sobre la base de lo anterior, se pueden identificar dos grandes modelos de evolución del relieve, cualitativa y cuantitativamente distintos, correspondientes a dos etapas de la historia del planeta: etapa “pre-industrial” con agentes naturales (agua+gravedad) predominantes y etapa “post-industrial” con la acción humana como agente más importante. Ese cambio de modelo ha implicado un aumento de las tasas de movilización/denudación de al menos uno, y muy probablemente, dos órdenes de magnitud.
- La aplicación del Cs-137 al análisis cronológico de deslizamientos ha puesto de manifiesto la posibilidad de establecer cronologías relativas entre movimientos distintos y de identificar diferentes fases en el desarrollo de movimientos individuales, tanto en la superficie de rotura como en el depósito.
- Se apunta la posibilidad de utilizar esta técnica para la datación absoluta de movimientos en masa, si bien esto requeriría obtener mayor número de perfiles y más profundos, así como mejorar la capacidad de detección, utilizando mayor cantidad de muestra y tiempos de conteo más largos.

Las conclusiones comentadas más arriba sirven para confirmar la validez de la aproximación general y de la hipótesis de trabajo planteada. El análisis detallado del desarrollo temporal del proceso de deslizamiento en los últimos 40-50 años, ha permitido profundizar en el conocimiento del mismo; se ha podido así establecer el papel de la actividad humana en relación con otros agentes causales y obtener una cuantificación de la contribución de los movimientos en masa a la evolución del relieve, dentro de un marco temporal similar al empleado en el análisis de otras manifestaciones del cambio global, lo que constituye una contribución novedosa. Igualmente es novedosa la propuesta de relación PIB-tasa de movilización por deslizamientos, como expresión simplificada de ese tipo de cambios.

Ese análisis temporal ha constituido también la base para desarrollar y validar métodos e instrumentos de análisis para la predicción del comportamiento futuro de los procesos analizados. Los resultados obtenidos por medio de los modelos aplicados ponen de manifiesto que la hipótesis de trabajo, y las suposiciones en que se basa, son



válidas en lo esencial. No obstante, la capacidad predictiva de los modelos no es, ni mucho menos, perfecta. Esto puede deberse, en parte, a que alguna de dichas suposiciones no es del todo correcta (por ejemplo, los datos sobre la influencia humana muestran que no es estrictamente cierto que el funcionamiento futuro del sistema sea igual que en el pasado, incluso a escala de décadas). Por otro lado, parece claro que los resultados mejorarían incluyendo algunas variables no incorporadas al análisis (por ejemplo, estructura) o bien mejorando la precisión y/o la forma de expresión de otras (espesor de regolito, litología, etc.).

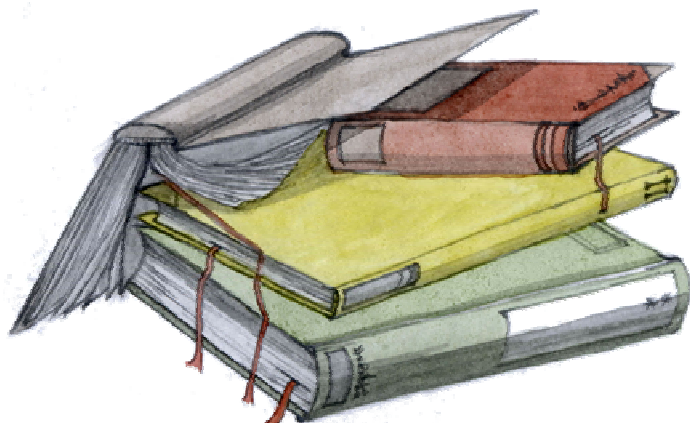
A partir de los resultados y conclusiones obtenidos se pueden identificar algunas líneas de trabajo que permitirían profundizar en el análisis de los problemas aquí tratados:

- Una mejora en la capacidad predictiva de los modelos y de su aplicación en otros ámbitos puede lograrse a través de:
  - Inclusión de variables adicionales, no consideradas en este trabajo (las relaciones estructura/topografía son probablemente la más importante).
  - Mejora de la expresión y/o precisión de ciertas variables, como por ejemplo, el espesor de regolito (deseablemente como variable casi continua) o las variables relativas a rasgos micromorfológicos (por ejemplo, la rugosidad).
  - Mejor caracterización de las condiciones hidrológicas subsuperficiales. En este sentido, la teledetección puede proporcionar algunos indicadores útiles.
  - Mejora en la representación de los rasgos de inestabilidad como evidencias para el análisis.
  - Profundizar en la validación para caracterizar mejor la validez predictiva de los modelos y para perfeccionar de los mismos.
  - Tratamiento sistemático de los criterios de experto para su incorporación objetiva en la modelización de la susceptibilidad.
  - Desarrollo de procedimientos basados en los métodos aquí presentados para la evaluación de riesgos, incorporando parámetros físicos y socioeconómicos, así como la validación independiente de la clasificación de riesgos a través de los daños reales producidos.

- Incorporación de modelos de simulación de la progresión de las masas deslizadas a los mapas de susceptibilidad o de probabilidad espacio-temporal, para obtener mapas de amenazas más completos.
  - Aplicación del análisis a otros tipos cinemáticos de movimientos en masa.
  - Aplicación de estos métodos en otros contextos morfoclimáticos, como por ejemplo zonas tropicales húmedas, zonas frías o periglaciares, etc.
  - Aplicar los modelos predictivos mediante funciones de favorabilidad a otros ámbitos de las ciencias de la tierra y del medio ambiente (por ejemplo, a otros procesos geodinámicos externos, a la obtención de índices de calidad ambiental, etc.).
- Evolución geomorfológica:
- Realización de análisis similares de la evolución temporal de los deslizamientos en otros ambientes morfoclimáticos y socioeconómicos, con el fin de determinar si las tendencias de aumento en las tasas de movilización son generalizables, tanto a escala de siglos como de décadas.
  - Comprobación de la hipótesis representada por la relación entre PIB y frecuencia de deslizamientos que aquí se propone. Para ello sería deseable analizar el proceso en zonas en las que este proceso sea muy activo y, además, muestren una gran dinámica poblacional y/o económica.
  - Desarrollo y aplicación de otras técnicas para la datación de movimientos recientes, distintas de la fotointerpretación; estas pueden incluir la teledetección (aunque sólo para los últimos años); la aplicación de ciertos rasgos morfométricos o de vegetación como indicadores de edad; utilización de técnicas de datación absoluta como Cs-137, dendrocronología, liquenometría, etc., si bien en este caso las posibilidades de aplicación a zonas amplias son más limitadas.







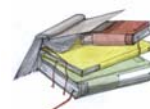
## Cap 8. Referencias bibliográficas





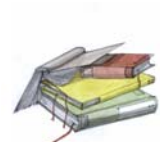
## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agterberg, F.P.; Bonham-Carter, C.F. and Wright, D.F.** 1990. Statistical pattern integration for mineral exploration. In, Gaal, G. and Merriam, D.F. (Eds.): *Computer Application in Resource Estimation, Prediction and Assessment of Metals and Petroleum*. Pergamon Press, New York: 1-21.
- Ahnert, F.** 1976. Brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of landform development. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 25: 29-49.
- Alexander, D.** 1993. *Natural Disasters*. UCL Press. London.
- Aller, J. and Zeyen, H.J.** 1994. Interpretación en 2 1/2D de la anomalía magnética del País Vasco: implicaciones geodinámicas. *Cuaderno Laboratorio Xeológico de Laxe*, Vol. 19: 151-162.
- Anbalagan, R.** 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32: 269-277.
- Anderson, M.G. and Richards, K.S.** 1987. Modelling slope stability: the complementary nature of geotechnical and geomorphological approaches. In, Anderson, M.G. and Richards, K.S. (Eds.): *Slope stability. Geotechnical engineering and geomorphology*. Wiley & Sons, N. York, 1-9.
- Arapis, G.; Petrayev, E.; Shagalova, E.; Zhulova, O.; Sokolik, G. & Ivanova, T.** 1997. Effective migration velocity of Cs-137 and Sr-90 as a function of the types of soils in Belarus. *Journal of Environmental Radioactivity*, 34, 2: 171-185.
- Arnould, M. and Frey, P.** 1977. Analyse détaillée des reponses a l'enquête internationale sur les glissements de terrain. *Bulletin LAEG*, Vol. 17: 263-274.
- Aronoff, S.** 1989. *Geographical Information Systems: a Management Perspective*. WDL Publications, Ottawa.
- Aronson, G. and Linde, K.** 1982. Grand Canyon; a quantitative approach to the erosion and weathering of stratified bedrock. *Earth Surface Processes and landforms*, 7, 6: 589-600.



- Aspinall, R.J.** 1992. An inductive modeling procedure based on Baye's theorem for analysis of pattern in spatial data. *International Journal of Geographic Information Systems*. V. 6, n. 2: 105-121.
- Ayala, F.J.** 1988. Introducción a los riesgos geológicos. En: *Riesgos Geológicos*, Madrid, IGME: 3-19.
- Ayala, F.J.** 1991. Los peligros naturales en las evaluaciones de impacto ambiental en obras civiles. En: *Evaluación y Corrección de Impactos Ambientales, Serie de Ingeniería Ambiental*:95-104.
- Ayala, F.J.** 1995: Probabilidad y vulnerabilidad en movimientos de ladera. En: *Reducción de riesgos geológicos en España*. ITGE. Madrid: 95-113.
- Ayala, F.J. y Durán, J.J. (Eds.)** 1988. *Riesgos geológicos*. Madrid. IGME.
- Ayala, F.J. & Ferrer, M.** 1989. Extend and economic significance of landslides in Spain. In: Brabb, E.E. & Harrod, B.L. (eds.), *Landslides. Extend and Economic Significance*. Balkema, Rotterdam: 169-178.
- Ayala, F.J.; Elízaga, E.; González de Vallejo, L.I.; Durán, J.J.; Beltrán de Heredia, F.; Oliveros, M.A.; Carbó, A.; Guillamont, M.L. y Capote, R.** 1987. *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*. IGME, Madrid.
- Ayala, F.J.; Ferrer, M.; González de Vallejo, L.I.; Beltran de Heredia, F.** 1988. *Catálogo nacional de riesgos geológicos*. ITGE. Madrid.
- Baeza, C.** 1994. *Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Inédita.
- Baeza, C. & Corominas, J.** 1996. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques. In Senneset, K. (ed.), *Landslides-Glisements de terrain. VII International Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway, 1996. Balkema, Rotterdam: 147-158.
- Bell, F.G.** 1994. Floods and Landslides in Natal and Notably the greater Durban areas, September 1987, a retrospective view. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31: 59-74.
- Bell, F.G.** 1998. *Environmental Geology. Principles and Practice*. Blackwell, Oxford.

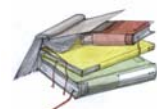
- Benito, E.; Soto, B. and Díaz-Fierros, F.** 1991. Soil erosion in NW Spain. In, Sala, M.; Rubio, J.L. and García-Ruiz, J.M. (Eds.): *Erosion studies in Spain. Geoforma*, Logroño: 55-74.
- Bertens, J.; Weichselgartner, J.; González-Díez, A. & Cendrero, A.** 2001. A methodological proposal for the assessment of geomorphological risks based on vulnerability indicators; application to a study area in northern Spain. *Natural Hazards*. Enviado.
- Bjerrum, L.** 1967. Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clays and clay shales. *Amererican Society Civil Engineering Proceedings*. V. 93, p5456.
- Bjerrum, L.; Loken, T.; Heiberg, S. & Foster, R.** 1969. A field study of factors responsible for quick clay slides. *Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mejico, 2: 531-540.
- Blagoeva, R. and Zikovsky, L.** 1995. Geographic and vertical distribution of Cs-137 in soils in Canada. *Journal of Environmental Radioactivity*, 27: 269-274.
- Blanc, R.P. and Cleveland, G.B.** 1968. Natural Slope Stability as Related to Geology, San Clemente Area, Orange and San Diego Counties, California. *California Division of Mines and Geology, Special Report*, 98.
- Blong, R.J.** 1973. A numerical classification of selected landslides of debris-slide-avalanche-flow type. *Engineering Geology*, 7: 99-114.
- Bolton, H.** 1975. Earthquake effects on soil foundation systems. In: Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y. (Eds.): *Foundation Engineering Handbook*. Van Nostrand Reinhold Co. USA.
- Bonham-Carter, G.F.** 1991. Integration of scientific data using GIS. In: *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds.) Longman Scientific & Technical. Ottawa, Canada.
- Bonnard, C.H. & Noverraz, F.** 1984. Instability risk maps: from the detection to the administration of landslide – prone areas. *4<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, Toronto, 2: 536-588.
- Borgefors, G.** 1986. Distance transformation in digital images. *Computer Vision, Graphic and Image Processing*, 34: 344-371.



- Boussouf, S.; Irigaray, C. and Chacón, J.** 1994. Cartographie de l'aléa des mouvements du versants du bord nord-occidental de la dépression de Grenade (Espagne). *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International LAEG Congress.* Balkema, Rotterdam: 2223-2230.
- Brabb, E.E.** 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. *4<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, Toronto, 1: 307-323.
- Brabb, E.E.; Pampeyan, E.H. and Bonilla, M.G.** 1972. Landslide Susceptibility in San Mateo County, California. U.S. *Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF-360.
- Brabb, E.E. & Harrod, B.L. (eds.).** 1989. *Landslides. Extend and Economic Significance.* Balkema, Rotterdam.
- Brancaccio, L.; Castiglioni, G.B.; Chiarini, E.; Cortemiglia, G.; D'orefice, M.; Dramis, F.; Graciotti, R.; La Posta, E.; Lupia Palmieri, E.; Onorati, G.; Panizza, M.; Pannuzi, L.;Papasodaro, F. e Pellegrini, G.B.** 1994. Carte Geomorfológica d'Italia – 1:50.000. Guida al Rilevamento. Gruppo di Lavoro per la Cartografia Geomorfológica. *Servizioli Geologico Nazionale. Quaderni serie III*, Vol. 4. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Brand, E.W.** 1985. Predicting the performance of residual soil slopes. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.*, 5: 2541-2578.
- Brand, E.W. & Hudson, R.R.** 1982. CHASE- An empirical approach to the design of cut slopes in Hong-Kong soils. *Proceedings 7<sup>th</sup> Southeast asian geotechnical Conference*, Hong-Kong. 1: 1-16.
- Brand, E.W.; Premchitt, J. & Philipson, H.B.** 1984. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. In *Proceedings of the IV International Symposium on Landslides*, Toronto, 1: 377-384.
- Briggs, R.P.** 1974. Map of Overdip Slopes that can Affect Landsliding in Allengheny County, Pennsylvania. *U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF-543.
- Brown, L.F.; Fisher, W.L.; Erxleben, A.W. & Mc Gowen, J.M.** 1971. Resource capability units; their utility in land and water use management, with examples

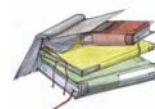
from the Texas Costal Zone. *Geological Circular Bureau Economic Geology.*, num. 71-1. Univ. of Texas at Austin.

- Brum, A. de; Zêzere, J.L.; Rodrigues, M.L.; Reia, E. and Vieira, G.** 1998. National Report of the University of Lisbon. In, Corominas, J.; Moya, J.; Ledesma, A.; Gili, J.A.; Lloret, A. and Rius, J. (Eds.): *New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe (NEWTECH)*. Final Report of the Project (CEC Environment Programme, Contract ENV-CT96-0248), Universidad Politécnica de Cataluña: 363-400.
- Brunsdén, D.** 1973. The application of Systems theory to the study of mass movement. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 8: 185-207.
- Brunsdén, D.** 1984. Mudslides. In Brunsdén, D. and Prior, D.B. (Eds.): *Slope Instability*. Wiley, Chichester: 363-418.
- Brunsdén, D.** 1985. Landslides types, mechanisms, recognition, identification. In: Morgan, C.S. (ed.), *Landslides in South Wales Coalfield, Proceedings Symposium Poly. of Wales*: 19-28.
- Brunsdén, D.** 1987. Principles of hazard assessment in neotectonic terrains. *Memorandum Geological Society. China*, 9: 305-334.
- Brunsdén, D.** 1993. Mass movements; the reseach frontier and beyond: A geomorphological approach. *Geomorphology*, 7: 85-128.
- Brunsdén, D. and Ibsen, M.L.** 1994. The nature of the European archive of historical landslide data, with specific reference to the United Kingdom. In, Casale, R.; Fantechi, R. and Flageollet, J.C. (Eds): *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. Final Report*, V. 1: 22-70.
- Brunsdén, D. and Jones, D.K.C.** 1976. The evolution of landslide slopes in Dosert. *Phil. Trans. Royal Society*. London, 283: 605-631.
- Brunsdén, D.; Doornkamp, J.C.; Fookes, P.G.; Jones, D.K.C. and Kelly, J.M.H.** 1975. Large scale geomorphological mapping and highway engineering desing. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8: 227-253.
- Burrough, P.A.** 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Claredon Press, Oxford.



- Burton, I. and Kates, R.W.** 1964. Perception of Natural Hazards in Resource Management. *Natural Resources Journal* 3: 412-441.
- Burton, I.; Kates, R.W. and White, G.F.** 1968. The human ecology of extreme geophysical events: *Natural Hazards Research Working Paper* N° 1, Toronto. Department. of Geography, University of Toronto.
- Burton, I.; Kates, R.W. and White, G.F.** 1978. *The environment as hazard*. Oxford University Press, New York.
- Busquets, P.** 1981. *Estratigrafia i sedimentologia del terciari prepirinenc entre els rius Llobregat i Freser-Ter*. Tesis Doctoral. Facultad de Geología, Universitat de Barcelona, España. Inédita.
- Campbell, R.H.** 1973. Isopleth map of landslide deposits, Point Dume Quadrangle, Los Angeles County, California; an experiment in generalising and quantifying aerial distribution of landslides. *US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF-535 (1:24.000).
- Campbell, R.H.** 1975. Soil slips, debris flow, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California. *U.S. Geological Survey, Profesional Paper* 851
- Canutti, P.; Frascati, F.; Garzonio, C.A. and Rodolfi, G.** 1979. Dinamica Morfológica di un ambiente sogetto a fenomeni franosi e ad intensa attività agricola. *Centro National della Recherche Pubblicazione* N° 142, Firenze, Italia: 81-102.
- Capel Molina, J.** 1981. Los climas de España. *Colección "Ciencias Geográficas"*, Oikos-tau Edic., Barcelona.
- Carrara, A.** 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, V. 15: 403-426.
- Carrara, A.** 1988. Drainage and Divide Networks Derived from High-Fidelity Digital Terrain Models. In: Chung, C.F. et al (Eds.): *Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources*, D. Reidel Publishing Company: 581-597.
- Carrara, A.** 1992. Landslide hazard assessment. *Proceedings 1er Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de riesgos Naturales*, Bogotá, Colombia: 329-355.

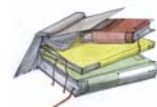
- Carrara, A.** 2000. Geomorphological and historical data in predicting landslide hazard. *Intensive workshop on Recent Advances on Landslide Susceptibility and Hazard mapping based on GIS*. Castro Urdiales.
- Carrara, A. and Merenda, L.** 1974. Metodologia per un censimento degli eventi franosi in Calabria. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, vol. X: 237-255.
- Carrara, A. and Merenda, L.** 1976. Landslide Inventory in the Northern Calabria, Southern Italy. *Bulletin Geological Society of America.*, Vol. 87, N° 8: 1153-1162.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Psqui, V. and Reichenbach, P.** 1990. Geographical Information Systems and Multivariate Models in Landslide Hazard Evaluation. In *Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference and Field Workshop on Landslides: Alps'90 Milan*. Cancelli, A. (ed.): 17-28.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Psqui, V. and Reichenbach, P.** 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 16: 427-445.
- Carrara, A.; Cardinali, M. and Guzzetti, F.** 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal*, v. 1992: 2: 172-183.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F. and Reichenbach, P.** 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A. And Guzzetti, F. (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher. The Netherlands, :135-175.
- Carrara, A.; Carla, R.; De Fent, I. e Giovannini, F.** 1996. Analisis comparata di tecniche per la generazione di modelli digitali del terreno. *Revista Italiana Telerilevamento*, 6: 53-62.
- Carrara, A.; Catalano, E.; Sorriso Valvo, M.; Reali, C. and Osso, I.** 1978. Digital Terrain Analysis for Land Evaluation. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. 13: 69-127.
- Carrara, A.; D'Elia, B. and Semenza, E.** 1985. Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XX, P. II: 223-243.



- Carrara, A.; Pugliese, E. and Merenda, L.** 1977. Computer-based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. *Z. Geomorph. N.F.* 21 (2): 187-222.
- Carson, M.A.** 1976. Mass wasting, slope development and climate. In, Derbyshire, E. (Ed.): *Geomorphology and climate*. Wiley. New York: 101-136.
- Carson, M.A. and Kirkby, M.J.** 1972. *Hillslope form and process*. Cambridge University Press. London.
- Carte, J.R.** 1988. Digital representation of topographic surfaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11): 1577-1580.
- Casale, R.; Fantechi, R. and Flageollet, J.C. (Eds.)**. 1994. *The temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community*; Vol: I and II. Comm. Europ. Comm. Prog. EPOCH, Contract 90 0025, Final Report.
- Cavallin A.; Marchetti M.; Panizza M. and Soldati M.** 1994. The role of geomorphology in environmental impact assessment. *Geomorphology*, 9: 143-153.
- CEN/TC 287.** 1998. Geographic Information – Overview. "Z13C/PUBLIC/DOC/13425.PDF">http:// www.forum.afnor.fr/afnor/WORK/AFNOR/GPN"/>"Z13C/PUBLIC/DOC/13425.PDF (29-marzo-2000).
- Cendrero, A.** 1975. *El mapa geológico ambiental en la evaluación de los recursos naturales y en la planificación del territorio. Su aplicación a la zona de Santander y su bahía*. Universidad de Cantabria. Secretariado de Publicaciones. Santander.
- Cendrero, A.** 1997. Riesgos naturales e impacto ambiental. En Novo, M. Y Lara, R. (Coords.): *La Interpretación de la Problemática Ambiental: Enfoques Básicos*. Vol. II: 23-84. Colección Medio Ambiente y Educación Ambiental. Madrid, Fundación Universidad-Empresa.
- Cendrero, A. y Díaz de Terán, J.R.** 1985. Caracterización cuantitativa de los procesos de erosión en las series volcánicas en la isla de la Gomera (Canarias). *Actas, I Reunión de Cuaternario Ibérico*, vol. I, Lisboa: 531-543.
- Cendrero, A & Dramis, F.** 1996. The contribution of landslides to landscape evolution in Europe. *Geomorphology*, 15: 191-211.
- Cendrero, A; Díaz de Terán, J.R.; Fernandez, O.; Garrote, R.; González Lastra, J.R.; Inoriza, I.; Lütting, G.; Otamendi, J.; Pérez, M.; Serrano, A. and**

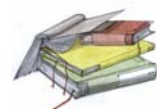


- Grupo “Ikerlana”.** 1987a. Detailed geomorphological hazard mapping for urban and rural planning in Vizcaya (Northern Spain). In: Wolf, F.C. (ed.), *Geology for environmental planning*. Geological Survey of Norway, Special Publ. 2, Trondheim: 25-41.
- Cendrero, A; Díaz de Terán, J.R.; Fernandez, O.; Garrote, R.; González Lastra, J.R.; Inoriza, I.; Lütting, G.; Otamendi, J.; Pérez, M. y Serrano, A.** 1987b. Establecimiento de tipos de estabilidad de laderas en función de parámetros objetivos, aplicación a escala 1:5.000 a un área de Vizcaya. *Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. II Reunión Nacional, Valencia. Comunicaciones.* II: 1035-1051.
- Cendrero, A; Díaz de Terán, J.R.; Fernandez, O.; Garrote, R.; González Lastra, J.R.; Inoriza, I.; Lütting, G.; Otamendi, J.; Pérez, M. y Serrano, A.** 1987c. Metodología para la elaboración de mapas de riesgo. *Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. II Reunión Nacional, Valencia. Comunicaciones.* II: 843-870.
- Cendrero, A.; Díaz de Terán, J.R.; Farias, P.; Fernández-Menéndez, S.; González-Díez, A.; Jiménez, M.; Marquínez, J.; Menéndez-Duarte, R. y Salas, L.** 1994. Temporal distribution and contribution of landslides to landscape evolution from Late Pleistocene to Present in the Cantabrian Cordillera, Spain. In, Casale, R.; Fantechi, R. and Flageollet, J.C. (Eds.): *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community*. European Commission, Bruselas, EUR 15805 EN: 425-506.
- Cendrero, A.; Francés, E. y Díaz de Terán, J.R.** 1992. Geoenvironmental Units as a Basis for the Assessment, Regulation and Management of the Earth's Surface. In, Cendrero, A.; Lütting, G and Wolff, F.C. (Eds.): *Planning the Use of the Earth's Surface. Lecture Notes in Earth Sciences*. Springer-Verlag. Berlin: 199-234.
- Chacón, J. e Irigaray, C.** 1999. Previsión espacial de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante SIG. En: Laín, L. (ed.): *Los sistemas de información geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente*. ITGE- Ministerio de Medio Ambiente, ITGE: 113-123.



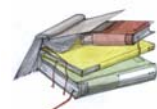
- Chacón, J.; Irigaray, C. & Fernandez, T.** 1992. Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un SIG. *III Simposium. Nacional de laderas y taludes inestables*, vol. 2: 121-133.
- Chacón, J.; Irigaray, C. & Fernandez, T.** 1994. Large to middle scale landslides inventory, analysis and mapping with modelling and assessment of derived susceptibility, hazard and risks in a GIS. *7<sup>th</sup> International LAEG Congres.* Lisboa. Vol. VI: 4669-4678. Balkema (Rotterdam).
- Chacón, J.; Irigaray, C. y Hamdouni, R.** 1996. Consideraciones sobre los riesgos derivados de los movimientos de terreno, su variada naturaleza y las dificultades de su evaluación. *Actas VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada. Vol. 1: 407-418.
- Chacón, J.; Irigaray, C.; Hamdouni, R. and Fernandez, T.** 1996. From the inventory to the risk analysis: improvements to a large scale GIS method. In: *Landslides, Proceedings. 8<sup>th</sup> ICFL*, Granada, Vol. 1: 335-342. Balkema, Rotterdam.
- Chamard, O; Velasco, R.H.; Belli, M; di Silvestro, G.; Ingrao, G. and Sansone, U.** 1993. Caesium-137 and Strontium-90 distribution in a soil profile. *Science of the Total Environment*, 136: 251-258.
- Chandler, R.J.** 1974. Lias Clay: the long term stability of cutting slopes. *Geotechnique*, 24: 21-38.
- Chapman, D.** 1994. *Natural Hazards*. Oxford University Press, Melbourne:
- Chowdhury, R.N.** 1984. Recent development in landslide studies: Probabilistic methods. *IV International Symposium on Landslides*, Toronto. Vol. 1: 209-220.
- Christian, C.S.** 1957. The concept of land units and land systems. *Proceedings 9<sup>th</sup> Pacific Science Congress* 20: 74-81.
- Chung, C.F.** 1983. Integrated computer system for use in evaluation of mineral and energy resources. *Mathematical Geology*, Vol. 15: 1: 47-58.
- Chung, C.F. and Agterberg, F.P.** 1980. Regression models for estimating mineral resources from geological map data. *Mathematical Geology*, Vol. 12:5: 473-488.
- Chung, C.F. and Fabbri, A.** 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*, Vol. 2, No. 2: 122-139.

- Chung, C.F. and Fabbri, A.** 1998. Three Bayesian prediction models for landslide hazard. In, Bucciantti, A. (ed.): *Proceedings of International Association for Mathematical Geology, 1998 Annual Meeting (IAMG'98)*, Ischia, Italy: 204-211.
- Chung, C.F. and Fabbri, A.** 1999a. Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, Vol. 65, No. 12: 1389-1399.
- Chung, C.F., and Fabbri, A.** 1999b. *Prediction Models in Spatial Data Analysis*. Lecture Note. May 1998, Inédito.
- Chung, C.F. and Fabbri, A.** 2000. Prediction models for landslide hazard using fuzzy set approach. In, Marchetti, M. and Rivas, V. (eds.): *Geomorphology and Environmental Impact Assessment*. Balkema, the Netherlands. En prensa.
- Chung, C.F. and Leclerc, Y.** 1994. A quantitative technique for zoning landslide hazard. *Papers and Extended Abstracts for Technical Programs of IAMG'94. International Association for Mathematical Geology Annual Conference*, Mont Tremblant, Quebec, Canada: 87-93.
- Chung, C.F.; Fabbri, A. and Van Westen, C.J.** 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.): *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands: 107-133.
- Cung, C.F.; Obayashi, S. and Kojima, H.** 1997. Strategy for application of quantitative prediction models for slope stability evaluation. In, *Proceedings of the 52<sup>th</sup> Annual Conference of Japan Society of Civil Engineering*, Tokyo, Japón: 278-279.
- Chung, C.F.; Garson, D.; Ping, A.; and Zhang, A.** 1998. *Spatial Data Integration Software Package for Prediction Models*. CD-ROM containing Spatial Data Integration Software Version 1.0 for MS Windows NT, Windows 95/98, and SGI Irix 5.3/6.2. February 1998. Inédito.
- Churinov, M.V. et al.** 1981. Recent prognosis methods of landsliding processes (in Russian). *Science press*, Moscow: 24-28.
- CIDS.** 1977. Modelo de procesamiento de datos para la ordenación territorial. Centro de Investigación y Desarrollo de Santander. Peña Cabarga, Santander.



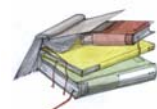
- Clark, S.P. and Jagger, E.** 1969. Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data. *American Journal of Science*, 267: 1143-1160.
- Clotet, N.** 1984. *La dinámica geomorfológica actual responsable del subministrament de cabals sòlids en una conca muntanyosa: La conca de La Baells (Alt Llobregat)*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona.
- Coates, D.R.** 1977. Landslide perspectives. In: *Landslides*, Coates, D.R. (ed.). *Geological Society of America*: 3-28.
- Colin-Rouse, W. & Farhan, Y.I.** 1976. Threshold slopes in South Wales. *Quarterly Journal Engineering Geology.*, 9: 327-338.
- Conacher, A.J. and Dalrymple, J.B.** 1977. The nine unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma*, 18: 1-154.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.** 1999. *Análisis, evaluación y zonificación de riesgos naturales en municipios de Cantabria: Suances, Ampuero, Torrelavega, Luena y Corvera de Toranzo*. Gobierno de Cantabria. Inédito.
- Cooke, R.U. & Doornkamp, J.C.** 1990. *Geomorphology in Environmental Management*. Oxford University Press, Oxford, England.
- Corbel, J.** 1964. L'érosion terrestre, étude quantitative (méthodes-techniques-résultats). *Annales de Géographie*, 73: 1281-1286.
- Corominas, J.,** (coordinador). 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.** 1989. Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. En: *Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales*, Corominas, J. (ed.). Monografía de la Sociedad Española de Geomorfología, 3: 1:30.
- 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.** 1992. Landslide Risk Assessment and Zoning. In, Cendrero, A.; Lüttig, G and Wolff, F.C. (Eds.): *Planning the Use of the Earth's Surface. Lecture Notes in Earth Sciences*. Springer-Verlag. Berlin: 141-173.

- Corominas, J. (Ed.)** 1993. General review on the landslide activity in the Eastern-Central Pyrenees Region. In: *Rainfall induced in selected mediterranean mountainous zones of Italy, Spain and Greece: the application of Geographical Information System to hazard mapping*. Programa EPOCH.
- Corominas J, y Baeza C.** 1991. Landslide occurrence in eastern Pyrenees. In *Movimenti franosi e metodi di stabilizzazione*. Del Prette (ed.). 25-42.
- Corominas, J. y Moya, J.** 1996. La datación de deslizamientos: implicaciones dinámicas y climáticas. *Actas VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada. Vol. 1: 337-356.
- Corominas, J.; Baeza, C. & Salueña, I.** 1995. The influence of geometrical slope characteristics and land use on the development of shallow landslides. In: Bell (ed), *Landslides-Glislements de terrain. VI International Symposium on Landslides*, Christchurch, New Zealand, 1992. Balkema, Rotterdam: 919-924.
- Corominas, J.; Fleta, J.; Goula, X.; Moya, J.; y Teixidor, T.** 1992. Datación de movimientos antiguos en el área de Pardines (Girona). *III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. La Coruña, 1: 71-82.
- Corominas, J.; Moya, J.; Ledesma, A.; Gili, J.A.; Lloret, A. and Rius, J. (Edts.)**. 1998. *New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe* (NEWTECH). European Community. CEC Environment Programme (Contract ENV-CT96-0248). Final Report. Universidad Politécnica de Catalunya. Inédito.
- 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. (eds.), Andorra: 195-207.
- Corominas, J.; Weiss, E.E.J.; van Steijn, H. and Moya, J.** 1994. Use of dating techniques to assess landslide frequency exemplified by case studies from European Countries. In, Casale, R.; Fantechi, R. and Flageollet, J.C. (Eds.): *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community*. European Commmission. EUR 1580EN. Vol. 1: 71-94.



- Corominas, J.; Santacana, N.; Tous, T.; & van der Looi, M.** 2000. Stability analysis of the Vallcebre translational slide, Eastern Pyrenees (Spain) by means of a GIS. *Intensive Workshop on recent Advances on Landslide Susceptibility and hazard mapping based on GIS. Congreso de Castro Urdiales.*
- Costa, J.E. & Baker, V.R.** 1981. *Surficial Geology. Building with the Earth.* Wiley. New York.
- Cotecchia, V.** 1978. Systematic reconnaissance mapping and registration of slope movements. *Bulletin of the international Association of Engineering Geologists*, 17: 5-37.
- Cotecchia, V. & Melidoro, G.** 1974. Some principal geological aspects of the landslides of Southern Italy. *Engineering Geology*, 9: 23-32.
- Cotton, B.; Degraff, J. And Hart, M.** 1996. Recognition, Investigation and Mitigation of Landslides. *Geological Society of America*, Denver.
- Crozier, M.J.** 1984. Field assessment of slope instability. In: D. Brunsden and D.B. Prior (Editors), *Slope Instability.* Wiley, New York, 103-142.
- Crozier, M.J.** 1986. *Landslides: causes, consequences & environment.* London: Croom Helm.
- Crozier, M.J.** 1995. Theme report. In *Landslides-Glissements de Terrain, VI International Symposium on Landslides.* Christchurch, New Zealand, 1992. Balkema, Rotterdam, Vol. 3: 1843-1848.
- Cruden, D.M.** 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 43: 27-29.
- Cruden, D.M. and Varnes, D.J.** 1996. Landslide types and processes. In Turner, A.K. and Schuster, R.L. (Eds.): *Landslides: Investigation and mitigation.* Transport Research Board, Special Report. 247: 36-75.
- Cruz, J. y Tamés, P.** 1983: Análisis cuantitativo de la red de drenaje de la cuenca del río Deba. Lurralde. *Investigación y espacio.* 95-117.
- Cuadras, C.M.** 1991. *Métodos de Análisis Multivariante. Colección estadística y análisis de datos.* Ed. Eunibar.
- Cuevas, J.; Aranguren, A.; Badillo, J.M. y Tubia, J.M.** 1999. Estudio estructural del sector central del Arco Vasco (Cuenca Vasco-Cantábrica). *Boletín Geológico y Minero.* Vol. 110-1: 3-18.
- Cuvier, G.** 1817. *Essay on the theory of the earth.* Blackwood. Edinburgh.

- Dalrymple, J.B.; Blong, R.J. and Conacher, A.J.** 1968. A hypothetical nine-unit land surface model. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 12: 60-76.
- David, M.; Dagbert, M. and Beauchemin, Y.** 1977. Correspondence analysis. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 72: 1-45.
- DeGraff, J.V. and Romesburg, H.C.** 1980. Regional landslide susceptibility assessment for Wildland management: a matrix approach. In Coates, D.R. and Vitek, J.D. (eds.): *Thresholds in Geomorphology*, Allen & Unwin Ltd., London :401-414.
- Deregnacourt, D. et Boillot, G.** 1982. Structure géologique du Golfe de Gascogne. *Bulletin Du B.R.G.M.*, 2, I, 3: 149-178.
- Dhakai, A.S.; Amada, T. and Aniya, M.** 1999. Landslide hazard mapping and the application of GIS in the Kulekhani Watershed, Nepal. *Mountain Research and Development*, Vol. 19, No. 1: 3-16.
- Díaz de Terán, J.R. y Cendrero, A.** 1992. Riesgos geológicos en España: Estado de la Cuestión. *III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*, Salamanca. Simposios, Tomo 2: 671-745.
- Díaz de Terán, J.R.; Cendrero, A.; Araña, V.; Badiola, E.R.; Berga, L.; Carracedo, J.C.; Chacón, J.; Coello, J.; Corominas, J.; Dabrio, C.J.; Durán, J.J.; Elízaga, E.; Ferrer, M.; García Fernández, M.; Garzón, M.G.; González Díez, A.; Goy, J.L.; López Martínez, J.; Martínez-Goytre, J.; Mexcua, J.; de la Nuez, J.; Salinas, J.L.; Soler, V.; del Val, J. and Zaza, C.** 1997. Geomorphological hazards in Spain. In Embleton, C. and Embleton-Hamann, C. (Eds.): *Geomorphological Hazards of Europe*. Elsevier, Amsterdam: 429-456.
- Díaz de Terán, J.R.; Remondo, J.; González-Díez, A.; Cendrero, A.; Marquínez, J. and Menéndez, R.** 1998. National Report of the University of Cantabria. In, Corominas, J.; Moya, J.; Ledesma, A.; Gili, J.A.; Lloret, A. and Rius, J. (Eds.): *New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe (NEWTECH)*. Final Report of the Project (CEC Environment Programme, Contract ENV-CT96-0248), Universidad Politécnica de Cataluña: 102-128.

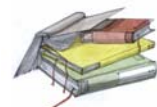


- Dikau, R.; Brabb, E.E. and Mark, R.M.** 1988. Landform classification of New Mexico by computer. *US. Geological Survey*, Open file report : 91-634.
- Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L. and Ibsen, M. (Eds.)**. 1996a. *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley & Sons, Chichester.
- Dikau, R.; Schrott, L.; Dehn, M.; Hennrich, K. and Rasemann, S.** 1996b. *The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with respect to Climatic Change (TESLEC)*. European Community. CEC Environment Programme (Contract No. EV5V-CT94-0454). Final Report Vols. I and II. Universität Heidelberg, Germany. Inédito.
- Dillon, W.R. and Goldstein, M. (Eds.)**. 1986. *Multivariate analysis. Methods and Applications*. J. Wiley and Sons. New York.
- Diputación Foral de Guipúzcoa.** 1986a. *Estudio de Riesgos Naturales del Territorio Histórico de Guipúzcoa (2ª Fase)*. Términos de Deba, Mendaro, Elgoibar y Eibar. Memorias, Anexos y Mapas. Inédito.
- Diputación Foral de Guipúzcoa.** 1986b. *Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa 1:25.000*. Hojas de Ondárroa, Eibar, Zumaya y Azcoitia. Compañía General de Sondeos, S.A. Memorias, Mapas y Anexos. Inédito.
- Diputación Foral de Guipúzcoa.** 1991. *Geomorfología y edafología de Gipuzkoa*. San Sebastian.
- Diputación Foral de Guipúzcoa.** 1999. *Estudio de precipitaciones intensas, tiempos de concentración y caudales de cálculo de las cuencas del Territorio Histórico de Gipuzkoa*. Documento nº 6. Inédito.
- Diputación Foral de Vizcaya.** 1984. *Lluvias torrenciales, agosto 1983: cuantificación de la catástrofe*. Diputación. Foral Vizcaya, Bilbao.
- Doyle, F.J.** 1978. Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44 (12): 1481-1485.
- Draper, N.R. and Smith, H.** 1981. *Applied Regression Analysis*, 2<sup>nd</sup> Edition. Wiley, New York.
- Duque, A.; Echeverría, G.; Fernández, E.; Kerejeta, A.; Cendrero, A. y Tamés, P.** 1990a. Ensayo de un modelo empírico de carácter predictivo para la



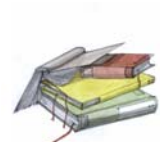
evaluación de la inestabilidad de laderas. *Comunicaciones IV Reunión Nac. Geol. Amb. y Ord. Territorio*. Gijón: 105-113.

- Duque, A.; Echeverría, G.; Fernández, E.; Kerejeta, A.; Cendrero, A. y Tamés, P.** 1990b. Comprobación empírica de metodologías para la elaboración de mapas de amenaza de inestabilidad de laderas; aproximación de un modelo general de evaluación del riesgo. In, Hermelin, M. (ed.): *Environmental Geology and Natural Hazards in the Andean Region*. AGID Report nº 13: 189-206. Pereira, Colombia.
- Duque, A.; Echeverría, G.; Fernández, E.; Kerejeta, A.; Cendrero, A.; Díaz de Terán, J.R. y Tamés, P.** 1991. A methodological approach for the development of predictive models for hazard assessment. In, Panizza, M.; Soldati, M. and Coltellacci, M.M. (eds.): *Proceedings European Experimental Course on Applied Geomorphology*. Instituto di Geologia. Università degli Studi di Modena, Modena, Italia. Vol.2: 13-25.
- Dunkerley, D.L.** 1980. The study of the evolution of slope form over long periods of time: a review of methodologies and some new observational data from papua, New Guinea. *Zeland Geomorphology*. N.F., 24: 52-67.
- Eardley, A.J. and Viavant, W.** 1967. Rates of denudation as measured by bristlecone pines, Cedar Breaks Utah. *Utah Geological and Mineral Survey Special Studies*, 21: 1-13.
- EASI/PACE.** 1997. Manuales del programa, Versión 6.2, Canadá. <http://www.pcigeomatics.com>
- Edeso, J.M.; González, M.J.; Marauri, P.; Merino, A.; Larrión, J.A. y Zulueta, I.** 1991. *Repercusiones de los cambios de uso del suelo en la pérdida de recursos ambientales y la dinámica del ecosistema*. Escuela Ing. Téc. Indust. y Topografía. Vitoria, Universidad del País Vasco. Inédita.
- Edeso, J.M.; Merino, A.; González, M.J. & Marauri, P.** 1998. Manejo de explotaciones forestales y pérdida de suelo en zonas de elevada pendiente del País Vasco. *Cuaternario y Geomorfología*, 12 (1-2): 105-116.



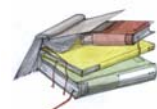
- Egenhofer, M.J. and Herring, J.R.** 1991. High-level Spatial Data Structures for GIS. In: Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds.). *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. Longman Scientific & Technical.
- Einstein, H.H.** 1988. Special Lecture: Landslide assessment procedure. *Proceedings. V<sup>th</sup> ISL*, Lausanne. Balkema, 2: 1075-89.
- ESRI.** 1994. Manuales del programa (ARC commands, AREDIT commands, ARCPLOT commands, ARCTOOLS commands, Cell-based Modelling with GRID, GRID commands, Managing Tabular data, AML commands, updates). Environmental System Research Institute Inc., Redlands, USA. <http://www.esri.com>
- EVE.** 1989a. Mapa Geológico del País Vasco. E: 1/25.000; Hoja 63-I, Ondarroa. Memoria y mapas. Ente Vasco de la Energía. Bilbao.
- EVE.** 1989b. Mapa Geológico del País Vasco. E: 1/25.000; Hoja 63-II, Zumaia. Memoria y mapas. Ente Vasco de la Energía. Bilbao.
- EVE.** 1989c. Mapa Geológico del País Vasco. E: 1/25.000; Hoja 63-III, Eibar. Memoria y mapas. Ente Vasco de la Energía. Bilbao.
- EVE.** 1991. Mapa Geológico del País Vasco. E: 1/25.000; Hoja 63-IV, Azcoitia. Memoria y mapas. Ente Vasco de la Energía. Bilbao.
- EVE.** 1995. Mapa Geológico del País Vasco. E: 1/100.000, memoria, esquemas y mapas. Ente Vasco de la Energía. Bilbao.
- EVE.** 1996. Mapa Hidrogeológico del País Vasco. E: 1/100.000, memoria, esquemas y mapas. Ente Vasco de la Energía. Bilbao.
- Fabbri, A. and Chung, C.F.** 1996. Predictive spatial data analysis in the geosciences. In, Fisher, M.; Scholten, H.J. and Unwin, D., (eds.): *Spatial Analytical Perspectives on GIS in the Environmental and Socio-Economic Sciences*. Taylor and Francis, London, GISDATA Series No. 3: 147-159.
- Felicísimo, A.M.** 1994. *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa, Oviedo.
- Felicísimo, A.M.** 1999. La utilización de los modelos digitales de terreno en el estudio del medio físico. En: Laín, L. (Ed.): *Los sistemas de información geográfica en los riesgos*

- naturales y en el medio ambiente*. ITGE- Ministerio de Medio Ambiente, ITGE: 127-139.
- Ferrer, M.** 1995. Los movimientos de ladera en España. En: *Reducción de riesgos geológicos en España*. ITGE. Madrid: 69-82.
- Feuillée, P. y Rat, P.** 1971. Structures et paléogéographies pyrénéo-cantabriques. En, Debysers, J.; Le Pichon, X. y Montadert, L. (Eds.): *Historie structurale du Golfe de Gascogne*. V.1.1-V.1.48. Ed. Technip, Paris.
- FGDC.** 1998. Content Standard for Digital Geospatial Metadata. (<http://www.fgdc.gov/metadata/gsdgm/> (27-marzo-2000)).
- Flageolet, J.C.** 1989. *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Colletion Géographie, Masson. Paris.
- Flowerdew, R.** 1991. Spatial data Integration. In: *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds.). Longman Scientific & Technical.
- Font, I.** 1983. *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid..
- Fookes, P.G.; Dale, S.G. and Land, J.M.** 1991. Some observation on a comparative aerial photography interpretation of a landslipped area. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24, 249-265.
- Francés, E.** 1987. *Cartografía Geocientífica del Valle del Nansa: Su Relación con la Cobertera Vegetal y con la Vocación de Usos del Territorio*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Inédita.
- Freeze, R.A.** 1987. Modelling interrelationships between climate, hydrology and hydrogeology and the development of slopes. In, Anderson, M.G. and Richards, K.S. (Eds.): *Slope Instability*. Wiley. New York: 381-403.
- Gao, J.** 1993. Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM (digital elevation model) in Nelson County, Virginia (USA). *Earth Surface Processes and Landforms*, 8: 579-591.
- García Mondejar, J.** 1982. Aptiense y Albiense. En: *El Cretácico de España*, Univ. Complutense. Madrid: 63-76.



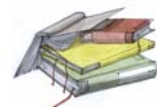
- García Yagüe, A.** 1984. Coste social de la inestabilidad de laderas y métodos de corrección. *Jornadas sobre la inestabilidad de laderas en el Pirineo*. Barcelona. PG III.1 – PG III.8.
- Gee, M.D.** 1991. Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability. In *Landslides-Glissements de Terrain, VI International Symposium on Landslides*. Christchurch, New Zealand, 1992. Balkema, Rotterdam, Vol. 2: 947-952.
- Geological Society.** 1983. Working party reports on land surface evaluation. *Quarterly Journal Engineering Geology*, 15: 1-168.
- Ghazi, A.; Balabanis, P.; Casale, R. and Yeroyanni, M.** 1997. Highlights of results from natural hazards research projects – 1997. Climate and Natural Hazards Unit, Environmental and Climate Programme, European Commission (EC), Brussels. <http://www.cordis.lu/env/src/project.htm> (noviembre-1997).
- González-Díez, A.** 1995. *Cartografía de movimientos de ladera y su aplicación al análisis del desarrollo temporal de los mismos y de la evolución del paisaje*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Inédita.
- González-Díez, A.; Remondo, J.; Díaz de Terán, J.R. y Cendrero, A.** 1999. A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. *Geomorphology*, 30: 95-113.
- González-Díez, A.; Salas, L.; Díaz de Terán, J.R. y Cendrero, A.** 1996. Late Quaternary climate changes and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region, Spain. *Geomorphology*, 15: 291-309.
- González de Vallejo, L.** 1988. La importancia socioeconómica de los riesgos geológicos en España. En: *Riesgos Geológicos*. IGME. 21-36.
- Goodchild, M.P.** 1993. The state of GIS for environmental problem solving. In *Environmental Modelling with GIS*, Goodchild, M. H.; Parks, B.O. & Steyaert, L.T. (Eds.). Oxford University Press, Oxford. 8-15.
- Gorte, B. and Koolhoven, W.** 1990. Interpolation between isolines based on the Borgfors distance transform. *ITC Journal*, 3: 245-247.
- Gostelow, T.P.** 1991. Rainfall and landslides. In: *Prevention and control of landslides and other mass movements*. Commission of European Communities.

- Graham, J.** 1984. Methods of stability analysis. In, Brunsden, D. and Prior, D.B. (Eds.): *Slope stability*, Wiley & Sons, New York: 171-215.
- Greenway, D.R.** 1987. Vegetación and slope stability. In Anderson & Richards (Eds.): *Slope Stability*. John Wiley and Sons. New York, 187-231.
- Grove, J.V.** 1972. The incidence of landslide, avalanches and floods in Western Norway during the Little Ice Age. *Arctic and Alpine Research*, 4: 131-138.
- Guzzetti, F.** 1993. Landslide Hazard and Risk by GIS-Based Multivariate Models. In: Reichenbach, P.; Guzzetti, F. and Carrara, A. (eds.), *Abstracts, Proceeding International Workshop GIS in Assessment for Natural Hazards*, Perugia, Sept. 20-22, 1993: 83-91.
- Guzzetti, F. and Cardinali, M.** 1990. Landslide inventory map of the Umbria region, central Italy. In, Cancelli, A. (Ed.), *ALPS 90, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference and Field Workshop on Landslides*, Milan, Ricerca Scientifica ed Educazione Permanente, Suppl. 79b, Milán: 273-284.
- Guzzetti, F.; Cardinali, M. and Reichenbach, P.** 1996. Map of sites affected by landslides or floods. *The AVI project*. Publication n° 1346. CNR-GNDICI, Roma.
- 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, A.** 1984a. *Strategies for classification of landslides*, Brunsden, D. & Prior, D.B. (eds.). Wiley, Interscience, Chichester. 1-25.
- Hansen, A.** 1984b. Landslide Hazard Analysis. In *Slope Instability*, Brunsden, D. & Prior, D.B. (eds.). Wiley, Interscience, Chichester. 523-602.
- Hansen, A.; Franks, C.A.M.; Kirk, P.A. and Brimicombe, A.J.** 1995. The application of GIS to landslide hazard assessment in Hong Kong. In Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.): *Geographical Information Systems in assessing Natural Hazards*. Kluwer Pub., Dordrecht, the Netherlands: 273-298.
- Hartlén, J. & Viberg, L.** 1988. General report: Evaluation of landslide hazard. In: Bonnard, C. (ed.), *Landslides-Glissements de Terrain. Proceedings of the V International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland, 1988. Vol. 2: 1037-1057.



- Hatano, S. and Oyagi, N.** 1977. Landslides and their survey methods. *Cbrir (Geography)*, 22 (5): 56-71.
- Heckerman, I.** 1986. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors. In kanal, L.N. and Lemmer, J.F. (eds.): *Uncertainty in artificial intelligence*. Elsevier, New York: 298-311.
- Hewitt, K. and Burton, I.** 1971. *The Hazardousness of a Place: A Regional Ecology of Damaging Events*. Department of Geography, University of Toronto. Toronto.
- Humbert, M.** 1977. La cartographie ZERMOS. Modalités d'establisement des cartes des zones exposées a des risques liés aux mouvements du sol et sous-sol. *Bulletin. B.R.G.M.* III, 1-2: 5-8.
- Hutchinson, J.N.** 1973. The response of London Clay cliffs to differing rates of toe erosion. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 8: 221-239.
- Hutchinson, J.N.** 1987. Mechanisms producing large displacements in landslides on pre-existing shears. *Memorandum Geological Society of China*, 9: 175-200.
- Hutchinson, J.N.** 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *5<sup>th</sup> International Congress on Landslides*. Lausanne. Vol. 1: 3-35.
- Hutchinson, J.N.** 1995. Keynote paper: Landslide hazard assessment. In *Landslides-Glissements de Terrain, VI International Symposium on Landslides*. Christchurch, New Zealand, 1992. Balkema, Rotterdam, Vol. 3: 1805-1841.
- Hutchinson, J.N.; Bromhead, E.N. & Chandler, M.P.** 1981. *Report on the coastal landslides at Bonchurch, Isle of White. Report to Lewis & Duwivier*. Inédito.
- Hutchinson, J.N. and Chandler, M.P.** 1991. A preliminary landslide hazard zonation of the Undercliff of Isle of Wight. Slope stability engineering, developments and applications. *Proceedings of the international conference on slope stability*. Thomas Telford, London: 197-205.
- Hutchinson, M.F.** 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211-232.
- Hutchinson, M.F.** 1996. A locally adaptative approach to the interpolation of digital elevation models. In *Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating*

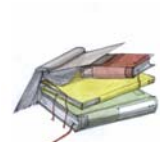
- GIS and Environmental modelling*, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.
- Hutton, J.** 1788. Theory of the earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe. *Royal. Society* Edinburgh. Tr., vol: 209-304.
- Ibsen, M.L. and Brunsten, D.** 1996. The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight, *Geomorphology*, (15) 3-4: 241-258.
- ICC.** 1994. Mapa comarcal de Catalunya 1:50.000, Berguedà –15. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.
- IGME.** 1987. *Mapa de síntesis de movimientos de terreno en España*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- IGME.** 1987a. *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*. . Instituto Geológico y Minero de España: 91.
- IGME.** 1987b. Investigación de detalle. Manual de taludes, Serie: *Geotécnia*. Madrid: 66-115.
- ILWIS.** 1997. The Integrated Land and Water Information System, versión 2.2. Manuales del programa. ITC, The Netherlands. <http://www.itc.nl/ilwis>
- Irigaray, C.** 1990. *Cartografía de Riesgos Geológicos asociados a los Movimientos de Ladera en el Sector de Colmenar* (Malaga). Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada. Memoria Inédita. Departamento Geodinámica.
- Irigaray, C.** 1995. *Movimientos de ladera: inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada)*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Irigaray, C.; Fernández, T. and Chacón, J.** 1994. GIS landslide inventory and analysis of determinant factors in the sector of Rute (Córdoba, Spain). *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International LAEG Congress*. Balkema, Rotterdam: 2223-2230.



- Irigaray, C.; Fernández, T. and Chacón, J.** 1996a. Comparative analysis of methods for landslide susceptibility mapping. Chacón, J.; Irigaray, C.& Fernández, T. (eds.): *Landslides*, Balkema, Rotterdam: 373-384.
- Irigaray, C.; Chacón, J. and Fernández, T.** 1996b. Metodología de Análisis de Factores determinantes de Movimientos de Ladera mediante un SIG, Aplicación al sector de Rute (Córdoba, España). *Actas VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada. Vol.1: 55-74.
- Irigaray, C.; Fernández, T. and Chacón, J.** 1996c. GIS landslide inventory and analysis of determinant factors in the sector of Rute (Córdoba, Spain). *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International LAEG Congress*. Balkema, Rotterdam: 2233-2245.
- Irigaray, C.; Fernández, T.; El Hamdouni, R. and Chacón, J.** 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 537-544.
- ISO/TC 211.** 1999. Geographical information – Part 2: Overview. <http://www.statkart.no/isotc211/opendoc/211n723/211n723.pdf> (29-marzo-2000).
- ITGE.** 1990. Mapa Geológico-Minero de Cantabria, escala 1:100.000. Memoria y mapas. Madrid.
- ITGE.** 1994. Mapa geológico de España. Escala: 1:50.000. Hoja La Pobra de Lillet nº 255
- Ives, J.D. and Bovis, M.J.** 1978. Natural hazard maps for land-use planning, San Juan Mountains, Colorado, USA. *Artic and Alpine Research.*, 10: 185-212.
- Jahns, R.H.** 1978. *Landslides. Studies in Geophysical Predictions*. National Academy of Sciences, Washington, DC: 58-65.
- Janssen, L.L.F (Ed.).** 2000. *Principles of Remote Sensing. An introductory textbook*. ITC Educational Textbook Series, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Jefferies, M.; Hall, D.; Hinchliff & Aiken, M.** 1996. Risk assessment: where are we, and where are we going? In Bentley, S.P. (Ed.): *Engineering Geology of Waste Disposal. Geological Society Engineering Geology, Special Publication*, No. 11: 341-359.

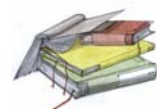


- Jennings, P.J.; Siddle, H.J. and Bentley, S.P.** 1991. A comparative study of indirect methods of landslip potential assessment. In: Chandler, R.J. (ed.), *Slope Stability Engineering*. Thomas Telford, London: 143-148.
- Johnson, B.D.** 1991. The FINDAR directory system: a meta-model for metadata. In *Metadata in the Geoscience*, Medyckj-Scott, D. et al. (Eds.), UK.
- Joly, F.** 1988. *La cartografía*. Oikos-Tau. Barcelona.
- Jonson, R.H.** 1987. Dating of ancient, deep-seated landslides in temperated regions. In, Anderson, M.G. & Ridchards, K.S. (Eds.): *Slope stability*. John Wiley. London: 561-600.
- Jones, F.O.; Embody, D.R. & Peterson, W.L.** 1961. Landslides along the Columbia River Valley, Northestern Washington. *Geological Survey Professional Paper*, 367: 1-94.
- Kachanoski, J.C. & De Jong, E.** 1984. Predicting the temporal relationships between soil caesium-137 and erosion rate. *Journal Environmental Qual.*, 13: 301-304.
- Katz, S.S.** 1991. Emulating the Prospector expert system with a raster GIS. *Computer and Geosciences*, Vol. 17: 1033-1050.
- Kawakami, H. & Saito, Y.** 1984. Landslide risk mapping by a quantification method. In *IV International Symposium of Landslides*, Toronto, V. 2: 535-540.
- Keefer, D.K.** 1984. Landslides caused by earthquakes. *Bulletin of American Geological Society*, 95: 406-421.
- Keefer, D.K. and Wilson, R.C.** 1989. Prediction earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. In: Sadler, P.M. and Morton, D.M. (eds.) *Landslides in Semi-arid Environment with emphasis on the Inland Valleys of Southern California*, *Inland Geological Society*, v.2: 118-149.
- Kienholz, H.** 1978. Maps of geomorphology and Natural Hazards of Grindelwald, Switzerland, Scale 1:10000. *Artic and Alpine Research*, Vol. 10, n° 2: 169-184.
- Kinlong, L. & Tongzhen, Z.** 1988. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In, Bonnard (ed.): *Landslides. Glissements de Terrain*, 5<sup>th</sup> *International Symposium on Landslides*, Lausanne: 1269-1272.



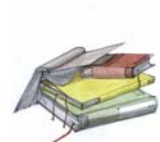
- Kirkby, M.J.** 1980. The stream head as significant geomorphic threshold. In Coates, D.R. and Vitek, J.D. (ed.): *Threshold in Geomorphology*, Allen & Unwin Ltd., London: 53-73.
- Kirkby, M.J.** 1987. General models of long-term slope evolution through mass movement. In, Anderson, M.G. and Anderson, K.S. (Eds.): *Slope Instability*. Wiley. New York: 359-379.
- Klungman, M.A. and Chung, P.** 1976. Slope-stability study of the Regional Municipality of Ottawa-Carleton, Ontario, Canada. *Ontario Geological Survey Miscellaneous Paper*, Mp 68: 13 pp.
- Kojima, H.; Chung, C.F.; Obayashi, S. and Fabbri, A.** 1998. Comparison of Strategies for the Application of Quantitative Prediction Models for Landslide Hazard Zonation. *Proceedings LAMG'98*, Ischia, Italy: 218-223.
- Kojan, E.; Foggin, G.T. and Rice, R.M.** 1972. Prediction and analysis of debris slide incidence by photogrammetry, Santa Ynez-San Rafael Mountains, California. *Proceedings 24<sup>th</sup> International Geological Congress. Section 13 (Engineering. Geology)*: 124-131.
- Kotarba, A.** 1989. On the age of debris flows in the Tatra Mountains. *Studia Geomorphologica Carpato-Balcánica*, 23: 139-152.
- Kraak, M.J.; Emmer, N.; Mac Guillaury, E.** 2000. Updating a census web atlas in geospatial data infrastructure using agents and metadata. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Voll XXXIII. Part B6. Proceedings of the XIX<sup>th</sup> Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, Amsterdam 2000. 2<sup>nd</sup> CD: 172-179.
- Laird, R.T.; Perkins, J.B.; Bainbridge, D.A.; Baker, J.B.; Boyd, R.T.; Huntsman, D.; Staub, P.E. and Zucker, H.B.** 1979. Quantitative Land-Capability Analysis. *US Geological Survey, Profesional Paper* 945.
- Lee, I.W.Y.** 1985. A review of the vegetative slope stabilization. *Hong Kong Engineer*, 13 (7): 9-21.
- Leighton, F.B.** 1976. Urban landslides: targets for land-use planning in California. In Coates, D.R. (ed.): *Urban geomorphology. Geological Society of America, Special Paper*, 174: 37-60.

- Leroi, E.** 1996. Landslide hazard – Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments. In Senneset, K. (ed.), *Landslides-Glissements de terrain. VII International Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway, 1996. Balkema, Rotterdam: 35-51.
- Lessing, P.; Kulander, B.R.; Wilson, B.D.; Dean, S.L. and Woodring, S.M.** 1976. West Virginia Landslides and Slide-prone Areas. *West Virginia Geological and Economic Survey, Environmental Geology Bulletin*, N° 15.
- Lessing, P.; Messina, C.P. and Fonner, R.F.** 1983. Landslide risk assessment. *Environmental geology*, Vol. 5, N°. 2: 92-99.
- Li, Z.** 1988. On the measure of digital terrain model accuracy. *Photogrammetric Record*, 72 (12): 873-877.
- Longmore, M.E.** 1982. The caesium-137 dating technique and associated applications in Australia – a review. In: *Archaeometry: An Australian perspective*. Australian National Univ. Press. Canberra, Australia.
- Luke, J.C.** 1976. A note on the use of characteristics in slope evolution models. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 25: 114-119.
- Luzi, L. and Fabbri, A.** 1995. Application of favourability modelling to zoning of landslide hazard in the Fabriano area, central Italy. *Proceedings Joint Conference and Exhibition on Geographical Information, JEC-GI'95*, La Haya, vol. 1: 398-403.
- Luzi, L. & Pergalani, F.** 1996a. A methodology for slope instability zonation using a probabilistic method. *Actas VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada. Vol. 1: 537-556.
- Luzi, L. & Pergalani, F.** 1996b. Application of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50.000 Fabriano geological map sheet). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15: 83-94.
- Lyell, C.** 1830. *Principles of Geology, being an attempt to explain the former changes of the earth's surface, by reference to causes now in operation*. Vol. 1. John Murray, London.
- Maguire, D.J.** 1991. An overview and definition of GIS. In Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds.): *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. Logman Scientific & Technical, New York.



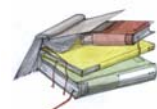
- Malgot, J. and Mahr, T.** 1979. Engineering geological mapping of the West Carpatian landslide areas. *International Association of Engineering Geology Bulletin*, 19: 116-121.
- Marker, B.R. and Culshaw, M.G.** 1993. Production of fuides on natural maps. International Association of Engineering Geology Commision, N° 1: Engineering Geological Maps. *Working Paper for Commision meeting at Montpellier*.
- Martín, A.J.** 1984. *Riesgo sísmico en la Península Ibérica*. T-1, IGN. Madrid.
- Masip i Oliva, R.** 1987. *Captura y almacenamiento de datos para cartografía digital*. Adamicro. Inédito.
- Mc Gregor, D.** 1988. Geographical Information System trend. *GIS/LIS'88 Proceedings*, vol. 2: 915-921. San Antonio, Texas.
- Menéndez, R.A.** 1994. *Geomorfología del Area de Somiedo (Cordillera Cantábrica, N de España)*. *Aplicaciones de los sistemas de información geográfica al estudio del relieve*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. Inédita.
- Meneroud, J.** 1978. Cartographie des risques dans les Alpes-Maritimes (France). *International Association of Engineering Geology. Third international Congress*, Sec. I, Vol. 2: 98-107.
- Mezcua, J. y Martínez de Solares, J.M.** 1983. Sismicidad en el área Ibero-Magrebi. *Instituto Geográfico Nacional*, publicación 203. Madrid.
- Meyerhoff, G.G.** 1985. Safety factors and limit states analysis in geotechnical engineering. *Canada Geotechnical Journal*, vol 22, nº 1.
- Miller, C.L. and Laflamme, R.A.** 1958. The digital terrain model – theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24 (3): 433-442.
- Mitchell, J.K.** 1974. Natural Hazards Research. In: Perspectives on Environment, Manners, R. and Mikesell, M.W. (eds.). *Association American of Geography*, Washington, DC: 311-341.
- Moldan, B. and Billharz, S.** 1997. *Sustainability indicators*. Wiley, Chichester, New York
- Monckton, G.C.** 1994. An investigation into spatial structure of error in digital elevation data. In: *Innovation in GIS*, Worboys, M.F. (Ed.). Taylor & Francis. Keele, UK: 201-211.

- Moore, I.D.; Turner, A.K.; Wilson, J.P.; Jenson, S.K. and Band, L.E.** 1990. GIS and Land Surface-Subsurface Process Modelling. In Goodchild, M.F.; Parks, B. And Steyert, L.T. (eds.): *Geographical Information Systems and Environmental Modelling*. Oxford University Press, New York.
- Moore, I.D.; Grayson, R.B. and Ladson, A.R.** 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hidrological Processes*, 5: 3-30.
- Moser, M. and Hohensinn, F.** 1983. Geotechnical aspects of soil slips in Alpin Regions. *Engineering Geology*, 19: 185-211.
- Mulder, H.F.** 1991. *Assessment of landslide hazard*. Ed. Faculty of Geographical Science. University of Utrecht.
- Naden, P.S.; Reed, D.W. and Calver, A.** 1991. Rainfall analysis and hydrogeological hillslope modelling for slope stability in mountainous areas. In: *Movimenti franosi e metodi di stabilizzazione*. Progetto Epoch. Potenza.
- Nava, A.** 1995. Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo cesio-137. *Cuadernos técnicos de la SEG, N° 8*. Geoforma, Logroño.
- Nemkock, A.; Pasesc, J. and Rybár, J.** 1972. Classification of Landslides and Other mass Movements. *Rock Mechanics*, 4: 71-78.
- Neuland, H.** 1976. A prediction model of landslips. *Catena*, v. 3: 215-230.
- Newman, E.B.; Paradis, A.R. & Brabb, E.E.** 1978. Feasibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility maps of the San Francisco Bay Region, California. *US Geological Survey Bulletin*. N° 1443.
- Nieto, A.S.** 1989. Mechanical models and geological observations: closing the prediction gap. *Proceedings International Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries*, Perugia, 1988. CNR-USNSF: 145-164.
- Nilsen, T.H. and Turner, B.L.** 1975. Influence of rainfall and ancient landslide deposits on recent landslides (1950-1971) in urban areas of Contra Costa County, California. *US Geological Survey Bulletin*. N° 1443.



- Nilsen, T.H.; Wright, R.H.; Vlastic, T.C. & Spangle, W.** 1979. Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region, California. *U.S. Geological Survey, Professional Paper 944*. Washington, DC.
- OCDE**, 1994. *Environmental indicators*. OCDE París
- Ogata, S.** 1974. Quantitative analysis of landslide phenomena with respect to terrestrial features. *II<sup>th</sup> International Congress Engineering Geology IAEG*, Sao Paulo, vol. 2.
- Okrent, D.** 1980. Comment on societal risk. *Science*, 208: 372-5.
- Olivier, M.; Bell, F.G. & Jermy, C.A.** 1994. The effect of rainfall on slope failure, with examples from the greater Durban area. In *Proceeding of the 7<sup>th</sup> Congress of the International Association of Engineering Geology*, Lisbon, 3. Balkema, Rotterdam. 1629-1636.
- Onodera, T.; Yoshinaka, R. and Kazama, H.** 1974. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Congress of Engineering Geology* V.11.1-V1110. Sao Paulo, Brasil.
- ONU.** 1992. *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro, Vol. I*.
- Oteo, C.** 1995. Nuevas tecnologías de corrección de movimientos de ladera. En: *Reducción de riesgos geológicos en España*. ITGE. Madrid: 83-93.
- Overmeier, S.F.** 1979. Slope Stability Map of Fairfax County. Virginia. *U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF-1072, 1: 48.000.
- Owens, L.B. and Watson, J.P.** 1979. Landscape reduction by weathering in small Rhodesian watersheds. *Geology*, 7: 281-284.
- Oyagi, N.** 1984. Landslides in weathered rocks and residual soils in Japan and surrounding areas: A state of the art report. In *IV Congress Landslides*, Toronto. V. 3: 1-31.
- Palmquist, R.C. & Bible, G.** 1980. Conceptual modelling of landslide distribution in the time and space. *Bulletin of the International Association of Engineering Geologists*, 21: 178-186.
- Panizza, M.** 1973. *Proposta di legenda per carte della stabilità geomorfologica*. Societa Geologica Italiana.

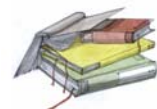
- Panizza, M.** 1975. Ricerche di geomorfologia applicata a la Planificazione Territoriale. *Memoria Societa Geologica Italiana*, 14.
- Panizza, M.** 1992. *Geomorfologia*. Pitagora, Bologna.
- Panizza, M.; Corsini, A.; Soldati, M. and Tosatti, G.** 1998. Report on the use of new landslide susceptibility mapping techniques. In, Corominas, J.; Moya, J.; Ledesma, A.; Gili, J.A.; Lloret, A. and Rius, J. (Eds.): *New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe (NEWTECH)*. Final Report of the Project (CEC Environment Programme, Contract ENV-CT96-0248), Universidad Politécnica de Cataluña: 13-31.
- Pasek, J.; Rybár, J. & Spùrek, L.** 1977. Systematic registration of slope deformations in Czechoslovakia. *International Association of Engineering Geology Bulletin*, 16: 48-51.
- Pedraza, J.** 1996. *Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones*. Editorial Rueda, Madrid.
- Peltier, L.C.** 1950. The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. *Ann. Ass. Amm. Geogr.*, 40: 214-236.
- Plafker, G.; Eriksen, G.E. & Concha, J.M.** 1971. Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 61: 543-578.
- Prandini, L.; Guidicini, G.; Bottura, J.A.; Poncano, W.L. and Santos, A.R.** 1977. Behavior of the Vegetation in Slope Stability: A Critical Review. *International Association of Engineering Geology Bulletin*, Vol. 16: 51-55.
- Proske, H. and Vlcko, J.** 1994. *Production of guides on hazard maps*. (Maps for Waste disposal sites). International Association of Engineering Geology Commission, N° 1. Engineering Geological Maps. Working Paper for Commission Meeting at Lisbon.
- Quine, T.A.; Navas, A.; Walling, D.E. & Machín, J.** 1994. Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Las Bardenas in the central Ebro river basin, Spain. *Land Degradation and Rehabilitation*, 5: 41-55.
- Radbruch-Hall, D.R.; Colton, R.B.; Davis, W.E.; Skipp, B.A.; Lucchitta, I. and Varnes, D.J.** 1976. Preliminary Landslide Overview Map of the Conterminous United States, *US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF 771.



- Radermacher, F.J.** 1991 The importance of metaknowledge for environmental information systems. In *Advances in Spatial Database proceedings*, Berlin.
- Rahn, P.H.** 1986. *Engineering Geology: an environmental approach*. Elsevier, Amsterdam.
- Rat, M.** 1988. Essai de prevision de la date de rupture d'un grand glissement. II *Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables*. Andorra la Vella: 419-431.
- Rat, P.** 1983. Les régions basco-cantabriques et nord ibériques (presentation, problemes poses). En: *Mémoires Géologiques de l'Université de Dijon*, T. 9, Vue sur le Crétacé basco-cantabrique et nord-ibérique: 155-166.
- Rat, P.** 1988. The Basque-Cantabrian Basin between the Iberian and European plates. Some facts but still many problems. *Revista de la Sociedad Geológica España*, 1: 327-348.
- Rayne, H.R.** 1985. Hazard assessment and rating methods. In *Landslides in South Wales Coal Fields*, Morgan, C.S. (ed.) Polytechnic of Wales, Pontypridd. 59-71.
- Remondo, J.; Díaz de Terán, J.R.; Cendrero, A.; Zafra, P.; Marticorena, B. y Tamés, P.** 1996. Contrastación de los mapas de peligrosidad por inestabilidad de laderas en Gipuzkoa. *Actas VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada. Vol. 1: 377-391.
- Remondo, J.; González-Díez, A.; Díaz de Terán, J.R.; Cendrero, A.; Chung, C.F. and Fabbri, A.** 2000. Spatial data analysis for the assessment of slope instability; application to EIA for a case study in the Vergara-Eibar area, Guipúzcoa, Spain. *LAPRS Congress, Vol. XXXIII*, Amsterdam.
- Remondo, J.; Napolitano, P.; Fabbri, A.; Chung, C.F.; Menendez, R.; Marquínez, J.; Díaz de Terán, J.R.; González-Díez, A.; Cendrero, A.** 1998. Geologic hazard zonation by favourability functions in the Basque Country. *International Association for Mathematical Geology, Annual Meeting (LAMG'98)*, Ischia, Italy.
- Reneau, S. & Dietrich, W.** 1987. The importance of hollows in debris flow studies: examples from Marin County, California. *Geological Society American Revue Engineering Geology*, 7: 165-180.

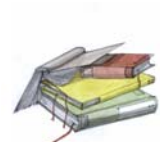


- Reneau, S.; Dietrich, W.; Donahue, D.; Juil, A. & Rubin, M.** 1990. Late Quaternary history of colluvial deposition and erosion in Hollows, Central California Coast Ranges. *Geological Society. of American Bulletin* V. 102: 969-982.
- Rengers, N. & Soeters, R.** 1980. Regional engineering geological mapping from aerial photographs. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 21: 103-111.
- Rib, H.T. and Liang, T.** 1978. Recognition and identification. In Schuster R.L. and Krizek R.J., (Editors), *Landslides Analysis and Control*. Washington Transportation Research Board, Special Report. 176, Nat. Acad. Sci., 34-84.
- Richards, K.S. and Lorriman, N.R.** 1987. Basal erosion and mass movements. In, Anderson, M.G. and Richards, K.S. (Eds.): *Slope Instability*. Wiley. New York: 331-357.
- Rice, R.M. & Lewis, J.** 1991. Estimating erosion risks associated with logging and forest roads in Northwest California. *Water Resources Bulletin* (US), 27(5): 809-818.
- Rivas-Martínez, S.** 1987. Introducción: Nociones sobre Fitosociología, Biogeografía y Bioclimatología. En: Peinado Lorca, M. y Rivas-Martinez, S. (eds.), *La vegetación de España*. Edit. De Alcalá de Henares. Secretaría general-Servicio de publicaciones.
- Runqiu, H. and Yuanguo, L.** 1995. Logical message model of slope stability prediction in the Three Gorges reservoir area, China. 6<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, 1992. In: Bell (ed.), *Landslides- Glissements de Terrain*, Balkema, Rotterdam. Vol. 2: 977-981.
- Ruxton, B.P. and McDougall, J.** 1967. Denudation rates in northeast Papua from potasium-argon dating of lavas. *American Journal of Science*, 265: 545-561.
- Salazar, A. y Ortega, L.I.** 1990. Los deslizamientos de la alineación costera guipuzcoana (sector Mendizorrotz-Igueldo). *Actas de la 1ª Reunión Nacional de Geomorfología*; Teruel: 551-560.
- Sarkar, S.; Kanungo, D.P. and Mehrotra, G.S.** 1995. Landslide hazard zonation: a case study in Garhwal Himalaya, India. *Mountain Research and Development*, Vol. 15, No. 4: 301-309.



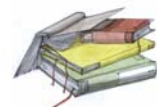
- Schoeneich, P.** 1991. La datacion des glissements de terrain. In Bell (Ed.): *Landslides. 6th. Int. Conference on Landslides*. Balkema, Christchurch: 205-212.
- Schuster, R.L. and Fleming, R.W.** 1988. Socieconomic Significance of Landslides and Mudflows. In: *Landslides and Mudflows*, vol. 1. UNESCO-UNEP. Mosku.
- Schuster, R.L. and Krizek, R.J.** 1978. *Landslides Analysis and Control*; Transportation Research Board, Special Report, 176, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- Selby, M.J.** 1982. Controls on the stability and inclinations of hillslopes formed on hard rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 449-467.
- Sharpe, C.F.S.** 1938. *Landslides and related phenomena*. Columbia Univ. Press, New York.
- Sheko, A.I.** 1988. Clasification of factors. In: *Landslides and mudflows*. UNESCO-UNEP. Moscú.
- Shortliffe, E.H. and Buchanan, G.G.** 1975. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, v. 23: 351-379.
- Siddle, H.J.; Jones, D.B. & Payne, H.R.** 1991. Development of a methodology for landslip potential mapping in the Rhondda Valley. In: Chandler, R.J. (ed.), *Slope Stability Engineering*. Thomas Telford, London: 137-142.
- Sidle, R.C.; Pearce, A.J. & O'Loughlin, C.L.** 1985. Hillslope stability and land use. *Water Resources Monograph* 11. Washington, D.C.: American Geophysicist Union.
- Skempton; A.W.** 1953. Soil mechanics in relation to geology. *Proceedings Yorkshire Geological Society* 29: 33-62.
- Skempton, A.W. and Hutchinson, J.N.** 1969. Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, State-of-the-Art Volume: 291-340.
- Skidmore, A.K.** 1989. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from gridded elevation data. *International Journal Geographical Information Systems*, Vol. 3: 323-334.
- Slaymaker, O.** 1977. An overview of geomorphic processes in the Canadian Cordillera. *Zeich. Für Geomorphologie*, 21: 169-186.

- Smith, J.T. & Elder, D.G.** 1999. A comparison of models for characterizing the distribution of radionuclides with depth in soils. *European Journal Soil Science*, 50: 295-307.
- Smith, J.T.; Fesenko, S.V.; Howard, B.J.; Horrill, A.D.; Sanzharova, N.I. & Alexakhin, R.M.** 1999. Temporal change in fallout Cs-137 in terrestrial and aquatic systems: a whole ecosystem approach. *Environmental Science and Technology*, 33: 49-54.
- Smith, K.** 1992. *Environmental hazards. Assessing Risk and Reducing Disasters*. Rutledge. London.
- Soeters, R. and van Westen, C.J.** 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. In, Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds.): *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., Special Report 247: 129-177.
- Soto, J.; Gómez, J.; Ródenas, C.; Sáinz, C.; Cendrero, A.; Díaz de Terán, J.R.; González-Díez, A.; Remondo, J. y Alcaide, J.** 1999. *Estudio de la evolución de deslizamientos de ladera mediante Cs-137*. Universidad de Cantabria. Inédito.
- Soto, J.; Gómez, J.; Cendrero, A.; Díaz de Terán, J.R.; González-Díez, A.; Remondo, J. y Alcaide, J.** 2001. Estudio de deslizamientos de ladera mediante Cs-137. *Cuaternario y Geomorfología*. En prensa.
- Sowers, G.F. and Royster, D.L.** 1978. Field Investigations. In: *Landslides-Analysis and Control*, Chapter 4, Schuster, R.L. and Krizek, R.J. (eds.). National Academy of Science (Transport Research Board Special Report, 176). Washington, DC: 81-111.
- SPSS.** 1999. Ayuda del programa, versión 9.0.1, SPSS Inc. <http://www.spss.com>
- Star, J. & Estes, J.** 1990. *Geographical Information Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Starkel, L.** 1966. Post-glacial climate and the moulding of European relief. *Proceedings of the International Symposium on world climate 8,000 to B.C.* Royal Meteorological Society: 15-32.



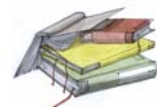
- Stevenson, P.C.** 1977. An Empirical Method for the Evaluation of Relative Landslide Risk. *Bulletin of International Association of Engineering Geology*, vol. 16: 69-72.
- Strakhov, N.M.** 1967. *Principles of lithogenesis*. Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Tamés, P. y da Silva, A.** 1996. Los mapas geocientíficos bajo aplicación GIS para la gestión de recursos hidráulicos en el Territorio Histórico de Gipuzkoa. *Actas VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada. Vol. 2: 87-101.
- Tamés, P.; Elosegui, J.M.; Salazar, A.; Almoguera, J.; Albert, J.; Solesio, J.; Fernández Areces, J.L. & López Vilchez, L.** 1986. Estudio de riesgos naturales del territorio de Guipúzcoa (2ª fase). Términos municipales de Deba, Motrico, Mendaro, Elgoibar y Eibar. *Dirección General del Medio Ambiente, Diputación Foral de Guipúzcoa*, 5 Vol. Informe Inédito.
- Takeshita, K.** 1971. Estimations of mountain disasters occurrence on their location analysis on the Kitakyushu. *Bulletin. Mountain Cosv.* I Dep. Forestry, Fukuova Pref. 1-85.
- Terlien, M.T.J.; van Westen, C.J. and van Asch, T.W.J.** 1995. The use of deterministic models in landslide hazard assessment. In Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.): *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Pub., Dordrecht, the Netherlands: 57-77.
- Terzaghi, K.** 1950. Mechanisms of landslides. In: Paige, S. (ed.) *Applications of Geology to Engineering Practice*. Berkey Volume, American Geological Society, New York, 83-124.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B.** 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley. London. 2<sup>nd</sup>. Ed.
- Thompson, S.A.** 1982. Trends and Development in Global Natural Disasters 1947-81: *Working Paper, n° 45, Institute of Behavioral Science*, University of Colorado, Boulder.
- Trilla, J.** 1988. Riesgos geodinámicos externos. En: *Geología Ambiental*, Serie Ingeniería Geoambiental. ITGE. 129-134.
- UNESCO.** 1973-79. *Annual Summaries of Information on Natural Disasters, 1971-75*. Paris, UNESCO.

- UNESCO.** 1993. *Multilingual Landslide Glossary*. The International Geotechnical UNESCO Working Party for World Landslide Inventory. BiTech Pubs, Canada.
- UNDRO.** 1991. *Mitigatin Natural Disasters: Phenomena, Effects and Actions- A manual for Policy Makers and Planners*. Geneva: Office of the UN Disaster Relief Coordinator.
- Val, J. del; Delgado, J.; Eguiguren, E.; García, I. y Garrote, R.** 1996. Ejemplo de análisis de inestabilidades del terreno para la atención de emergencias, el caso del País Vasco. *Actas del VI Congreso Nacional y Conferencia Intern. de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Granada; Vol. 1: 505-517.
- Valentini, G.** 1967. Un modello statistico nello studio della franosità nel quadro morfologico geologico e geotecnico nella media valle del F. Fortore. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, II, Bari.
- van Steijn, H.** 1991. Frequency of hillslope debris flows in a part of the French Alps. *Bulletin of Geomorphology*, 19: 83-90.
- van Westen, C.J.** 1992a. Scale related GIS techniques in the analysis of landslide hazard. *Actas 1er. Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de riesgos naturales*, Bogotá, Colombia: 484-498.
- van Westen, C.J.** 1992b. Medium scale landslide hazard analysis using a PC-based GIS. A case study from Chinchina, Colombia. *Actas 1er. Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de riesgos naturales*, Bogotá, Colombia. Vol. 2: 1-15.
- van Westen, C.J.** 1993. *Application of Geographical Information Systems to Landslide Hazard Zonation*. ITC Publication Number 15, Enschede, The Netherlands.
- Varnes, D.J.** 1958. Landslide types and processes. In Eckel, E.B. (ed.) *Landslide and Engineering Practice*. Highway research Board, Special Report 29, Washington, DC.: 20-47
- Varnes, D.J.** 1978. Slope Movements: Types and Processes. In: Schuster and Krizek (eds.), *Landslides - Analysis and Control*, Special Report 176. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington, D.C. 11-33.



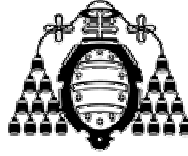
- Varnes, D.J.** 1984. *Landslides Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. Natural Hazards, 3. UNESCO, Paris.
- Vaughan, P.R. & Walbanke, H.J.** 1973. Pore pressure changes and delayed failure of cutting slopes in overconsolidated clay. *Geotechnique*, 23: 531-539.
- Vecchia, O.** 1978. A Simple Terrain Index for the Stability of Hillsides or Scarps. In: Geddes, J.D. (ed.) *Large Ground Movements and Structures*. Wiley. Toronto/New York. : 449-461.
- Veregin, H.** 1989. A Taxonomy of Error in Spatial Database. *NCGLA, Technical Paper*: 89-12.
- Verstappen, H.T.** 1977. *Remote Sensing in Geomorphology*. Elsevier. Amsterdam.
- Verstappen, H.T.** 1983. *Applied geomorphology: geomorphological survey for environmental development*. Elsevier, Amsterdam.
- Voight, B.** 1989. Materials science law applied to time forecast of slope failure. *Landslide News*, 3: 8-11.
- Walker, B.F.; Blong, R.J. & MacGregor, J.P.** 1987. Landslide classification, geomorphology and site investigations. In Proceedings of the Extension Course on *Soil Slope Stability and Stabilization*, Sidney. Walker, B.F. & Fell, R. (eds.). Balkema, Rotterdam. 1-52.
- Wang, S.Q. and Unwin, D.J.,** 1992, Modelling landslide distribution on loess soils in China: An investigation. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 6, no. 5, p. 391-405).
- Weibel, R. and Heller, R.** 1991. Digital Terrain Modelling. In Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds.): *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. Logman Scientific & Technical, New York.
- Wentzel, E.S. y Owtscharow, L.A.** 1978. *Cálculo de Probabilidades*. Paraninfo. Madrid.
- White, G.F.** 1936. The limit of economic justification for flood protection. *Journal of Land and Public Economics*, 12: 133-148.
- White, G.F.** 1945. Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States. *Research Paper*, 29. Department of Geography, University of Chicago.

- White, G.F.** 1974. *Natural Hazards: Local, National, Global*. Oxford University Press. New York.
- Wieczorek, G.F.** 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, v. XXI, n. 3: 337-342.
- Wold, R.L. & Jochim, C.L.** 1989. *Landslide Loss Reduction: A Guide for State and Local Government Planning. Special Publication 33*. Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources, Denver.
- Wright, R.H. and Nilsen, T.H.** 1974. Isopleth map of landslide deposits, southern San Francisco Bay Region, California. *US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF-550 (1:125.000).
- Wright, R.H.; Campbell, R.H and Nilsen, T.H.** 1974. Preparation and Use of Isopleth Maps of Landslide Deposits. *Geology*, Vol. 2, N° 10: 483-485.
- Wu, T.H. and Kraft, L.M.** 1970. Safety Analysis of Slopes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*. ASCE, vol. 96, n° SM2.
- Wu, T.H.; Tang, W.H. & Einstein, H.H.** 1996. Landslide hazard and risk assessment. In: *Landslide Investigation and Mitigation*, Special Report, 247, Turker, A.K. & Schuster, R.L. (eds.). Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. : 106-117.
- Yan, T.Z.** 1988. Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China. In: Bonnard, C. (ed.), *Landslides-Glissements de Terrain. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland, 1988. Vol. 2: 1263-1268.
- Yatsu, E.** 1967. Some problems on mass movements. *Geografiska Annaler*, V. 49 A: 396-401.
- Yin, K.L. and Yan, T.Z.** 1988. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceedings 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland. 1988 Vol. 2: 1269-1272.
- Young, A.** 1974. The rate of slopes retreat. *Institute British Geographers, Sp. Publication*, 7: 65-78.
- Zaruba, Q. and Mencl, V.** 1969. *Landslides and their control*, Elsevier, Amsterdam.



**Zêzere, J.L.** 1997. *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Tesis Doctoral, Universidad de Lisboa.





Universidad de Oviedo

Departamento de Geología

# **Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial**

TESIS DOCTORAL

**Juan Remondo Tejerina**

ANEXOS

Directores: Antonio Cendrero Uceda  
José Ramón Díaz de Terán Mira  
Tutor: Jorge Marquínez García



Oviedo, mayo de 2001



# **ANEXO I: METADATOS SOBRE LAS VARIABLES DEL BAJO DEVA**

## **Localización de la rotura**

### ***MOVIMIENTOS (MOVPT)***

Cobertura (mapa) discontinua de variable *booleana* (si/no).

Topología: puntos (etiquetas del centroide de los polígonos de la zona de rotura).

### **Definición**

Es la variable que representa los movimientos superficiales objeto de estudio. Se cartografían, mediante puntos, las zonas de ruptura de los deslizamientos y flujos superficiales exclusivamente. Se entiende por superficiales los que involucran roca alterada o depósito superficial y no la roca subyacente (substrato). Para el análisis de la susceptibilidad se utilizan los puntos que representan el centroide (centro geométrico) de la zona de ruptura. En los casos en los que no ha sido posible diferenciar zona de ruptura y depósito dentro de cada movimiento, se ha decidido caracterizar todo el movimiento como zona de ruptura.

### **Función**

Es la variable que indica la existencia o inexistencia de movimientos en masa ya ocurridos, permitiendo establecer las relaciones estadísticas con las variables condicionantes. Muestra las evidencias de deslizamientos pasados, a partir de los cuales es posible establecer la predicción.

## **Procedimiento de obtención**

Los movimientos se han digitalizado sobre la ortofoto realizada a partir del mismo vuelo del que se ha restituido la topografía 1:4.000 (1993). La identificación de los movimientos se ha basado en la fotointerpretación de pares estereoscópicos correspondientes a diferentes vuelos de escalas comprendidas entre 1:12.000 y 1:18.000, y comprobaciones de campo que han supuesto el reconocimiento sobre el terreno de la práctica totalidad de los movimientos inventariados. Uno de los vuelos (1:18.000 COLOR del 1993) es del que han derivado, además de los pares estereoscópicos, la restitución de las curvas de nivel y algunos puntos de cota, y las ortofotos. Durante el trabajo de campo se elaboró una ficha descriptiva para cada movimiento.

El mapa de movimientos en masa que incluye todos los tipos (Mov\_masa) fue cartografiado previamente en papel, sobre la base topográfica de 1988 a escala 1:5.000. Esta cartografía fue posteriormente digitalizada, utilizando el mismo procedimiento arriba descrito.

## **Codificación**

Las etiquetas de los puntos se han codificado con un número de 5 cifras.

La primera cifra es el indicativo del municipio en el que se encuentran situados; las restantes cuatro cifras indican el número de serie del inventario, independiente para cada municipio.

- 11083 – Deba
- 20067 – Mendaro
- 30185 – Elgoibar
- 40177 – Eibar

La capa “movimientos” (MOVPT) tiene asociada una tabla, en la que se recogen atributos de interés, elaborada fundamentalmente con criterios de campo. La tabla utiliza, como

código de enlace, el código de 4 cifras que identifica cada movimiento de ladera. De esta cobertura se han derivado los siguientes mapas de distribución espacio-temporal:

- Deva\_1955 (278 deslizamientos). Identificados en el vuelo 1954-5 y de aspecto reciente.
- Deva\_1970 (109 deslizamientos). Identificados en el vuelo 1970 y posteriores a 1955.
- Deva\_1983 (104 deslizamientos). Identificados en el vuelo 1983 y posteriores a 1970.
- Deva\_1985 (141 deslizamientos). Identificados en el vuelo 1985 y posteriores a 1983.
- Deva\_1991 (133 deslizamientos). Identificados en el vuelo 1991 y posteriores a 1983.
- Deva\_1993 (95 deslizamientos). Identificados en el vuelo 1993 y posteriores a 1991.
- Deva\_1997 (223 deslizamientos). Identificados en el vuelo 1997 y posteriores a 1993.
- Bajo-Deva\_1991 (532 deslizamientos). Identificados en el vuelo de 1991 y en el campo.
- Bajo-Deva\_1997 (907 deslizamientos). Identificados en el vuelo de 1997 y en el campo.
- Mov\_masa (808 deslizamientos). Todos los tipos de movimientos en masa identificados en el vuelo de 1991 y en el campo.

Los atributos asociados a los deslizamientos se han estandarizado mediante una ficha, que ha sido digitalizada en una base de datos relacional (originalmente en FileMaker Pro). Dicha ficha, que ha facilitado enormemente el trabajo de campo y de fotointerpretación, está basada en las propuestas por Carrara y Merenda (1976), Pasek et al. (1977), Cooke y Doornkamp (1990) y fundamentalmente en la de Tamés et al. (1986). El modelo de ficha se presenta al final de esta descripción.

Como resulta obvio al observar los campos o ítems considerados, en muchos casos no es posible recoger toda la información, sino simplemente algunos de los ítems de la ficha. De cualquier forma, los campos relativos a las características básicas de los movimientos, sus dimensiones y las coordenadas de localización se han tomado para todos los movimientos. La información completa (en lo que resulte aplicable) se ha obtenido para unos 800.

### **Observaciones adicionales**

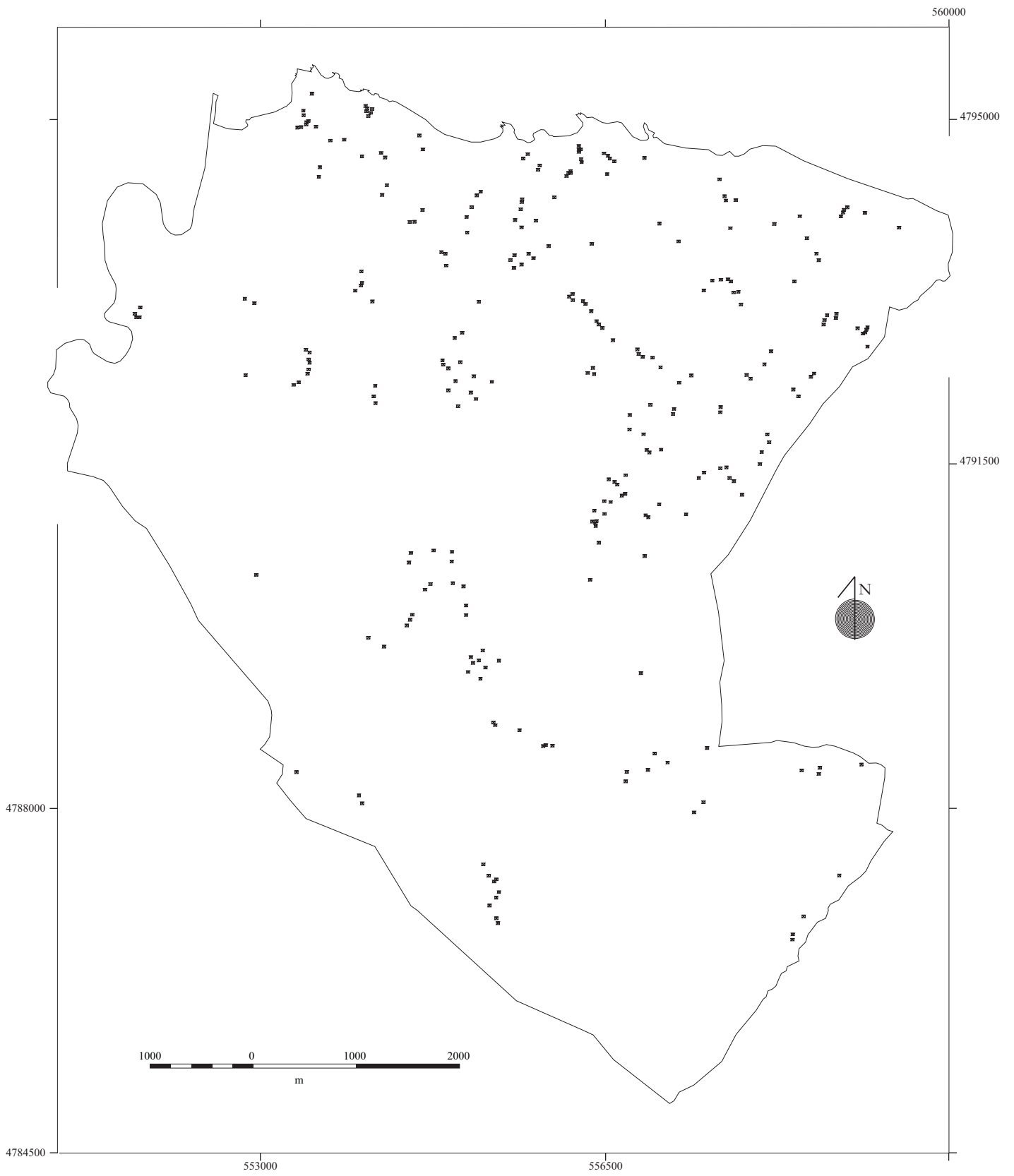
Autor: Juan Remondo

Fuente (procedencia): datos inéditos obtenidos para el trabajo.

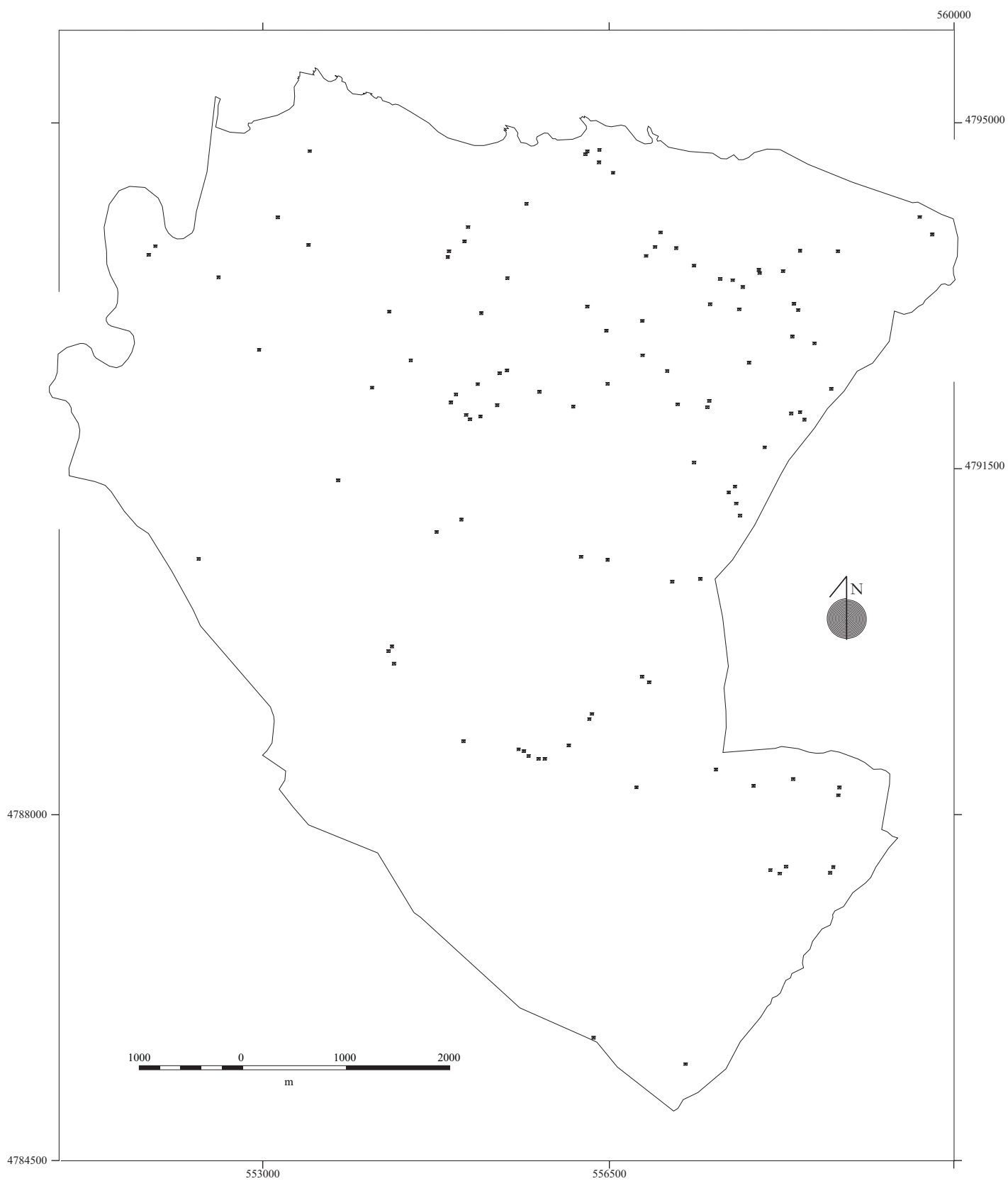
Fecha: 1994 – 2000.

Valoración sobre la calidad: cartografía de gran detalle (ver procedimiento de obtención).

# Deslizamientos superficiales previos a 1954

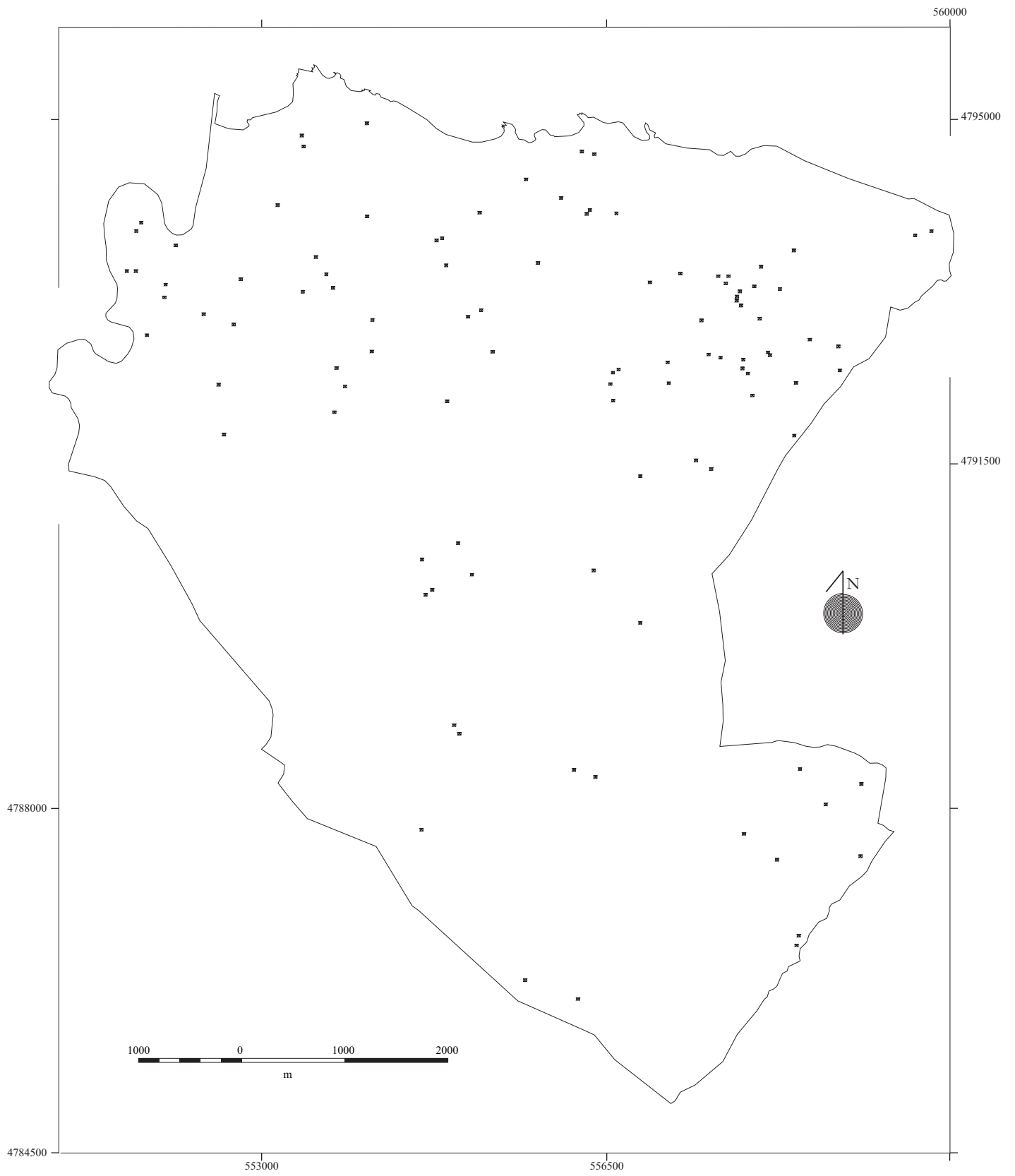


# Deslizamientos superficiales 1954-70

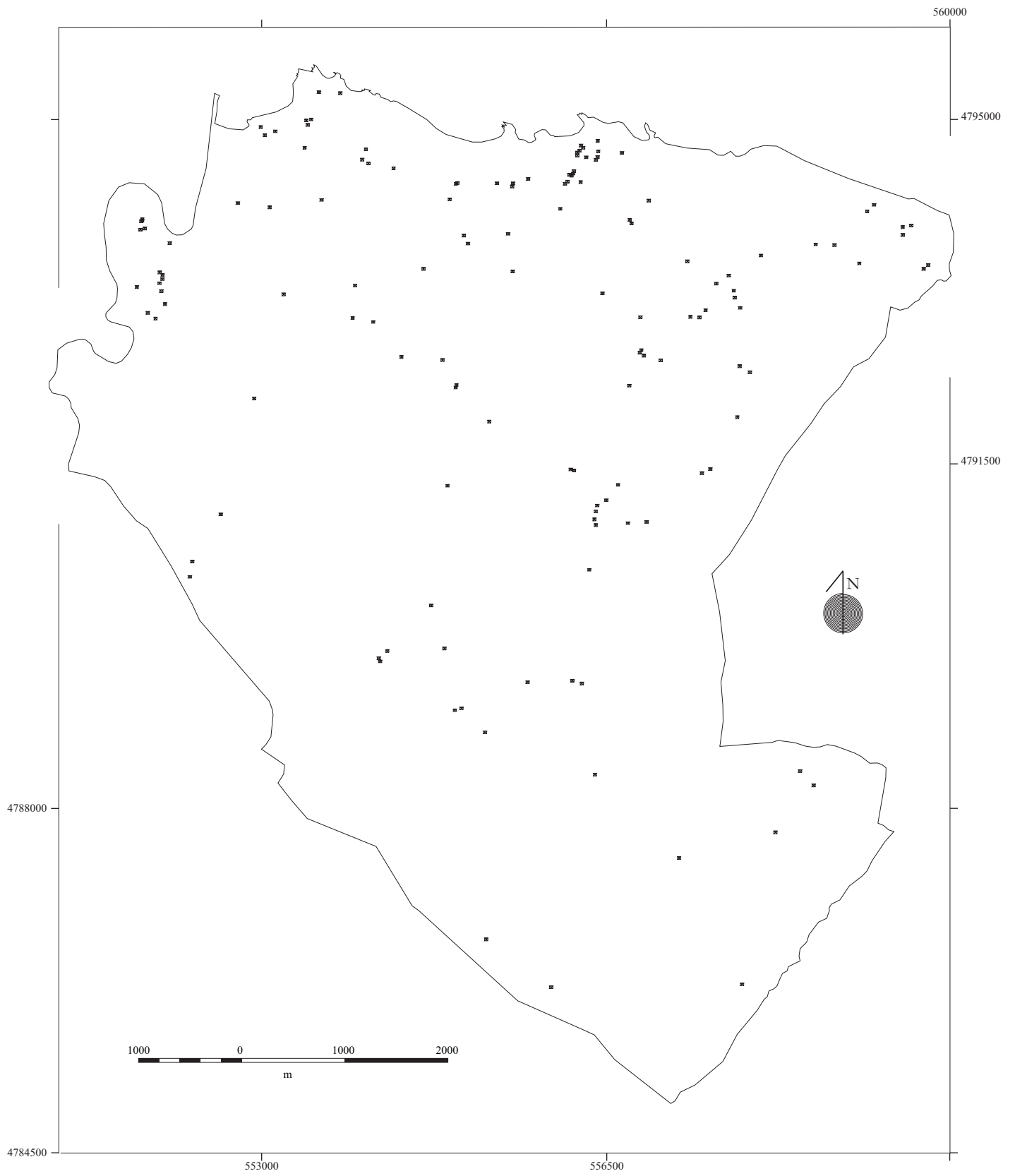




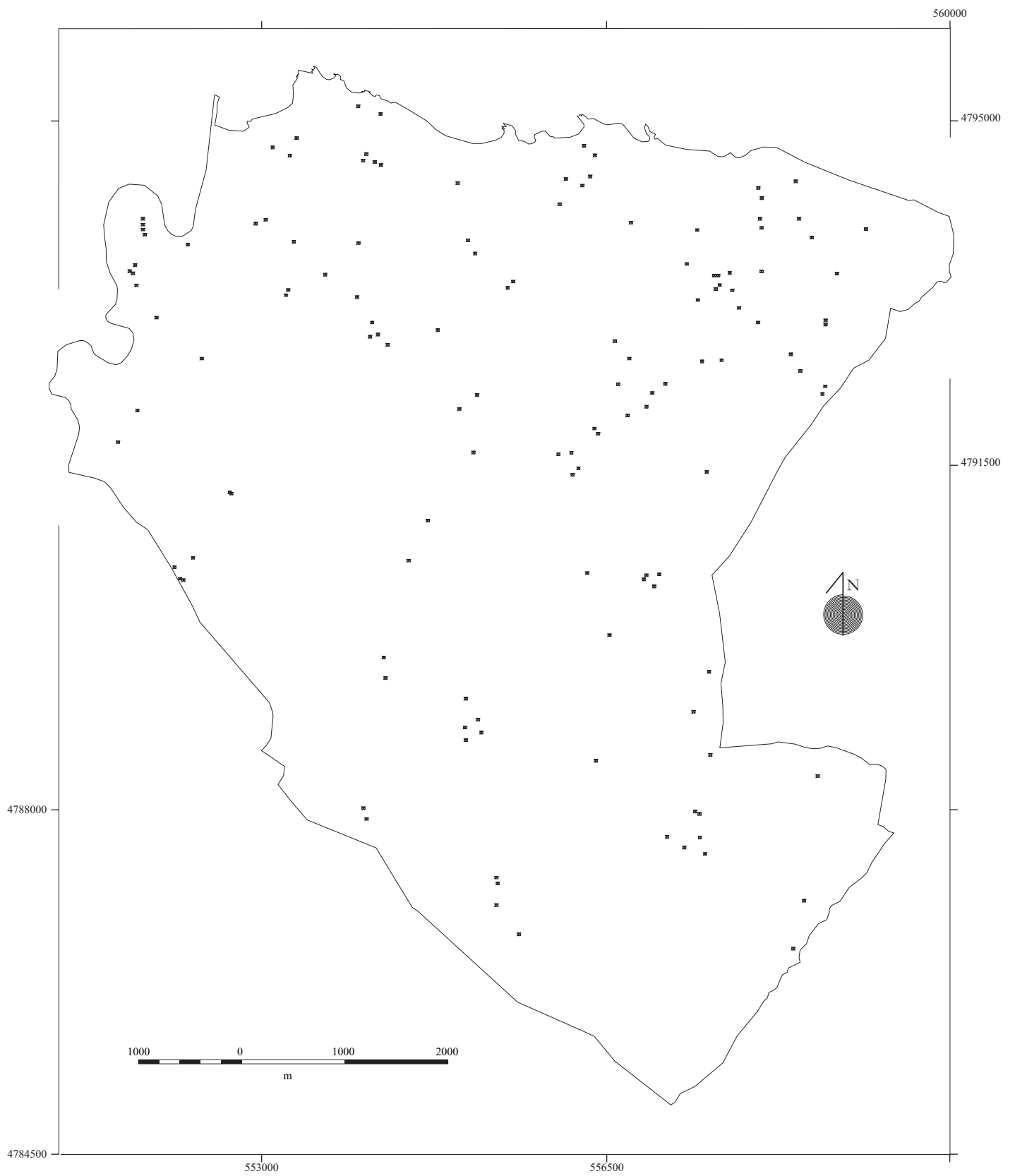
# Deslizamientos superficiales 1970-1983



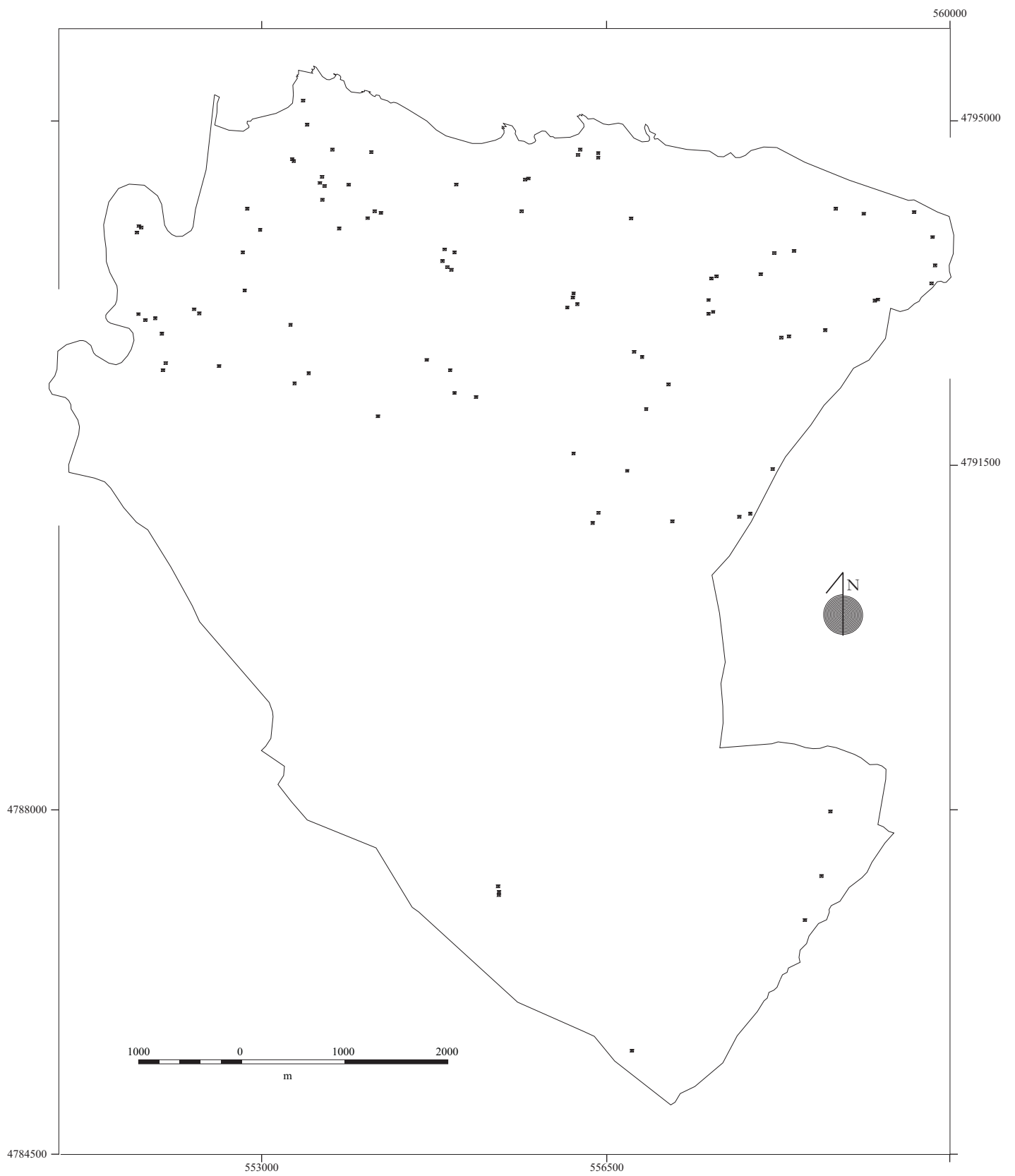
# Deslizamientos superficiales 1983-1985



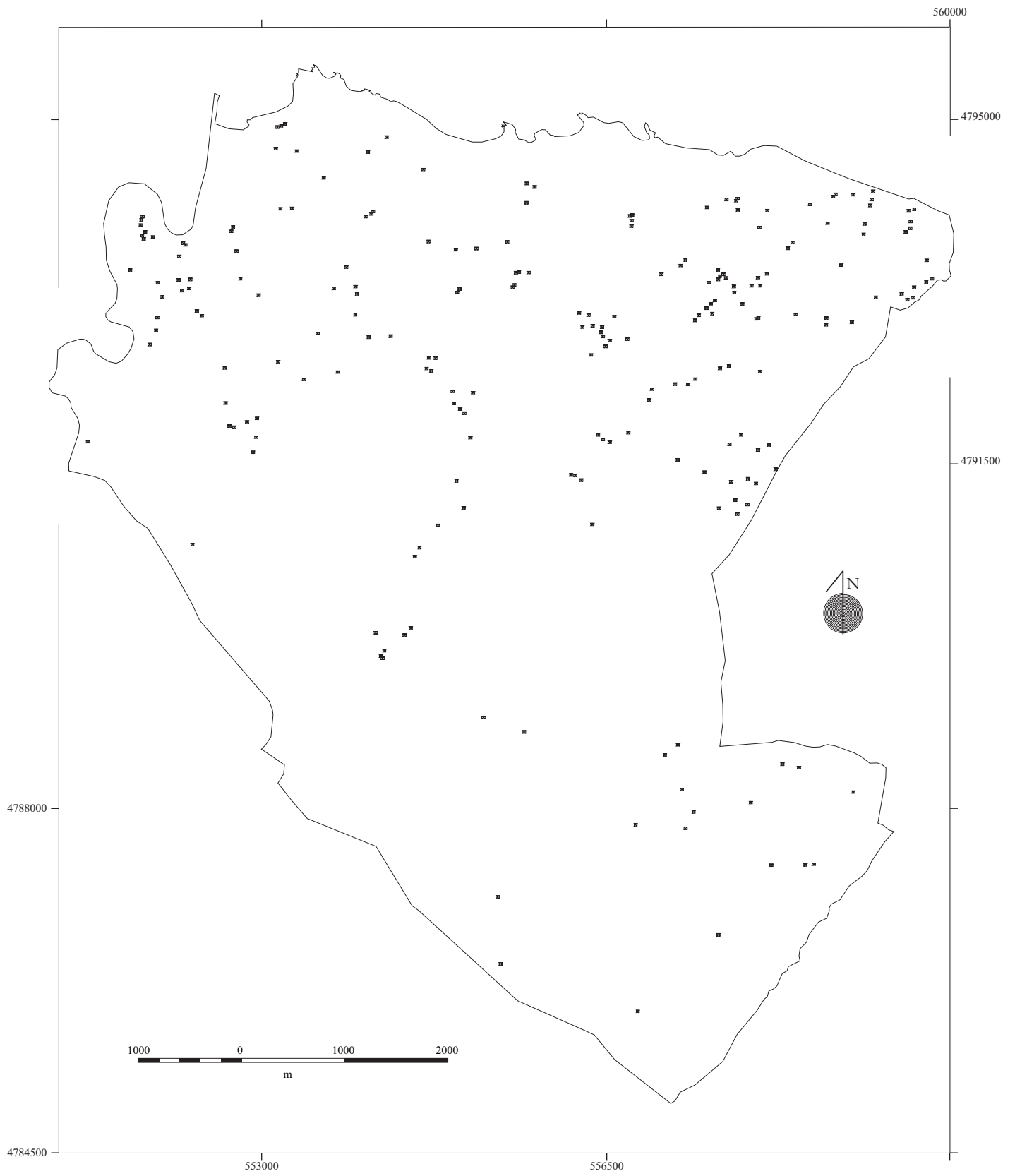
# Deslizamientos superficiales 1985-1991



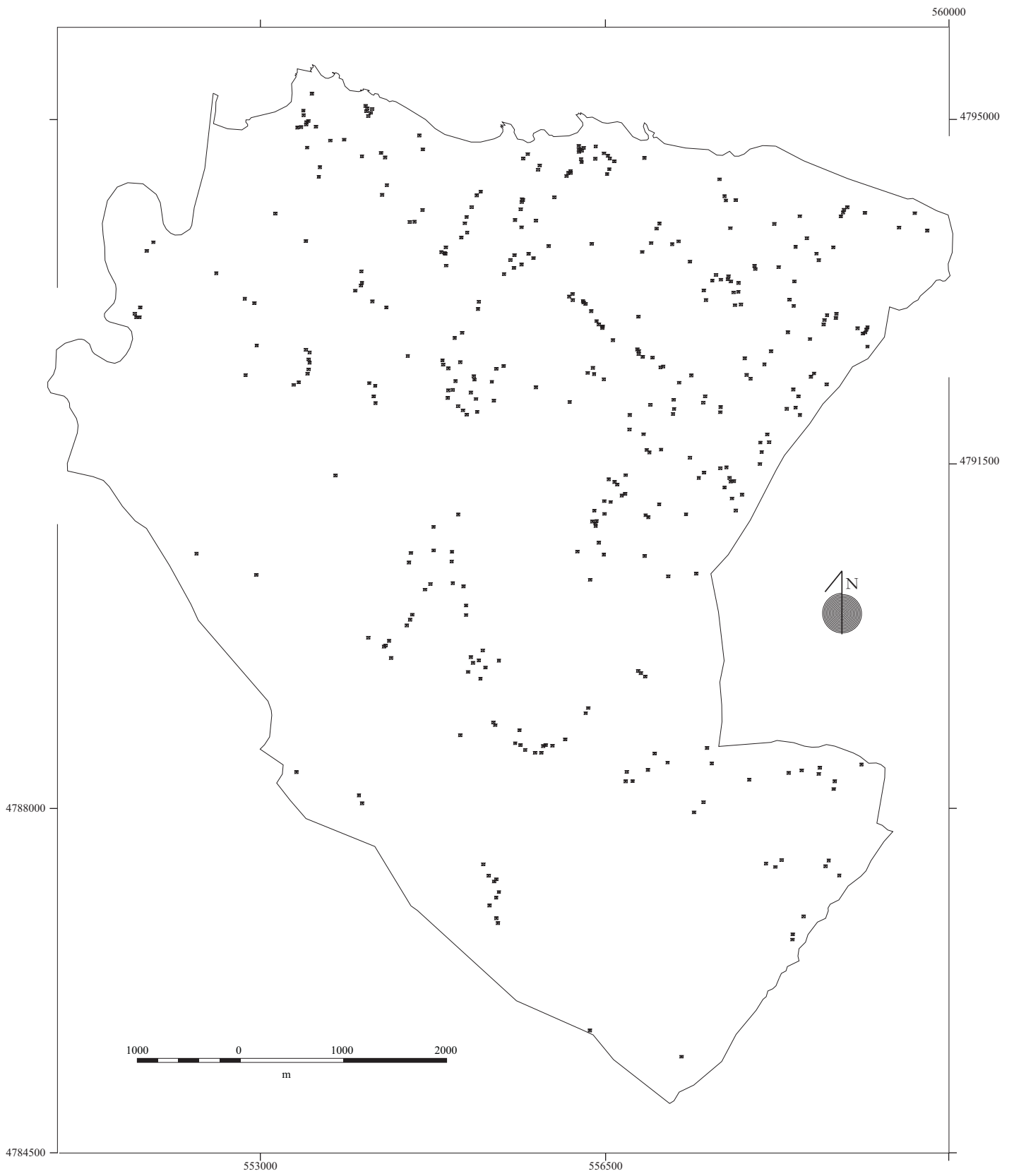
# Deslizamientos superficiales 1991-1993



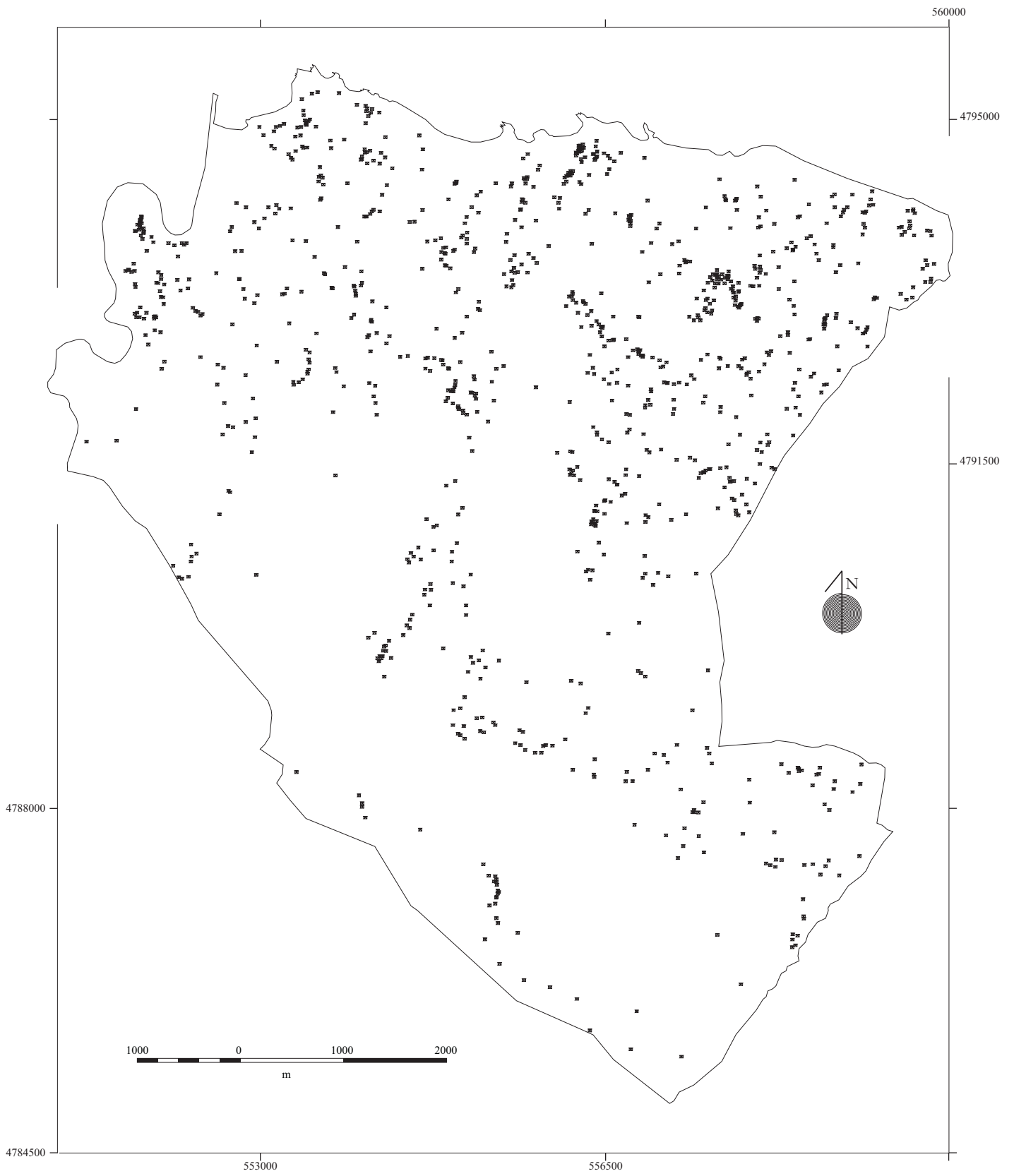
# Deslizamientos superficiales 1993-1997



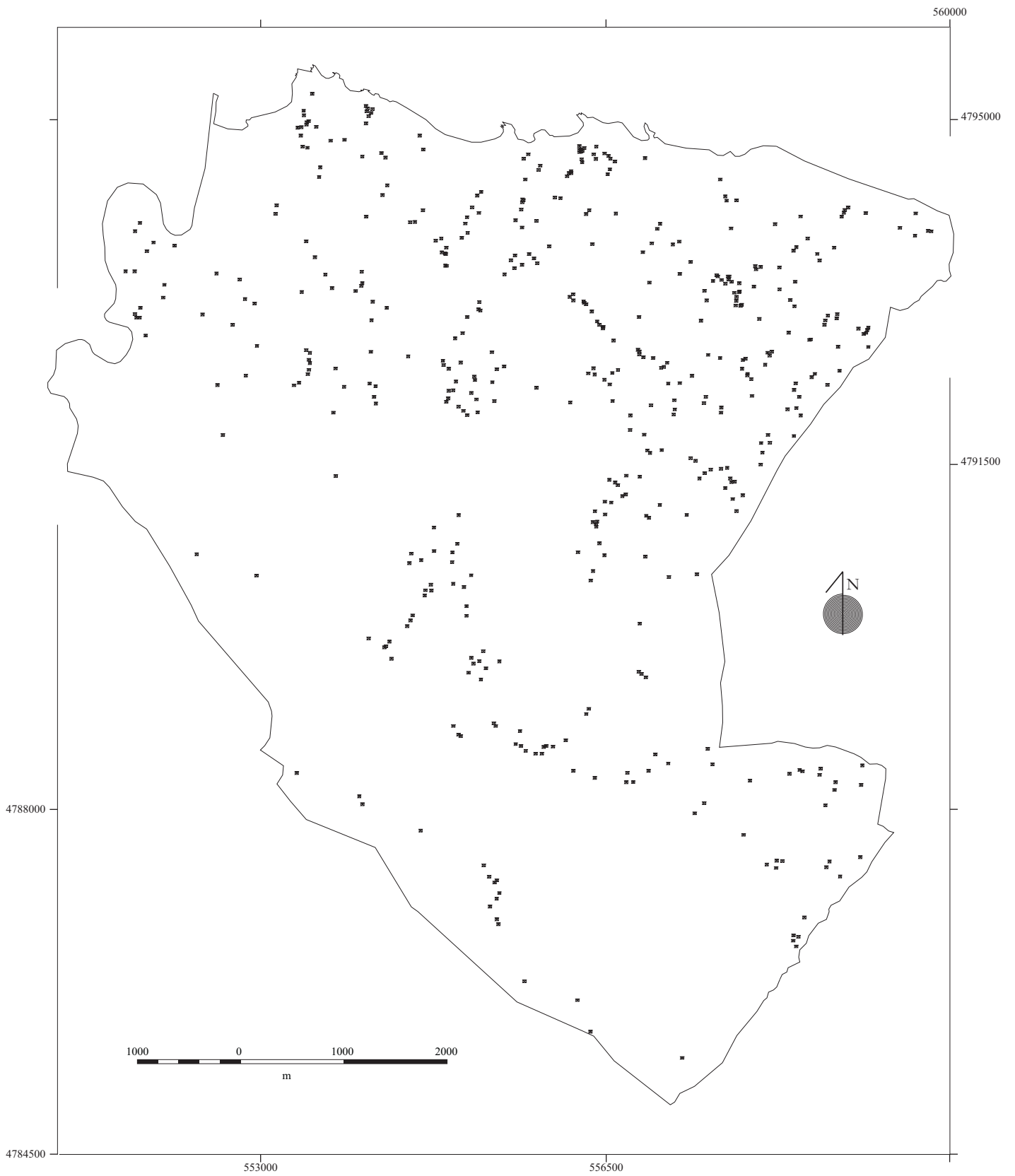
# Deslizamientos superficiales 1954-1970



# Deslizamientos superficiales 1954-1997

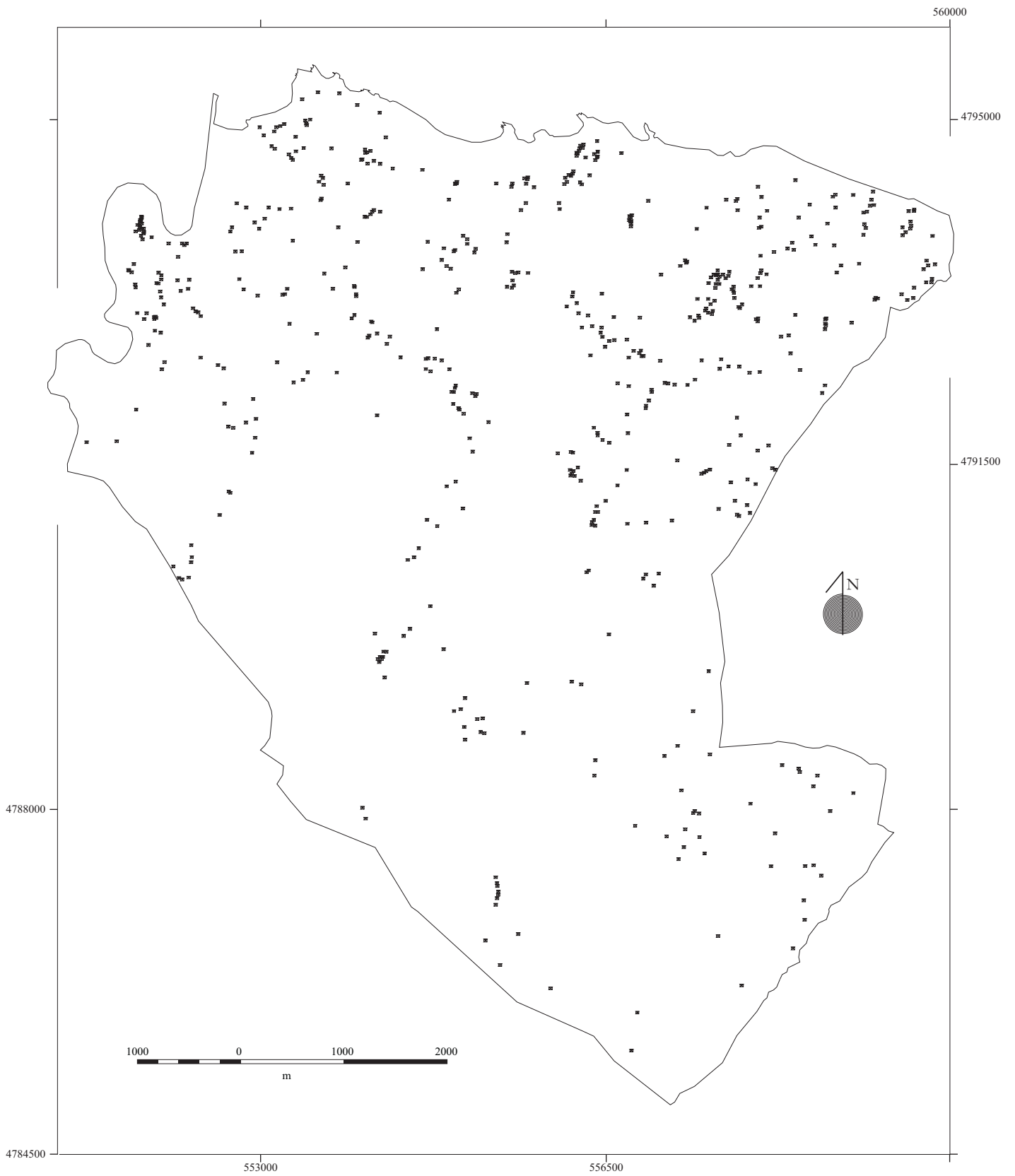


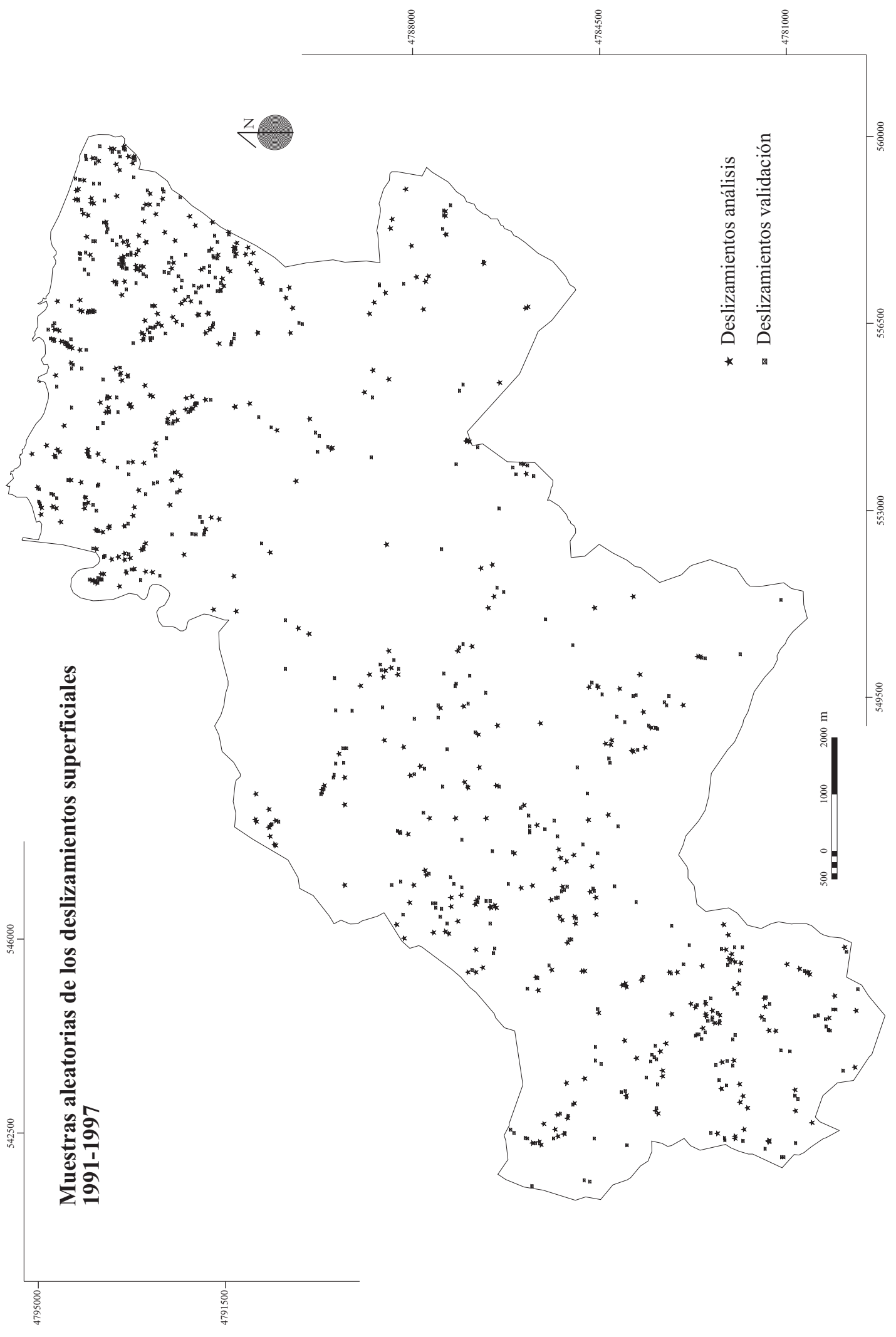
# Deslizamientos superficiales recientes previos a 1983





# Deslizamientos superficiales recientes posteriores a 1983





## FICHA DE DESLIZAMIENTOS

**Nº de ficha**

### **Localización**

Nombre del área

Hoja Topográfica 1:5.000

Número

Nombre

Coordenadas

X

Y

Z

Municipio

Fecha del inventario

### **Características de contexto**

#### Ladera e hidrología

Orientación

Ángulo de la zona de ruptura

Ángulo por encima de la zona de ruptura

Distancia a la cresta

Superficie de la cuenca de recepción

Perfil transversal en la zona de ruptura

Recto, cóncavo, convexo

Perfil longitudinal en la zona de ruptura

Ídem

Estado de erosión

    Incipiente, maduro

Distancia a cursos de agua

Condiciones hidrológicas

### Litología

Tipo de substrato (monolitológico, plurilitológico, espaciado)

Grado de alteración

Tipo de formación superficial (textura, composición)

Potencia de la formación superficial

Estructura (estratificación, fracturas, diaclasas)

    Dirección

    Buzamiento

    Espaciado

Relación estructura/ladera

### Vegetación

Tipo de cobertera vegetal en zona de ruptura

[eucaliptales, pinares (silvestre, americano), frondosas caducifólias, frondosas esclerófilas, bosque de ribera, matorral (brezales, helechales, escobonales, aulagares, piornales), matorral con árboles aislados, prados y pastos, prados y pastos con árboles aislados, cultivos, cultivos con árboles]

Tipo de cobertera vegetal en zona de progresión

    Ídem

### Uso del suelo

Tipo de uso del suelo zona de ruptura

(uso agrícola extensivo, uso agrícola intensivo, uso forestal extensivo, uso forestal intensivo, uso ganadero, uso minero, uso industrial, aprovechamiento cinegético, urbanización de densidad media, urbanización de densidad baja, ubicación de residuos sólidos, zona de protección, repoblación de árboles, regeneración natural, esparcimiento intensivo, esparcimiento extensivo, aprovechamiento hidrológico, grandes infraestructuras lineales, pequeñas infraestructuras lineales, infraestructuras puntuales, taludes, rellenos)

Tipo de uso del suelo en zona de progresión

Ídem

## **Características del movimiento**

### Tipo de rotura

Tipo de rotura del movimiento

Deslizamiento/zona deslizada (cuando no es posible singularizar movimientos)

Tipo cinemático

### Geometría de la zona de ruptura

Depresión máxima de la zona de ruptura

Longitud de zona de ruptura

Ancho de la zona de ruptura

Superficie de ruptura

Volumen de la masa deslizada

### Progresión de la masa movilizada

Anchura del pie

Ángulo de la pendiente del depósito

Superficie de depósito

Longitud del depósito

Desnivel entre cabecera y pie

Proyección horizontal del recorrido de la masa

Tipo de masa movilizada

Tipo de progresión del movimiento

Tipo cinemático

**Edad**

Absoluta/Relativa

Edad

Grupo de edad

**Causas**

Origen antrópico (deforestación, reforestación, incendio, área abandonada, área modificada - usos del suelo, taludes, rellenos, sobrecargas, modificación del régimen hidrogeológico, vías de comunicación)

Origen natural

(precipitación / clima, erosión, alteración litológica)

Origen desconocido

**Condiciones de estabilidad**

Grado de actividad

(activo, durmiente, estabilizado)

Grado de desarrollo

(incipiente, avanzado, agotado)

Velocidad estimada

(muy rápido, m/m; rápido, m/día; lento, m/año; muy lento, mm/año)

## **Efectos**

Elementos afectados

(personas, edificios, carreteras principales, carreteras secundarias, ferrocarril, acueducto, canales, puente, viaducto, muros, cultivos, jardines afectados)

Valor de las pérdidas (cuantificables/estimables)

Vulnerabilidad de los elementos

(grado de afectación, total, parcial, nulo)

Medidas correctoras efectuadas

(reforestación, cambio en el drenaje, muros, escolleras, gaviones, bullones, carga en el pie, descarga de material)

Diagnóstico: estimación de la posibilidad de reactivación, peligrosidad, riesgo.

Posibles medidas de control:

**Observaciones:**

## **Características generales de la ladera**

### ***ELEVACIONES (MDE)***

Cobertura continua de variable numérica.

Formato matricial.

#### **Definición**

Modelo digital de elevaciones. Se trata de la variable altitud sobre el nivel del mar, expresada de forma discreta mediante las celdas o pixels que forman la matriz del área de estudio. Es una variable continua medida en metros sobre el nivel medio del mar. Este modelo sirve de base para derivar todos los restantes modelos digitales matriciales.

#### **Función**

Variable condicionante de la estabilidad del terreno puesto que está relacionada con la pluviometría. En este sentido, ha sido utilizada por diversos autores (Carrara, 1983; Crozier, 1984; Clotet, 1984; Baeza, 1994). Además, de esta variable derivan todos los modelos de terreno restantes.

#### **Procedimiento de obtención**

Se han realizado 3 MDE, a partir de los datos contenidos en dos mapas topográficos:

- Mapa topográfico I (ver observaciones adicionales)
- Mapa topográfico II (ver observaciones adicionales)

Para la construcción del modelo digital de elevaciones se han utilizado dos herramientas SIG: Ilwis y Arc/Info.



El MDE I se ha interpolado con la orden “*command*” *Topogrid* de Arc/Info, que genera una matriz de elevaciones, coherente desde un punto de vista hidrológico, a partir de puntos, líneas y polígonos. Se han utilizado los siguientes datos: curvas de nivel con equidistancia cada 5 m, puntos de cota adicionales, la red fluvial constituida por ríos y arroyos, líneas adicionales indicativas de vaguadas, el límite de la zona de estudio y la línea de costa. Se han utilizado las tolerancias que el sistema tiene por defecto, y 40 interacciones en el proceso. El proceso se ha llevado a cabo con dos tamaños de celda diferentes: 10 x 10 m y 15 x 15 m, por lo que han resultado dos MDE distintos. El primero de ellos es el que ha sido utilizado para la práctica totalidad de los análisis de este trabajo. El de 15 x 15 m, se ha utilizado para un área en torno a la localidad de Itziar con el fin de comparar las técnicas analíticas, en esta zona y en La Pobra de Lillet.

El MDE II se ha interpolado mediante el programa Ilwis, que utiliza el *Borgefors distance transform* (Borgefors, 1986; Gorte y Koolhoven, 1990), rasterizando previamente toda la información vectorial. Se realizaron varios experimentos, utilizando distintos tamaños de celda y ventanas 3 x 3 y 5 x 5. Se llegó a un modelo de terreno óptimo con un tamaño de celda de 20 x 20 m, con una ventana de 5 x 5 pixels. Para transformar los datos vectoriales en matriciales se ha dado prioridad a las curvas de nivel sobre los puntos de cota adicionales. De este modelo digital sólo se ha derivado un modelo de pendientes y otro de orientaciones, con el fin de compararlos, en la zona del Bajo Deva, con los obtenidos a partir del *topogrid*.

### **Codificación**

Valores numéricos con una precisión de 0,01 m, cuando se ha utilizado para obtener los modelos derivados. Posteriormente reclasificados en 3 clases: 0-300 m, 300-600 m, > 600 m, cuando se ha utilizado como variable.

## Observaciones adicionales

### MAPA TOPOGRÁFICO I

Base topográfica de la Diputación Foral de Guipúzcoa que consta de dos tipos de datos:

- Curvas de nivel equidistantes 5 m, correspondientes a una restitución analítica, a escala 1:4.000, del vuelo de 1993.
- Cotas adicionales correspondientes a puntos distribuidos por todo el territorio y a puntos de cota tomadas en el cauce de los ríos y arroyos. Su origen es muy diverso: trabajos de topografía detallada de campo con estación total y GPS, y restitución directa de características similares a la restitución de las curvas de nivel.
- Líneas de ruptura: líneas de ríos, arroyos y vaguadas trazadas sobre una ortofoto elaborada en el mismo proceso de restitución analítica, teniendo en cuenta las cotas anteriormente citadas.

Los puntos de cota adicional fueron creados en el mismo proceso de restitución; por lo general, son puntos de alta resolución con la salvedad de que en algunos casos la coordenada z no fue tomada directamente en el suelo, sino sobre algún matorral o árbol, por lo que hay saltos considerables en las alturas de los puntos cuando éstos están muy cercanos, lo que obligó a hacer una comprobación detallada. Este hecho es especialmente llamativo en los puntos de cota de ríos y arroyos, puesto que constituyen series de puntos tomados, con separaciones constantes, por lo que la z del punto se midió directamente donde se situaban sus coordenadas x e y.

*Sistema de referencia de la base topográfica:*

Elipsoide internacional (Hayford, 1924)

Datum Postdam (Torre de Helmert)

Orígenes de coordenadas geodésicas: Meridiano de Greenwich y Ecuador

*Sistema cartográfico de representación:*

Proyección UTM (Proyección Universal Transversa de Mercator).

Huso 30 T

Durante el proceso de restitución del vuelo de 1993, se ha realizado una ortofoto que ha servido de base de referencia para los mapas temáticos que se describen posteriormente.

## MAPA TOPOGRÁFICO II

Base topográfica de la Diputación Foral de Guipúzcoa que consta de dos tipos de datos:

- Curvas maestras (25 m de equidistancia) digitalizadas del mapa topográfico 1: 5.000 de la Diputación Foral de Guipúzcoa, a partir del vuelo de 1988. De este mapa derivan las pistas y los ejes viarios.
- Curvas con equidistancia de 5 m, en torno a los valles principales; corresponden a una restitución analítica del vuelo de 1993 a escala 1: 4.000. Los dos tipos de curvas fueron indexados y corregidos hasta conseguir un ajuste perfecto.
- Cotas adicionales correspondientes a puntos distribuidos por todo el territorio. Su origen es muy diverso: trabajos de topografía detallada de campo con estación total y GPS, y restitución directa de características similares a la restitución de las curvas de nivel. Son equivalentes a los descritos en el mapa topográfico I, aunque en número muy inferior.

Sistema de referencia de la base topográfica

Elipsoide internacional (Hayford, 1924)

Datum Postdam (Torre de Helmert)

Orígenes de coordenadas geodésicas: Meridiano de Greenwich y Ecuador

Sistema cartográfico de representación

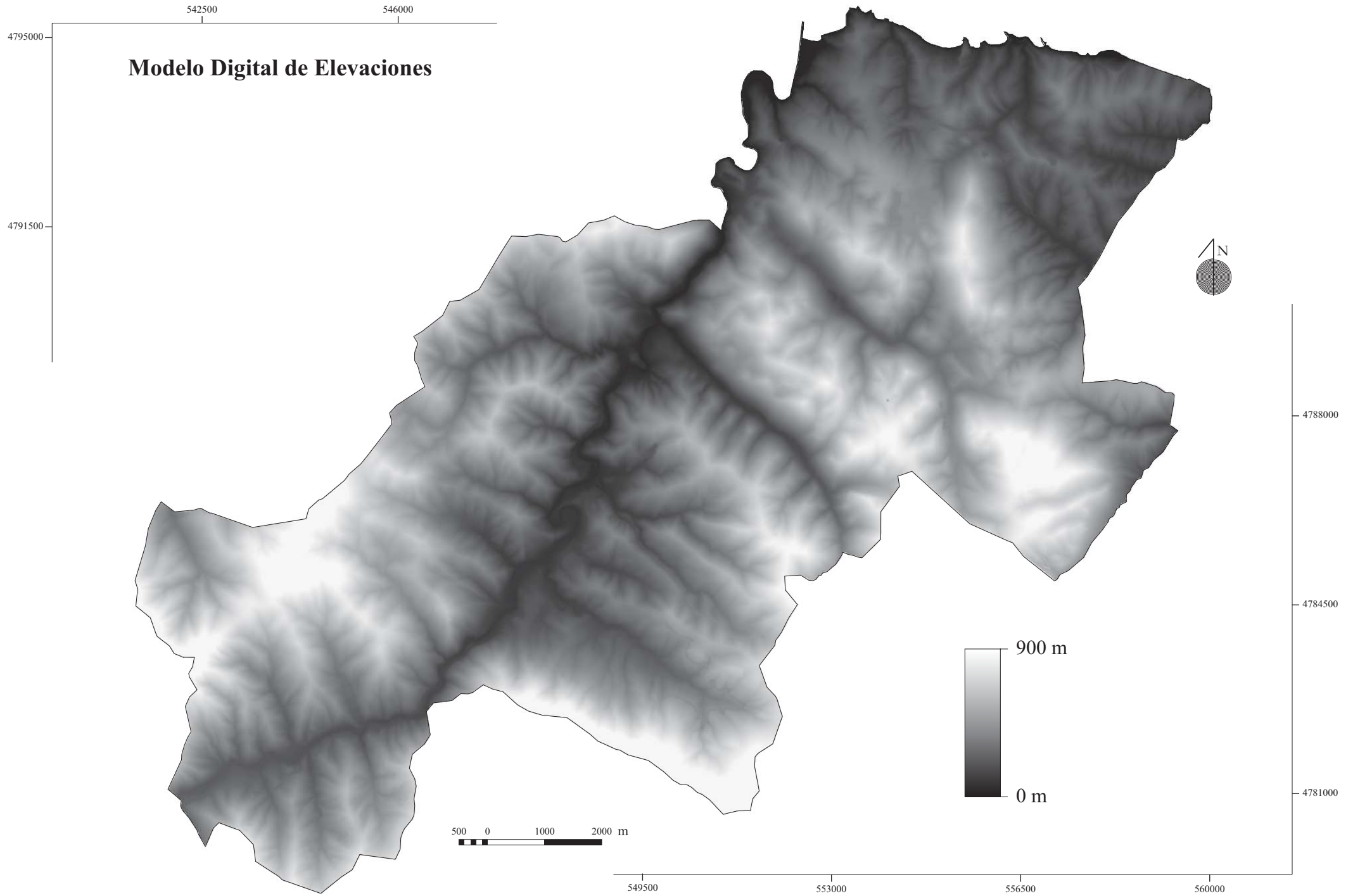
Proyección UTM (Proyección Universal Transversa de Mercator).

Huso 30 T

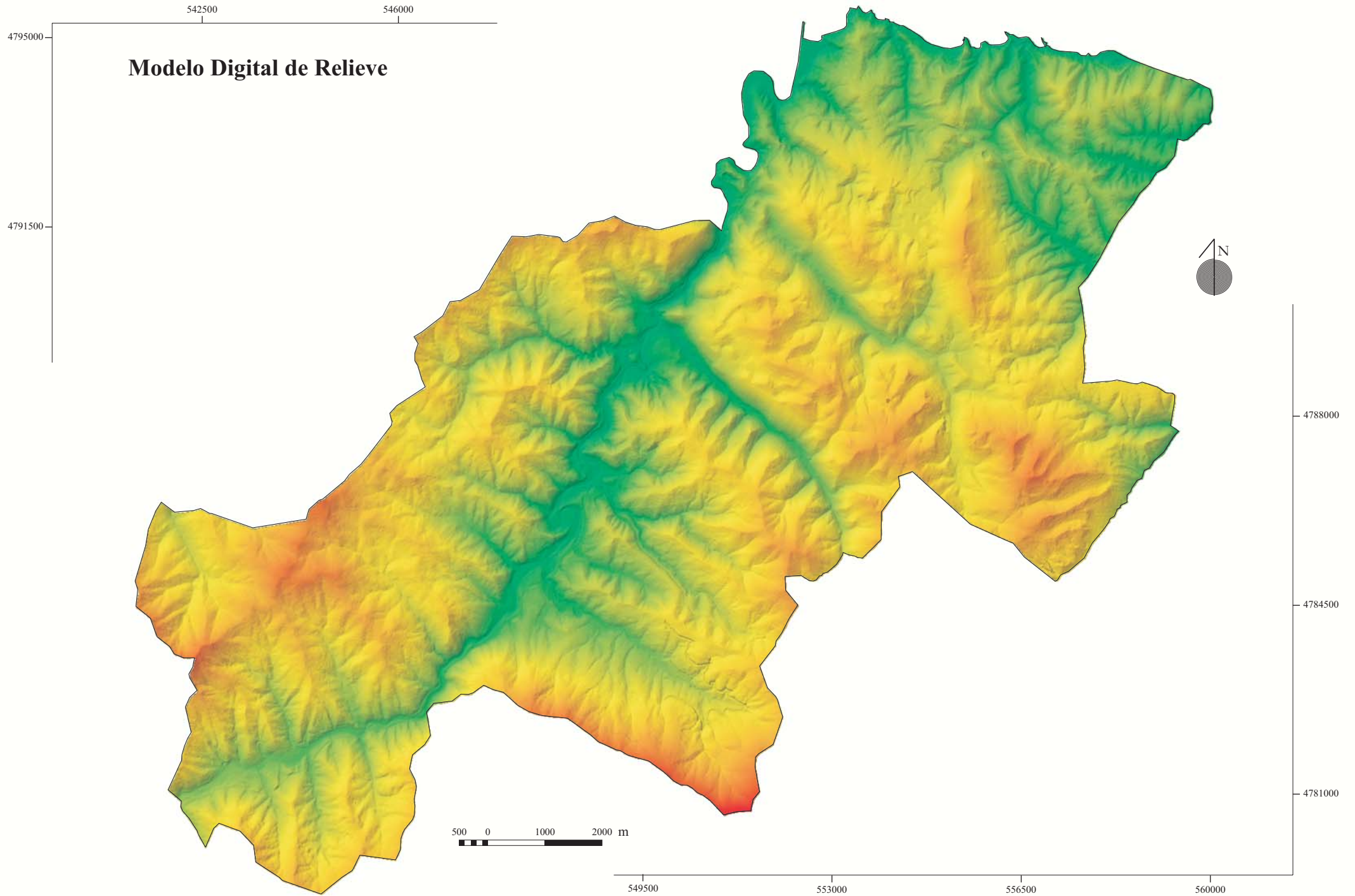
Uno de los errores que hemos identificado visualmente en los modelos realizados es un ligerísimo escalonamiento como efecto de las curvas de nivel. Por supuesto que este defecto genera resultados anómalos en algunos de los modelos digitales derivados del de elevaciones, como es el caso de PEND y PERFIL. Este efecto es muy común en todos los modelos digitales de elevaciones y no es fácil de resolver. Por último, decir que dado el gran número de datos con el que se han construido los modelos del mapa topográfico I, los errores calculados por el programa Arc/Info han resultado ser insignificantes.

Por otra parte, tal y como han señalado Carrara et al. (1996), los modelos desarrollados con el interpolador Ilwis ofrecen buenos resultados en la mayoría de las situaciones morfológicas.

# Modelo Digital de Elevaciones



# Modelo Digital de Relieve



## ***ORIENTACIONES (ORIENT)***

Modelo digital de orientaciones.

Formato matricial.

### **Definición**

Es la variable Orientación definida como la dirección de exposición de la ladera en un punto. Se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en un punto dado. Se trata de una variable derivada del MDE, cuantitativa, continua y con un rango de valores de 1° a 360°; el valor de -1 se utiliza para designar las celdas de pendiente 0°. Se representa como una malla regular de números decimales.

### **Función**

La orientación indica de manera indirecta la situación de una ladera en cuanto a su insolación y, por lo tanto, si una ladera se encuentra sometida a más o menos ciclos de humectación-desección. También se puede interpretar en términos de cantidad de vegetación (por ejemplo en zonas umbrías suele existir más bosque o matorral y una mayor estabilidad de la formación superficial por la presencia de raíces). Por otra parte, dependiendo de la dirección del avance de los frentes de lluvias, la orientación influirá en la cantidad y dirección de impacto de la lluvia durante los eventos de precipitación.

### **Procedimiento de obtención**

Es una variable derivada del MDE, generada en Arc/Info en GRID, mediante una función directa del mismo. Para obtener esta variable, junto con otras derivadas del MDE, se utiliza el archivo AML *fegrid1.aml*, archivo que corre después de hacerlo el archivo *femask.aml*.

Utiliza la función ASPECT que identifica la dirección de máximo cambio de los valores z (altitud) de cada celda con respecto a sus vecinas y, por lo tanto, la dirección de la ladera según la máxima pendiente (consultar manual de referencia de órdenes GRID de Arc/Info; ESRI, 1994).

### **Codificación**

Se ha clasificado en 9 clases de orientación (cada una, salvo la 9, abarcando 45° de arco):

1-N

2-NE

3-E

4-SE

5-S

6-SO

7-O

8-NO

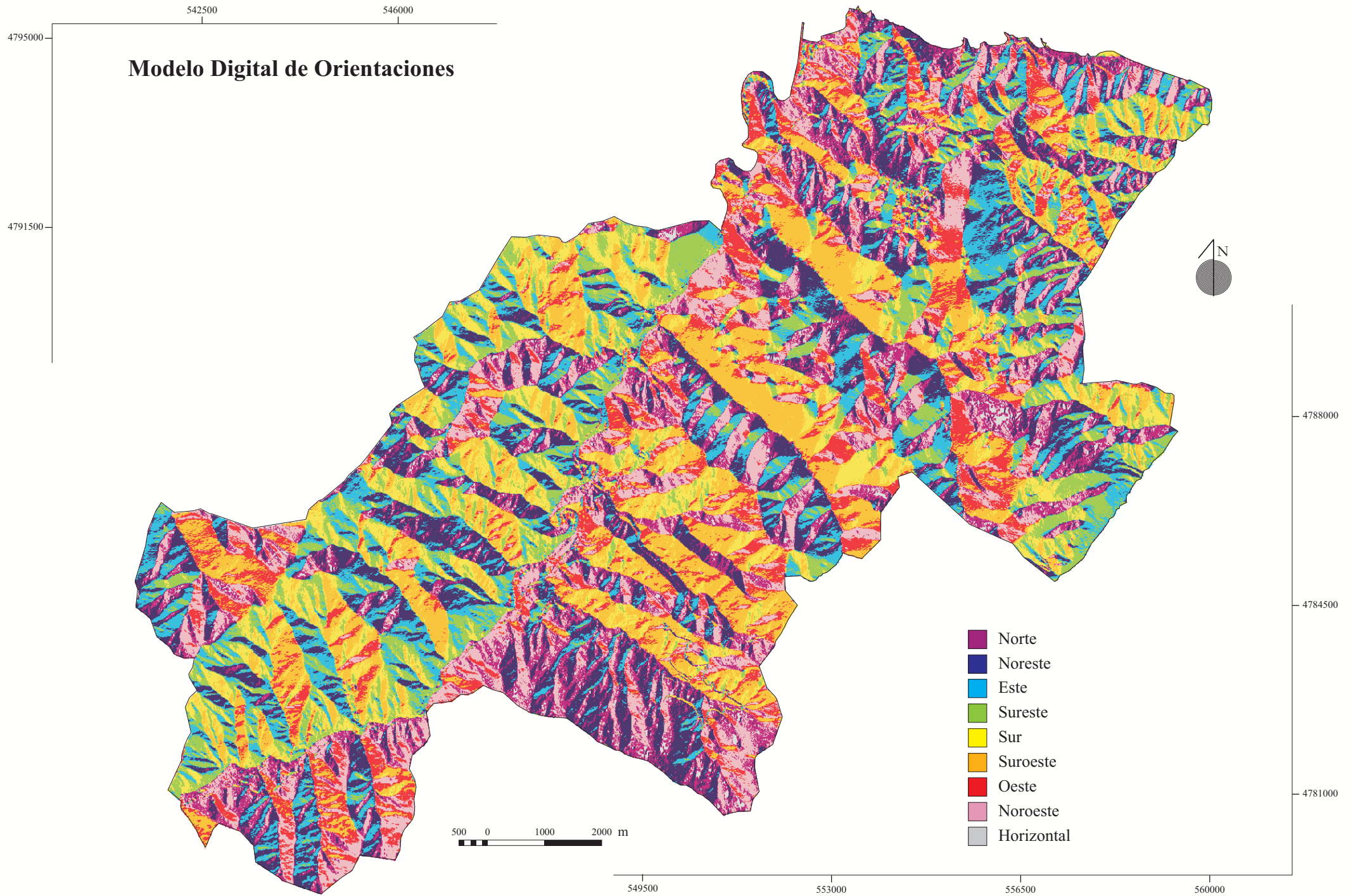
9-Horizontal

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática en la que la fiabilidad y precisión depende del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE.



# Modelo Digital de Orientaciones





## ***INSOLACIÓN (INSOL)***

Modelo digital de insolación.

Formato matricial.

### **Definición**

Grado de iluminación relativa originada por la radiación solar, en ausencia de nubosidad, dependiendo del ocultamiento topográfico ante una trayectoria solar.

### **Función**

La variable muestra el grado de exposición a la luz solar, que es un reflejo del grado de humedad y de la vegetación. Las zonas de sombra son más húmedas y las soleadas más secas (Neuland, 1976; Carrara et al, 1977; Carrara, 1983). Se le atribuye, con matices, un papel similar al que pueda ejercer la orientación de la ladera. La existencia de zonas de sombra es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante más importante del clima local.

### **Procedimiento de obtención**

Se determina para un día concreto del año, caracterizado por una declinación solar determinada, y para cada una de las diferentes posiciones del sol en su trayectoria del día. Es una variable derivada del MDE, generada en Arc/Info en GRID mediante un archivo AML que contiene el algoritmo para generar la insolación. El archivo es el *ins.aml* que demanda el nombre del MDE, la declinación solar para la fecha considerada y el intervalo de tiempo para el que se quiere medir la radiación solar incidente. Proporciona como resultado tantos modelos de insolación como intervalos de tiempo haya en las horas en que la trayectoria solar está sobre el horizonte para esa declinación.

Se obtiene con la función *hillshade* de Arc/Info (GRID), aplicada al Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Para su cálculo se ha considerado una latitud de 43,5° y una declinación solar de 22,5° correspondiente al 21 de Junio. Los intervalos de cálculo en la

trayectoria solar han sido de 60 minutos, por lo que se han obtenido para esta fecha 15 modelos de insolación distintos, correspondientes a las 15 posiciones del sol calculadas para este día. Con estos 15 modelos se ha obtenido un modelo de valores medios que es el realmente utilizado en el análisis.

Hay que señalar que este modelo sólo representa el efecto de sombra del relieve, sin tener en cuenta, la vegetación ni, por supuesto, la cobertera de nubes.

### **Codificación**

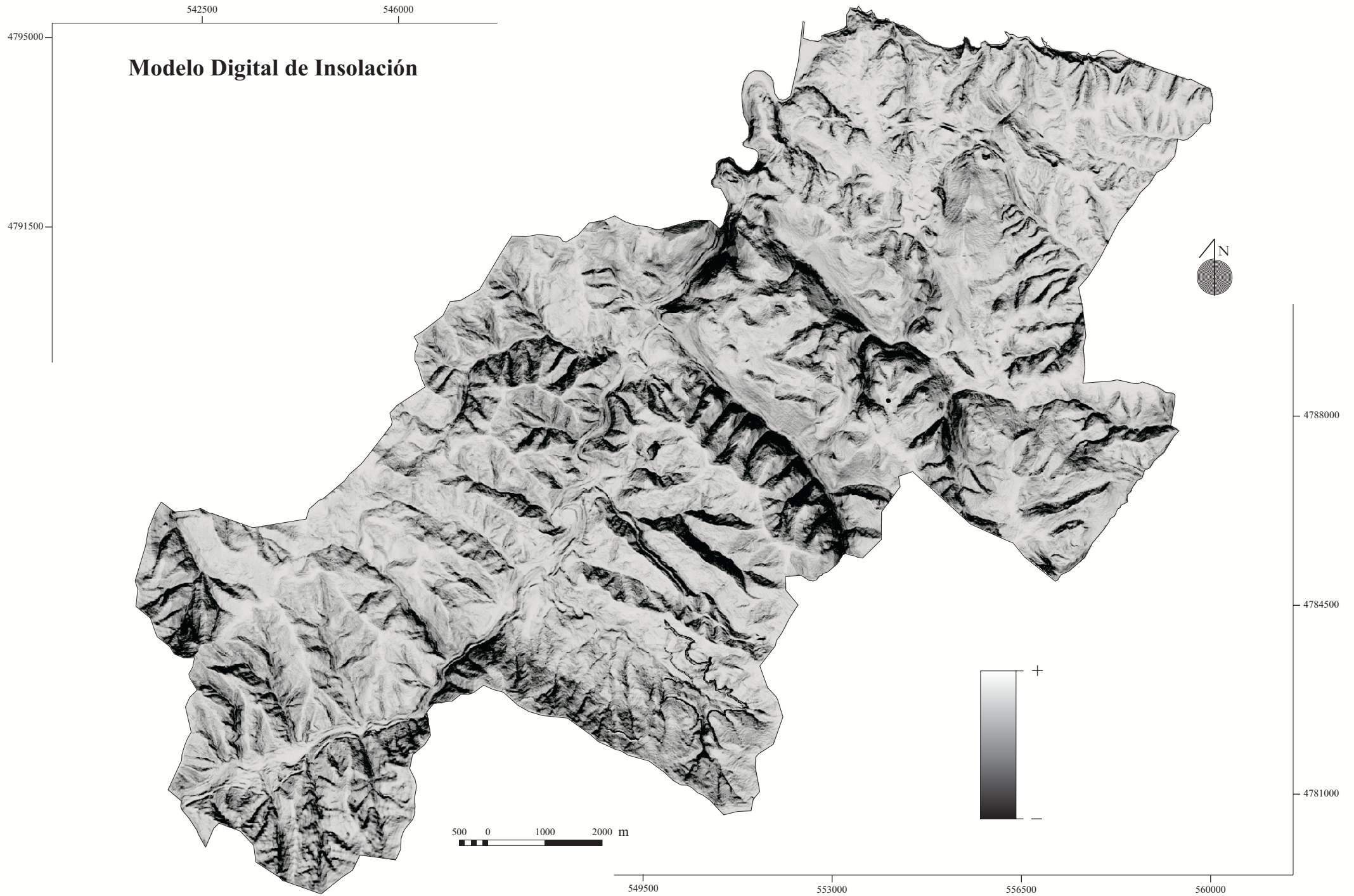
Los valores del modelo original comprenden desde 0 a 255, siendo 0 el valor correspondiente a la sombra permanente y 255 el correspondiente a la perpetua insolación. Todos los valores se han clasificado en 5 clases.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática, cuya fiabilidad y precisión dependen del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE.



# Modelo Digital de Insolación





## ***PRECIPITACIONES (PRECIP)***

Modelo digital de precipitaciones.

Formato matricial.

### **Definición**

Representa el gradiente de intensidades de precipitación en el área de estudio. Es una variable basada en datos cuantitativos.

### **Función**

Las precipitaciones intensas constituyen el factor desencadenante de deslizamientos superficiales más importante. En general, los eventos tormentosos tienen una distribución irregular, determinando una distribución espacial particular de los movimientos en cada evento. Sin embargo, y si los datos lo permiten, es posible extraer tendencias a lo largo del tiempo que indiquen los lugares en los que las precipitaciones son más intensas; de aquí la importancia de este modelo digital.

### **Procedimiento de obtención**

Se han digitalizado las isomáximas de precipitación (mm) en 24 horas, para un periodo de retorno de 5, 10, 25 y 50 años (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1999). Posteriormente y mediante la orden *topogrid* (Arc/Info) se han interpolado, con un tamaño de celda de 10 x 10 m. Con ello se han obtenido cuatro modelos de isomáximas correspondientes a los periodos de retorno arriba mencionados. Los cuatro modelos se han promediado y generalizado para obtener un modelo promedio.

### **Codificación**

Los valores del modelo digital son relativos y los límites numéricos que se muestran son aproximados, por el procedimiento utilizado para promediar. Estos valores se han dividido en 6 clases.

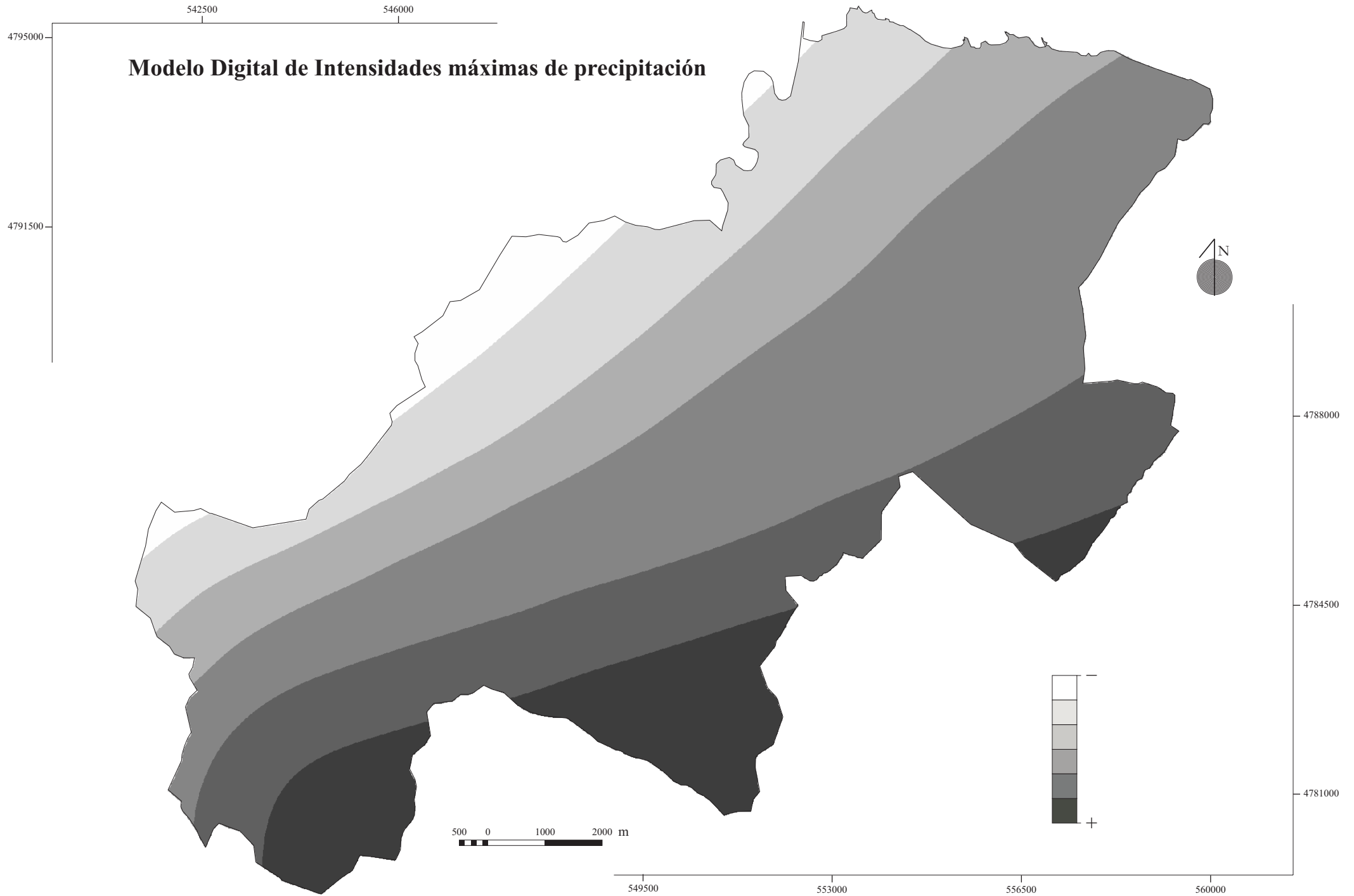
### **Observaciones adicionales**

El modelo está basado en datos del Estudio de Precipitaciones Intensas, Tiempos de Concentración y Caudales de Cálculo de las Cuencas del Territorio Histórico de Guipúzcoa (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1999). Los datos pluviométricos provienen de 15 pluviómetros de lectura continua, 4 de los cuales están en el interior de la zona de estudio del Bajo Deva, mientras que el resto están alrededor de la misma. A partir de estos datos se han obtenido las líneas isomáximas de precipitación (mm) en 24 horas, para un periodo de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

Hay que señalar que este modelo sólo representa las tendencias de intensidades máximas de precipitación y que, a pesar del alto número de estaciones de medida, no pueden reflejar las pequeñas variaciones locales. En comparación con esto, los errores en el proceso de interpolación son insignificantes.



# Modelo Digital de Intensidades máximas de precipitación





# CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA LADERA

## *PENDIENTE (PENDI y PENDII)*

Modelo digital de pendientes.

Formato matricial.

### **Definición**

Pendiente topográfica definida como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, expresada en grados de 0 a 90°. Es una variable cuantitativa continua que deriva del MDE.

### **Función**

Esta variable representa la pendiente natural de la ladera en la zona de rotura. La pendiente está muy relacionada con la aparición de roturas, dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad. La variable se relaciona directamente con las tensiones de corte tangenciales y normales en la formación superficial, e influye también en la distribución del agua en la ladera (Skempton, 1953; Jones et al., 1961; Colin-Rouse y Farhan, 1976; Moser y Hohensinn, 1983; Oyagi, 1984; Mulder, 1991). Algunos autores han realizado estudios comparativos en laderas de igual litología y condiciones climáticas, para establecer umbrales de pendiente para la estabilidad (Skempton, 1953; Brand y Hudson, 1982; Crozier, 1984).

### **Procedimiento de obtención**

Es una variable derivada del MDE. PEND I ha sido generada en Arc/Info, en GRID a partir de MDEI, mediante una función directa del mismo. Para obtener esta variable junto

con otras derivadas del MDE se utiliza el archivo AML *fegrid1.aml*, archivo que se ejecuta después de hacerlo el archivo *femask.aml*.

Utiliza la función “slope” que calcula la tasa máxima de cambio en el valor z (altitud) desde cada celda a sus vecinas. El programa utiliza una malla 3 x 3 pixels para calcular la pendiente de la celda central, usando una técnica de promedio máximo (consultar manual de referencia de órdenes GRID de Arc/Info; ESRI, 1994).

PENDII se ha generado a partir de MDEII con el interpolador *slope* de ILWIS.

### **Codificación**

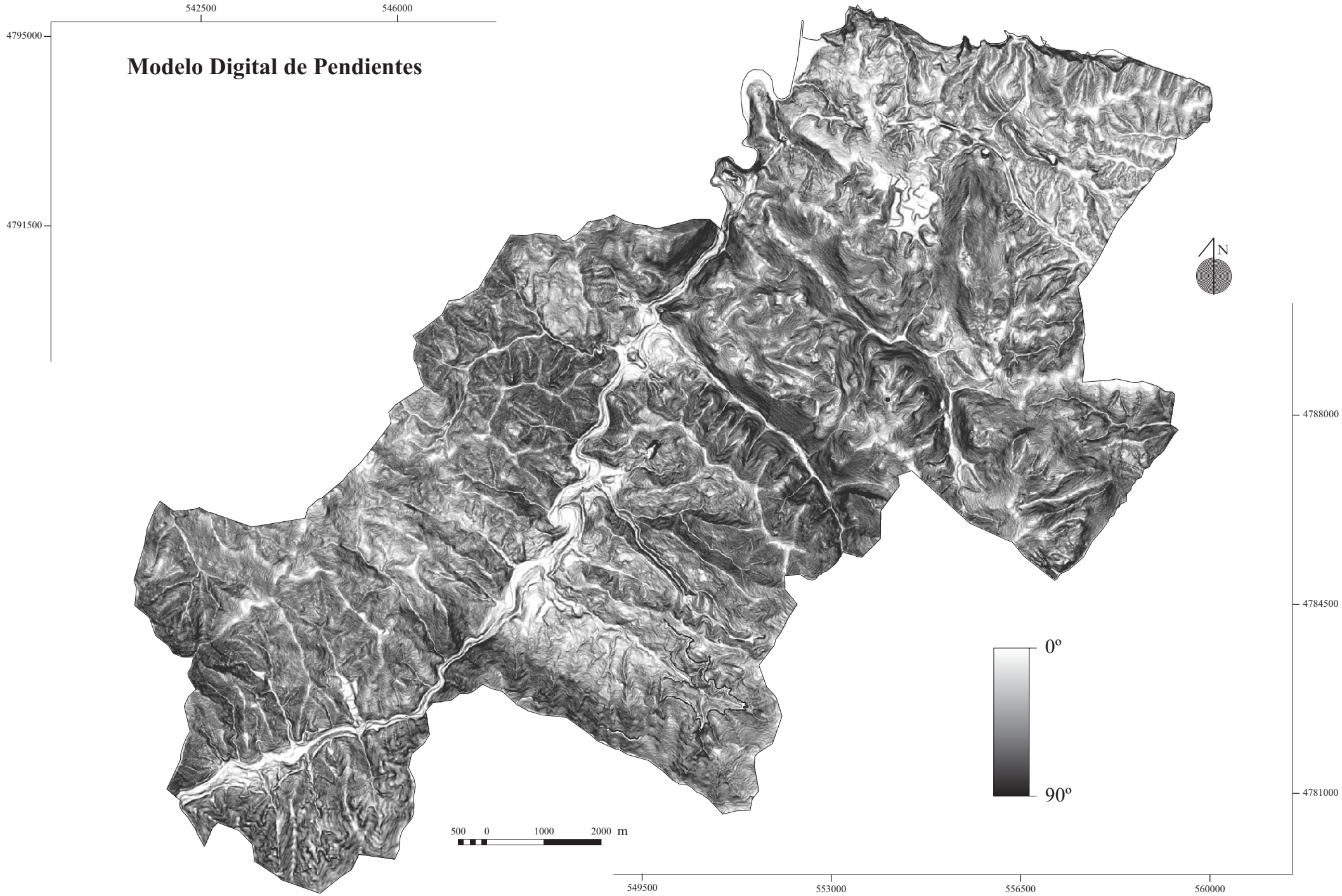
Valores numéricos de 0 a 90°.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática cuya fiabilidad y precisión dependen del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE.

El MDEI permite determinar pendientes de hasta 88°, lo que representa una precisión muy superior a la de los modelos habituales (consultar el capítulo de errores).

# Modelo Digital de Pendientes





## ***RUGOSIDAD (RUGOS)***

Modelo digital de rugosidad.

Formato matricial.

### **Definición**

La rugosidad del terreno se define como la variabilidad de la pendiente y representa la desviación (divergencia) entre vectores vecinos normales a la superficie de cada celda en un entorno de 3 x 3 celdas. Se deriva del MDE y es una variable cuantitativa y continua, con un rango de valores normalizados de 0 a 1. El valor 1 corresponde a rugosidad nula y los valores se hacen menores al aumentar la dispersión de los vectores (alta rugosidad). Normalmente los valores oscilan entre 0,7 y 1.

### **Función**

La rugosidad define bien formas como los límites de taludes y laderas, tanto en los valles como en las crestas (Felicísimo, 1994). Las laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar deslizamientos, debido a que los cambios sucesivos de pendiente favorecen una mayor infiltración del agua en el terreno y su inestabilidad.

### **Procedimiento de obtención**

La variable se deriva del MDE, generada en Arc/Info en GRID, mediante un archivo AML que contiene el algoritmo para generar la rugosidad. El archivo se denomina *rugos.aml* y demanda el nombre de los modelos de pendientes y de orientaciones. Para calcular la variabilidad de los vectores normales a la superficie, considera para cada celda un entorno 3 x 3 celdas. El módulo del vector se calcula mediante la suma de las 9 celdas, y su valor varía entre 0 para la máxima dispersión (rugosidad muy alta) y 1 para la mínima dispersión (rugosidad nula).

En este modelo hay un importante efecto de borde, en las dos filas o columnas de celdas que forman el margen del modelo, donde aparecen valores muy bajos de la variable, que reducen resolución al conjunto de la malla regular. Los valores más frecuentes son mayores que 0,7 (consultar archivo AML *rugos.aml*). Para evitar los efectos de borde que aparecen en muchos modelos derivados, es conveniente siempre obtener los modelos derivados para un área algo mayor al área de estudio, y después recortarlos.

### **Codificación**

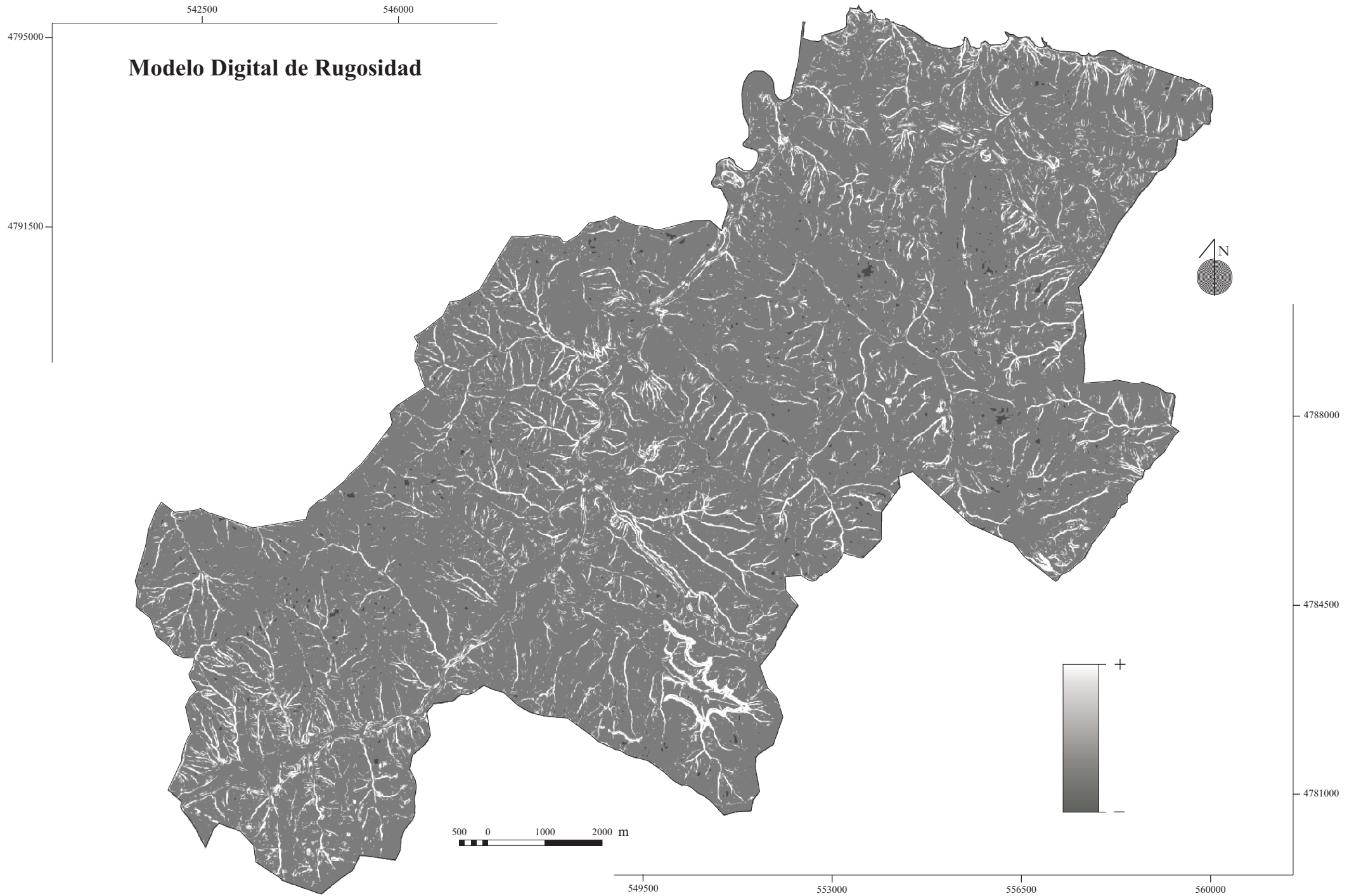
Se obtienen valores numéricos normalizados que van de 0 a 1. Siendo 0 la máxima dispersión (máxima rugosidad) y el valor 1 la mínima. Los valores se han clasificado en 3 clases: Superficie rugosa, rugosidad media y superficie plana.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática cuya fiabilidad y precisión dependen del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE. Tanto el tamaño de la celda, como la matriz que se aplica para calcular el valor en cada celda (ejemplo 3 x 3), determinan la escala de la rugosidad que representa el modelo. Así, por ejemplo, en el Bajo Deva la rugosidad se expresa en relación a un área de 900 m<sup>2</sup>, por lo que la rugosidad de pequeña escala no queda reflejada.



# Modelo Digital de Rugosidad





## ***CURVATURA (CURVAR)***

Modelo digital de curvatura.

Formato matricial.

### **Definición**

Indica el grado de convexidad/concavidad del terreno (tridimensional). Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de las segundas derivadas de la altitud (elevación); es decir, de los cambios de pendiente en el entorno de un punto dado. La variable deriva del MDE, siendo cuantitativa y continua, con un rango de valores cambiante según la zona y, por lo tanto, del MDE utilizado. El valor 0 en una celda corresponde a una superficie plana formada entre la celda en cuestión y sus ocho celdas vecinas, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda.

### **Función**

La variable se relaciona con los deslizamientos en la medida en que determina el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. A mayor concavidad se tiene mayor capacidad de retención del agua, mientras que a mayor convexidad se tiene mayor capacidad de dispersión del agua. En las primeras es de esperar un aumento de la presión de agua en los poros y una mayor acumulación de formación superficial, elementos que favorecen la aparición de deslizamientos superficiales (Carrara, 1983; Gao, 1993). Reneau y Dietrich (1987) y Reneau et al. (1990), en sendos estudios, han mostrado que la topografía cóncava favorecía la acumulación de depósitos coluviales, jugando un importante papel en la concentración del agua superficial y favoreciendo la generación de flujos de derrubios.

### **Procedimiento de obtención**

La variable se deriva del MDE, generada por Arc/Info en GRID mediante una función directa de este subprograma. Para obtener esta variable junto con otras derivadas del MDE se utiliza el archivo AML *fegrid1.aml*, archivo que se ejecuta después del archivo *femask.aml*.

Se utiliza la función *curvature* que calcula la curvatura de la superficie en cada celda mediante una ventana de análisis de 3 x 3 pixels y utilizando un polinomio de cuarto orden. La curvatura es la segunda derivada de la superficie -la pendiente de la pendiente- (consultar manual de referencia de órdenes GRID de Arc/Info; ESRI, 1994).

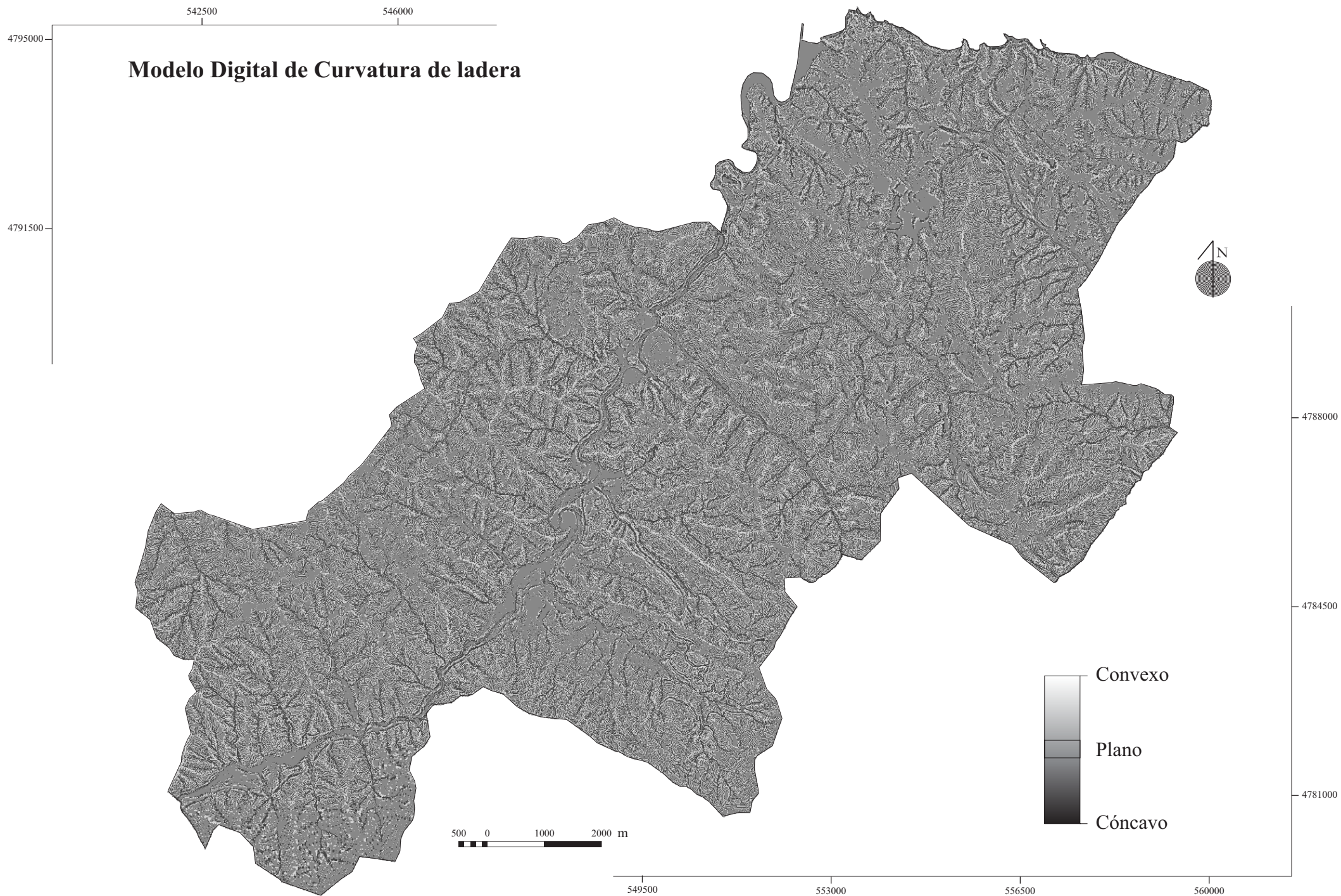
### **Codificación**

Valores positivos indican convexidad; valores negativos indican concavidad. El valor 0 indica que la superficie es llana. Se ha clasificado en 5 clases: concavo, plano-concavo, plano, plano-convexo, convexo.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática con fiabilidad y precisión dependientes del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE.

# Modelo Digital de Curvatura de ladera





## ***CURVATURA SEGÚN LA DIRECCIÓN DE MÁXIMA PENDIENTE (PERFIL)***

Modelo digital de curvatura según la dirección de máxima pendiente.

Formato matricial.

### **Definición**

Expresa el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Se define como la tasa de cambio en la pendiente medida en la dirección de la pendiente y depende de las segundas derivadas de la altitud (elevación); es decir, de los cambios de pendiente en el entorno de un punto dado. Por lo tanto es un reflejo del grado de concavidad-convexidad del terreno en la dirección de la pendiente. Se deriva del MDE, resultando una variable cuantitativa y continua. El valor 0 indica que la superficie es plana; valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. Es una variable generada mediante el módulo GRID como una malla regular de números decimales.

### **Función**

Esta variable expresa la capacidad de concentración o de dispersión del agua en una ladera. A mayor concavidad se tiene mayor capacidad de retención del agua, mientras que a mayor convexidad se tiene mayor capacidad de dispersión del agua. Dado que representa la geometría según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la aceleración y deceleración del flujo y, por tanto, influye en la erosión y sedimentación.

### **Procedimiento de obtención**

Se obtiene de forma opcional con la función *curvature* de Arc/Info (GRID), aplicada al Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Para obtener esta variable, junto con otras derivadas del MDE, se utiliza el archivo *AML\_fegrid1.aml*, archivo que se ejecuta después de

*femask.aml*. Cuando se calcula CURVAR, mediante la función *curvature*, opcionalmente se puede calcular, a la vez, PERFIL y PLA.

### **Codificación**

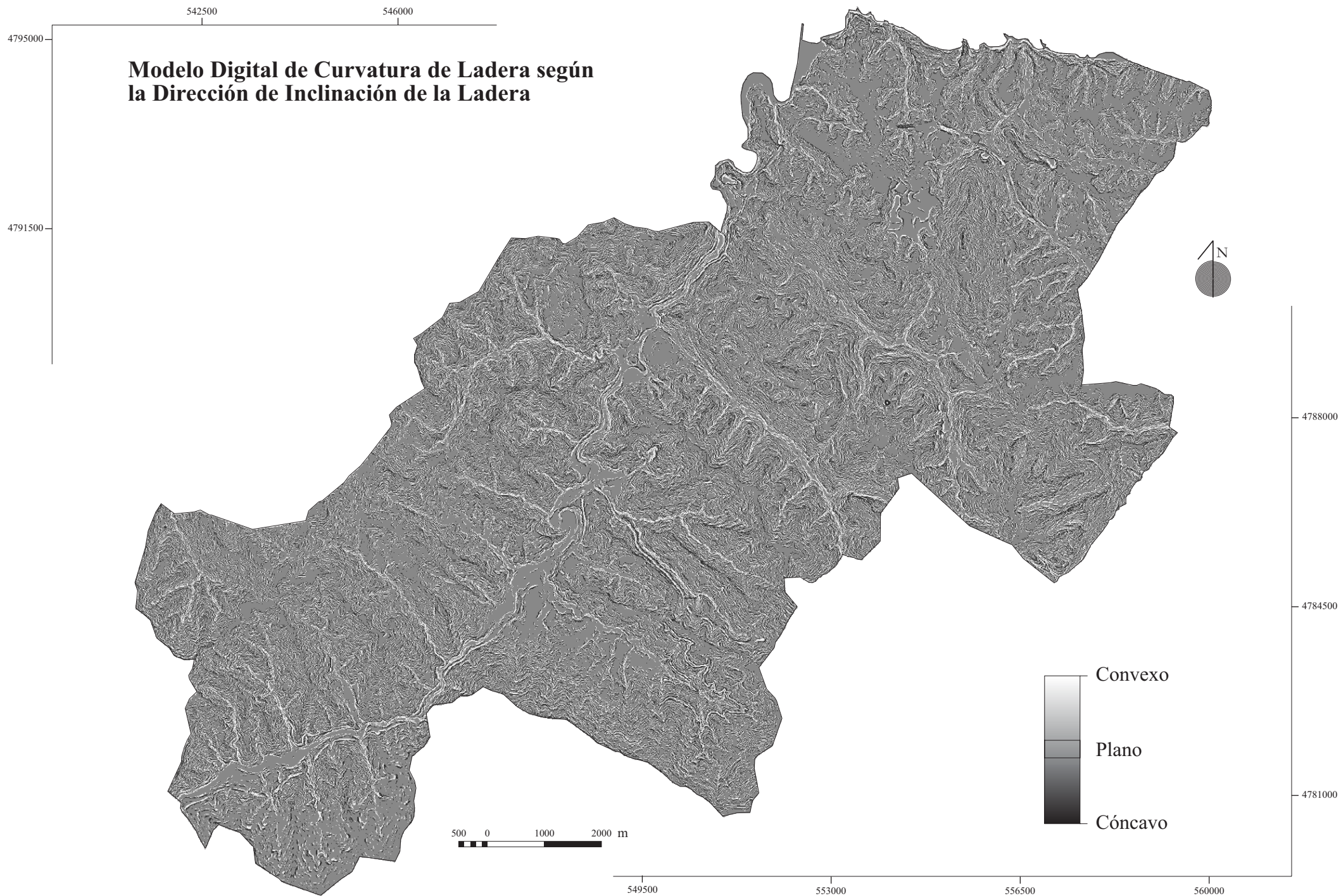
Los valores positivos indican convexidad; y los valores negativos indican concavidad. El valor 0 indica que la superficie es llana. Se ha clasificado en 5 clases: concavo, plano-concavo, plano, plano-convexo, convexo.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática con fiabilidad y precisión dependientes del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE.



# Modelo Digital de Curvatura de Ladera según la Dirección de Inclinación de la Ladera





## ***CURVATURA PERPENDICULAR A LA DIRECCIÓN DE MÁXIMA PENDIENTE (PLA)***

Modelo digital de curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente.

Formato matricial.

### **Definición**

Curvatura de la ladera en dirección transversal a la pendiente. Expresa la curvatura del terreno (bidimensional). Se define como la tasa de cambio en la pendiente medida perpendicularmente a la máxima pendiente y depende de las derivadas de segundo grado de la altitud (elevación), es decir de los cambios de pendiente en ambos lados de un punto dado, en sentido horizontal. Por lo tanto es un reflejo del grado de concavidad-convexidad del terreno transversal a la pendiente. Es una variable cuantitativa y continua que se deriva del MDE. El valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. La variable se genera mediante el subprograma GRID como una malla regular de números decimales.

### **Función**

Esta variable refleja las zonas hacia las que tiende a discurrir el agua en una ladera. A mayor concavidad se tiene mayor capacidad de retención del agua, mientras que a mayor convexidad se tiene mayor capacidad de dispersión del agua.

### **Procedimiento de obtención**

Se obtiene opcionalmente con la función *curvature* de Arc/Info (GRID), aplicada al Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Para obtener esta variable, junto con otras derivadas del MDE, se utiliza el archivo AML *fegrid1.aml*, archivo que se ejecuta después de hacerlo el archivo *femask.aml*. La función *curvature* calcula la curvatura de la superficie en el centro de cada celda. Para cada celda interior, el programa computa la curvatura en una

ventana 3 x 3 celdas mediante un polinomio de cuarto orden. La curvatura es la segunda derivada de la superficie (consultar manual de referencia de comandos GRID de Arc/Info; ESRI, 1994). Cuando se calcula la curvatura se calcula a su vez la variable PLA, así como la variable PERFIL.

### **Codificación**

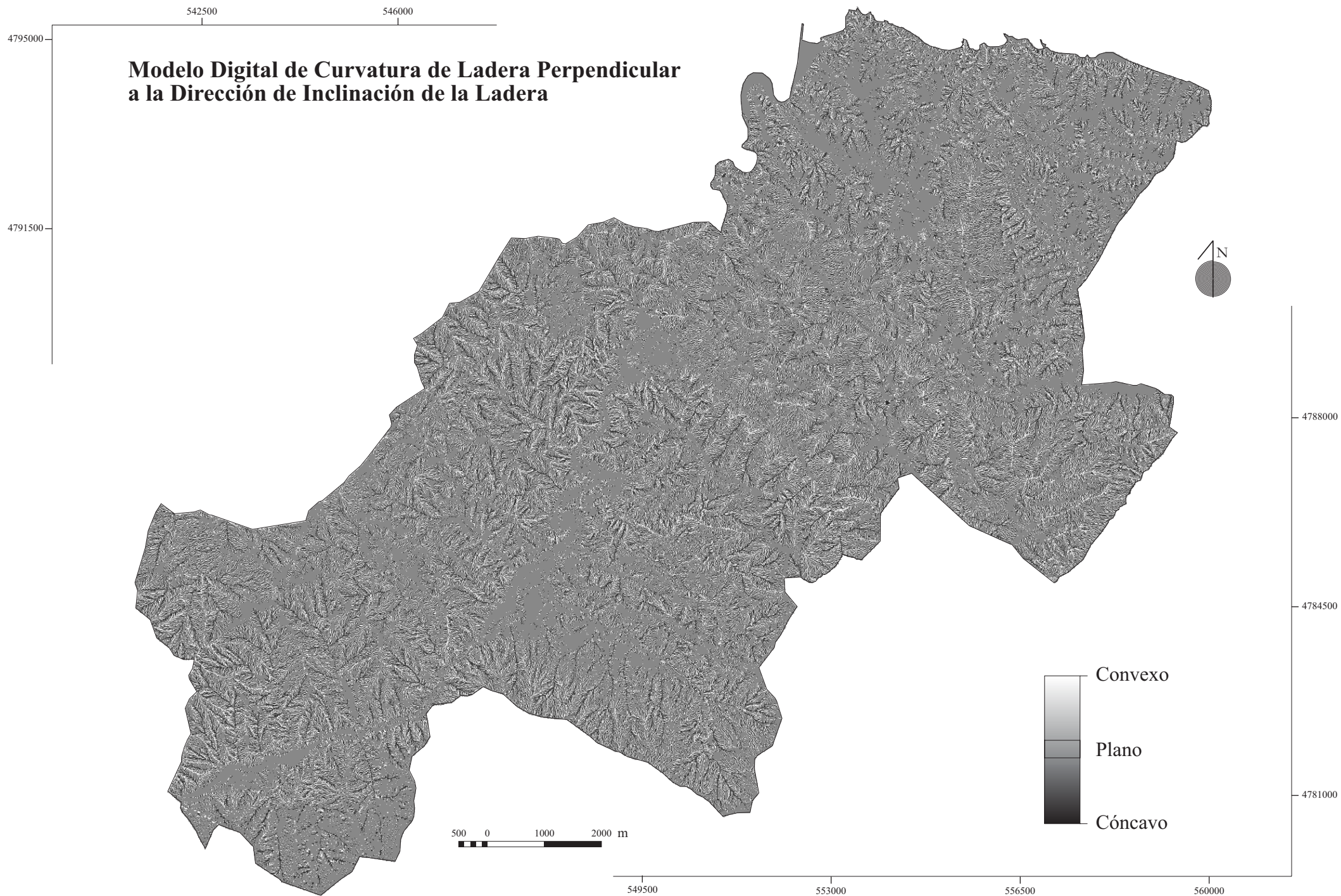
Valores positivos indican convexidad; valores negativos indican concavidad. El valor 0 indica que la superficie es llana. Se ha clasificado en 5 clases: concavo, plano-concavo, plano, plano-convexo, convexo.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática cuya fiabilidad y precisión dependen del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE.



**Modelo Digital de Curvatura de Ladera Perpendicular  
a la Dirección de Inclinación de la Ladera**





# CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA VERTIENTE

## *SUPERFIE DE LA CUENCA VERTIENTE (ACUENCA)*

Modelo digital de área de cuenca acumulada.

Formato matricial

### **Definición**

Expresa el área de la cuenca que drena hacia una celda determinada. Es el sumatorio de la superficie de las celdas que vierten a la misma. La variable se deriva del MDE y muestra un rango de valores que puede oscilar entre 0 y el número de celdas del área de estudio, como máximo. Si bien es una variable cuantitativa, los valores de la superficie son múltiplos del área de una celda, no tratándose de una variable continua. La superficie se expresa en metros cuadrados.

### **Función**

El valor de este parámetro está relacionado con la cantidad de agua de escorrentía que se acumula en cada punto. Se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar el terreno. Obviamente, a mayor cuenca drenante mayor será la cantidad de agua disponible, más agua infiltrada y más posibilidades de producirse roturas (Zaruba y Mencl, 1969; Neuland, 1976; Hatano, 1976: en Oyagi, 1984; Oyagi, 1984; Baeza, 1994). La superficie de la cuenca acumulada ha sido considerada como uno de los factores más importantes relacionados con la formación de los deslizamientos superficiales. Así, Hatano y Oyagi (1976; en Oyagi, 1984) refleja la influencia del ángulo de pendiente de la ladera y el área de la cuenca, mediante unos índices críticos con los que evaluar la susceptibilidad. Ahora bien, uno de los problemas en el cálculo automático de esta variable a partir del MDE es la calidad del mismo, tal y como plantea Carrara (1988).

## **Procedimiento de obtención**

La variable se deriva del MDE, generada por Arc/Info en GRID. Se usan dos funciones directas del subprograma mediante un pequeño algoritmo. Para obtener esta variable se utiliza el archivo AML *fegrid1.aml*, archivo que corre después de hacerlo el archivo *femask.aml*.

Las funciones utilizadas son la *flowdirection* y *flowaccumulation* que calculan, respectivamente, la dirección del flujo y la acumulación de flujo de las celdas superiores que vierten a otra. Para calcular la superficie total, el número de celdas que vierten a una celda determinada se multiplica por la superficie de la celda del MDE (consultar manual de referencia de órdenes GRID de Arc/Info; ESRI, 1994).

## **Codificación**

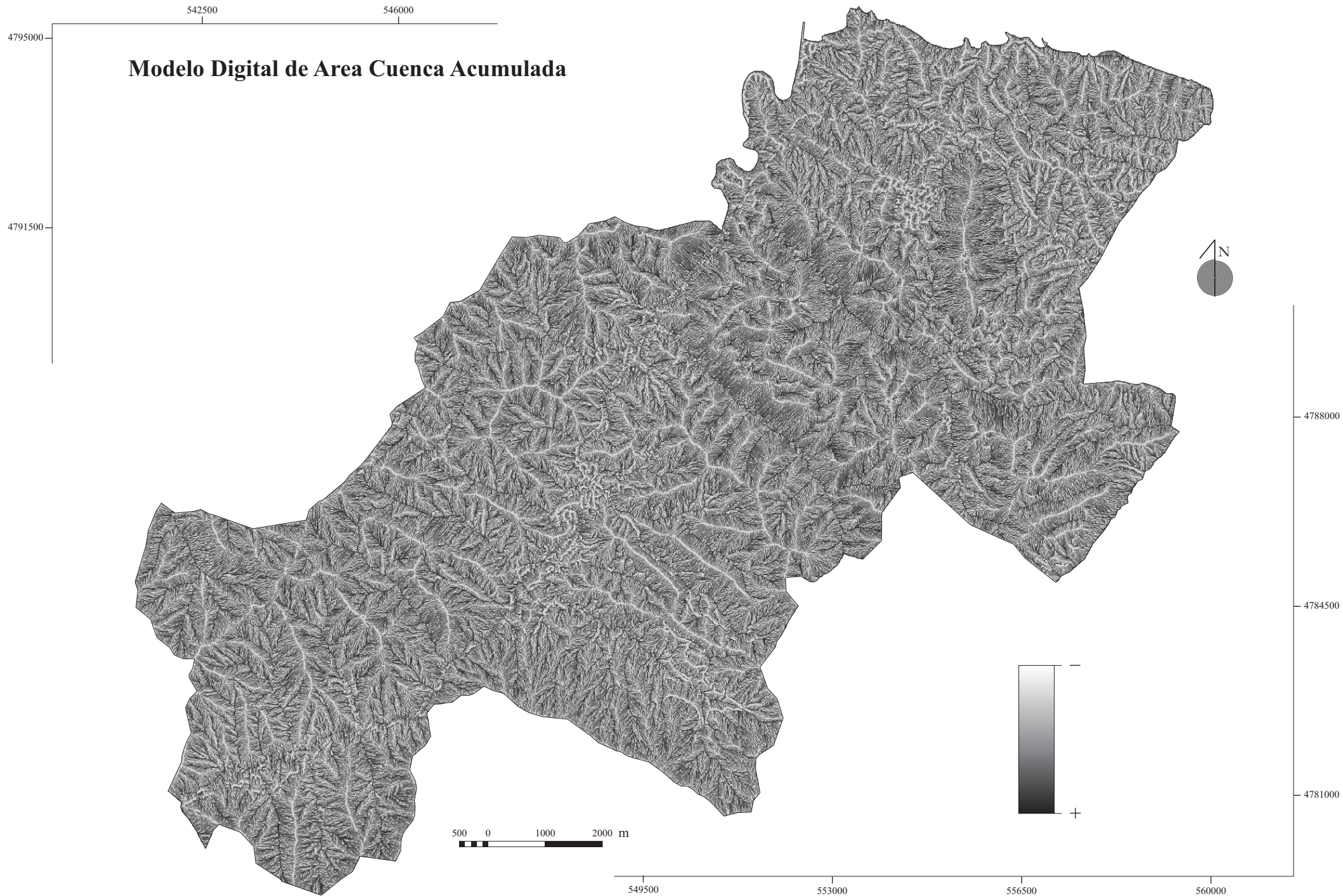
Valores numéricos, expresados en unidad de superficie, que se han reclasificado en 10 clases

## **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática con fiabilidad y precisión dependientes del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Ver Modelo Digital de Elevaciones (MDE). En este caso, el MDE y el tamaño de las celdas empleadas tienen una precisión superior a la de la mayoría de los modelos existentes. A pesar de ello, no pueden reflejar con exactitud todos los pequeños accidentes del terreno, por tanto, es posible que algunos de los valores de ACUENCA tengan una leve imprecisión. A pesar de la precisión del modelo, es posible que en algunos casos, por pequeñas irregularidades que no pueden quedar reflejadas, se produzcan “rupturas” de continuidad en la longitud, por lo que algunos valores de ACUENCA pueden ser inexactos.



# Modelo Digital de Area Cuenca Acumulada





## ***LONGITUD MÁXIMA DE LA CUENCA DRENANTE (LONG)***

Modelo digital de longitud máxima de cuenca drenante.

Formato matricial.

### **Definición**

Longitud real (no proyección) de cuenca drenante, aguas arriba de una celda. Expresa la longitud máxima recorrida por el flujo de agua en la cuenca que drena a cada celda. Se trata de la longitud medida sobre la superficie del terreno y no de su proyección horizontal. Por este motivo, la longitud de cada celda se pondera con la pendiente de la misma. La variable cuantitativa se deriva del MDE con un rango de valores que oscila entre el 0 y la dimensión máxima de la cuenca. La longitud se expresa en metros.

### **Función**

Esta variable es un indicador del tamaño de la cuenca drenante, de la capacidad de la misma para concentrar agua y de la posible acumulación de sedimentos (formación superficial). Esta variable está muy relacionada con la superficie de la cuenca de recepción (Baeza, 1994), así como con el desarrollo de la formación superficial y la capacidad de concentrar agua en superficie e infiltrada en el subsuelo. Takeshita (1971) encontró una relación muy estrecha entre la frecuencia de los deslizamientos causados por lluvias torrenciales y la distancia a la divisoria de aguas. Oyagi (1984) describe un índice empírico de susceptibilidad, desarrollado por Okimura, que utiliza la longitud media del área de la cuenca, obtenida mediante la relación entre el área y el ancho de la parte baja de la cabecera de la zona de ruptura. Así, las celdas próximas a una divisoria de aguas muestran menos roturas que las alejadas. Esta variable también se utiliza para calcular el tiempo de concentración en la cuenca. Esta variable está muy relacionada con la superficie de la cuenca de recepción (ACUENCA), así como con el desarrollo de la formación superficial y con la capacidad de concentrar agua.

## **Procedimiento de obtención**

Se obtiene con la función *flowlength* de Arc/Info (GRID aplicada a un modelo de dirección de flujo obtenido a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) (ver programas en AML, en anexos).

La variable se deriva del MDE, generada por Arc/Info dentro del subprograma GRID. Se utilizan dos funciones directas del subprograma, o lo que es lo mismo, una función directa que necesita de una malla regular intermedia generada previamente. Para obtener esta variable se utiliza el archivo AML *fegrid1.aml*, archivo que corre después de hacerlo el archivo *femask.aml*.

Las funciones utilizadas son la *flowdirection* y *flowlength*, utilizando la opción *upstream*; ambas calculan la dirección del flujo y la longitud del camino de flujo para cada celda. Para obtener la variable, se divide la distancia del recorrido del flujo en cada celda por el coseno del ángulo que tiene la pendiente de la misma.

## **Codificación**

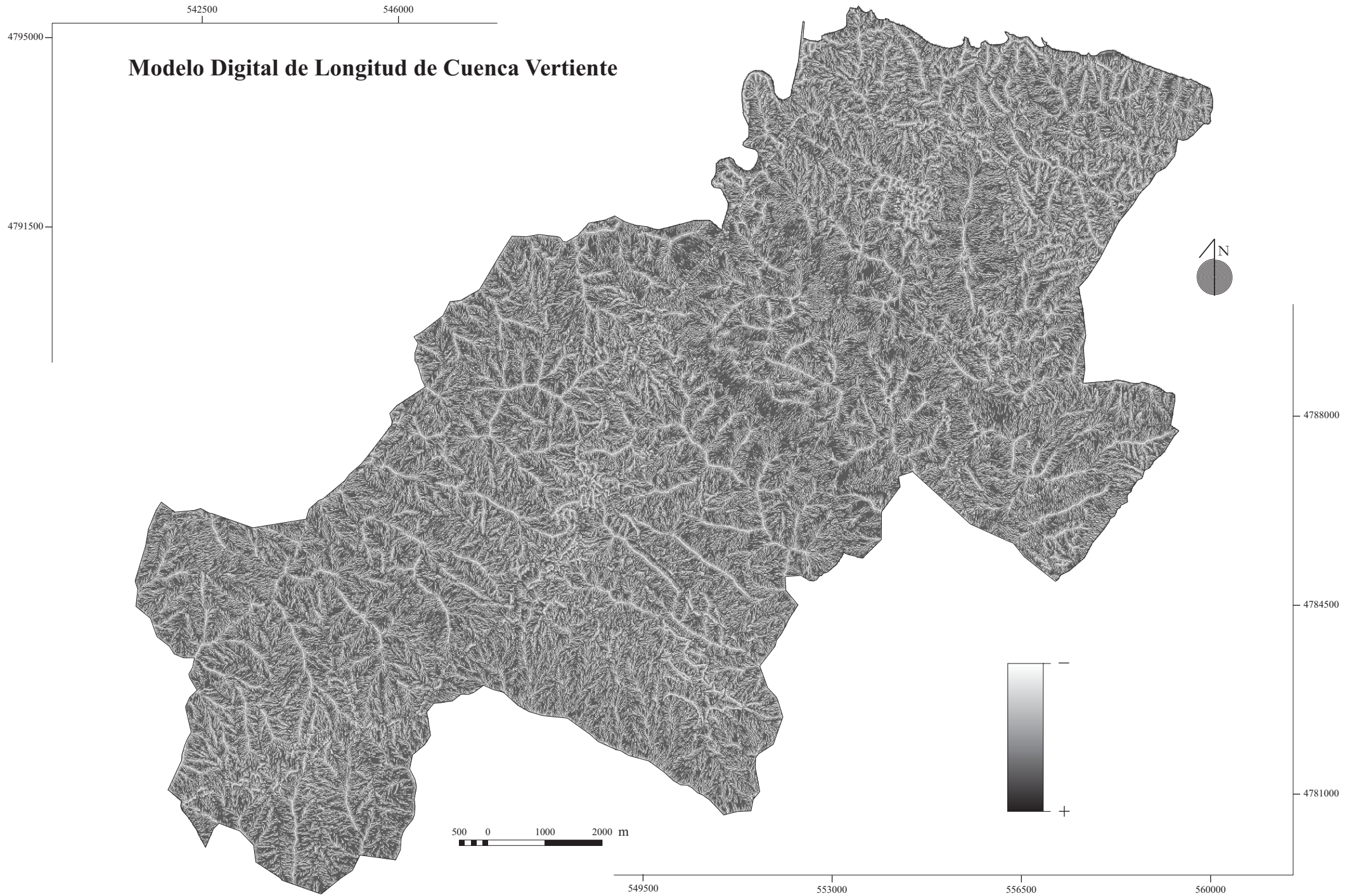
Valores numéricos, expresados en unidad de longitud (m), que se han reclasificado en 10 clases.

## **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática cuya fiabilidad y precisión dependen del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Ver Modelo Digital de Elevaciones (MDE). La precisión del MDE utilizado y el tamaño de las celdas empleadas permiten representar con gran fidelidad la realidad. Aún así, algunos pequeños accidentes del terreno no se reflejarán adecuadamente y puede haber pequeñas imprecisiones en los valores de LONG. A pesar de la precisión del modelo, es posible que en algunos casos, por pequeñas irregularidades que no pueden quedar reflejadas, se



# Modelo Digital de Longitud de Cuenca Vertiente





produzcan “rupturas” de continuidad en la longitud, por lo que algunos valores de LONG pueden ser inexactos.

## ***ÁREA DE LA CUENCA VERTIENTE CON FORMACIÓN SUPERFICIAL (AFS)***

Modelo digital de área de la cuenca vertiente con formación superficial.

Formato matricial.

### **Definición**

Área de cuenca con formación superficial. Expresa el área de la cuenca que contiene formación superficial y drena hacia una celda determinada. Al igual que la variable ACUENCA se obtiene sumando la superficie de aquellas celdas que contienen formación superficial y que vierten a la celda. Se trata de una variable que podríamos considerar mixta o secundaria, dado que precisa de una información obtenida inicialmente en formato vectorial (la variable FMS), junto con la superficie de cuenca obtenida a partir del MDE. El rango de valores puede oscilar entre 0 y el número de celdas del área de estudio. Aunque es una variable cuantitativa, sus valores son múltiplos del área de una celda. Los valores se expresan en metros cuadrados.

### **Función**

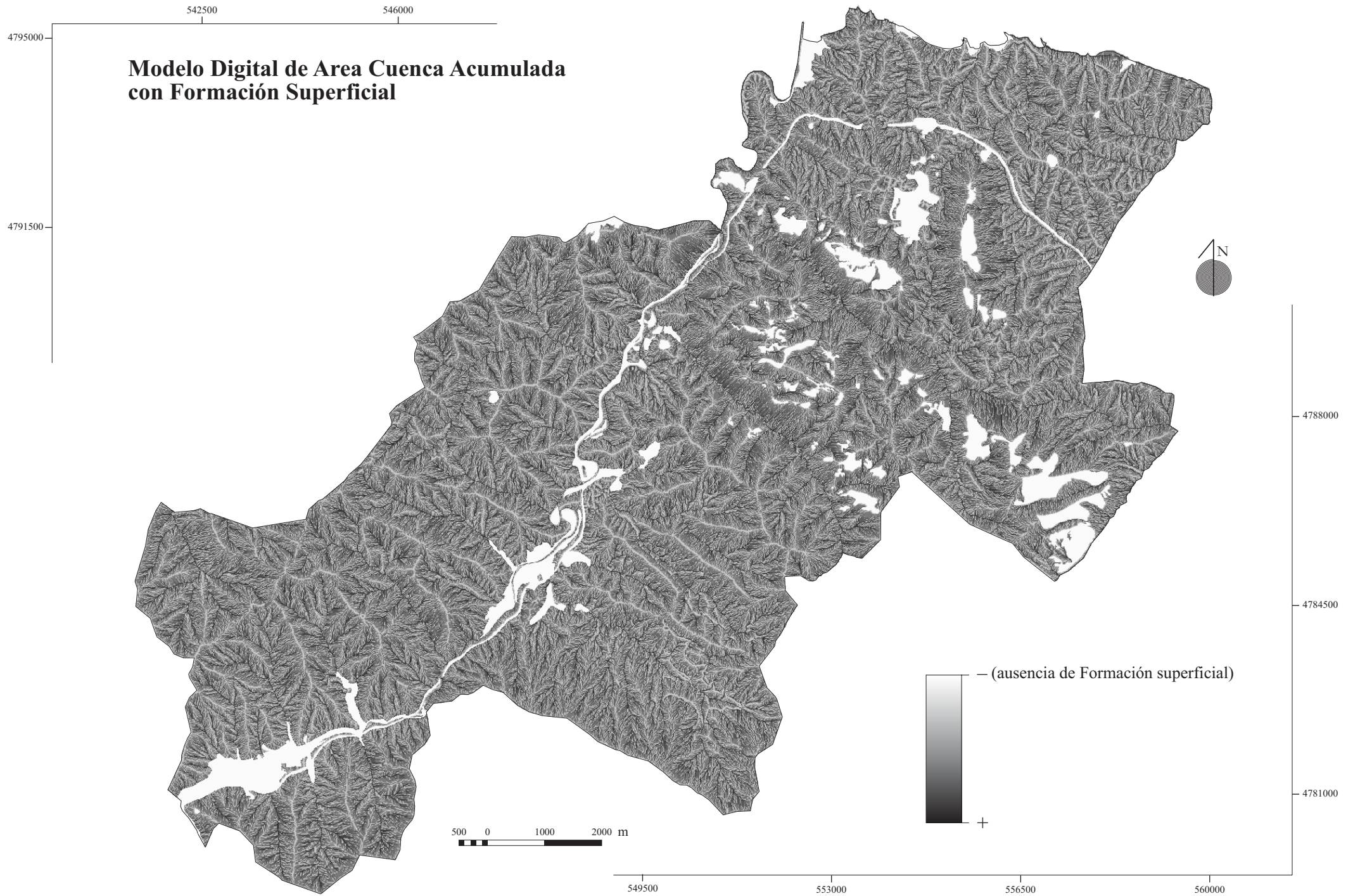
Refleja la capacidad de concentración de agua subterránea por parte de la formación superficial. La variable AFS expresa la extensión de la zona donde se infiltra el agua en la formación superficial, que es donde se producen los deslizamientos superficiales. Es de esperar que, a mayor área de infiltración, mayores sean las presiones de agua en los poros y la posibilidad de producirse roturas.

### **Procedimiento de obtención**

La variable se obtiene a partir de una información vectorial (mapa de formaciones superficiales), que se rasteriza y se utiliza como máscara para luego derivar del MDE el área de la cuenca drenante que tiene formación superficial. Por lo tanto, todo lo descrito para la variable ACUENCA se debe tener aquí presente. Para obtener esta variable se



# Modelo Digital de Area Cuenca Acumulada con Formación Superficial





utiliza el archivo AML *femask.aml* que crea la malla regular “máscara” de formación superficial, que luego se utilizará en el archivo *fegrid1.aml*, que es el que generará la variable AFS. Se obtiene con la función *flowaccumulation* de Arc/Info (GRID) multiplicada por la superficie de la celda, aplicada a un modelo de dirección de flujo modificado por la presencia o ausencia de la formación superficial

### **Codificación**

Valores numéricos, expresados en unidad de superficie, que se han reclasificado en 5 clases.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática con fiabilidad y precisión dependientes del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Ver: Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y mapa de Formaciones Superficiales (FS). A pesar de la alta precisión del modelo, es posible que algunos valores de AFS presenten ligeros errores.

## ***LONGITUD MÁXIMA DE LA CUENCA DRENANTE CON FORMACIÓN SUPERFICIAL (LFS)***

Modelo digital de longitud real de la cuenca drenante con formación superficial.

Formato matricial.

### **Definición**

La variable LFS indica la longitud real de la cuenca acumulada que contiene formación superficial aguas arriba de una celda. Se trata de la longitud medida sobre la superficie del terreno y no de su proyección horizontal. Por este motivo, la longitud de cada celda se pondera con la pendiente de la misma. Expresa la máxima longitud de la formación superficial existente aguas arriba de una celda y perteneciente a la cuenca de drenaje de la misma. Por este motivo utiliza sólo aquellas celdas donde existe formación superficial. Es una variable mixta o secundaria, dado que precisa de información obtenida inicialmente en formato vectorial (la variable FMS), para luego calcular la distancia del recorrido máximo del flujo, derivado a partir del MDE. La variable cuantitativa tiene un rango de valores que oscila entre el 0 y la dimensión máxima del área de estudio. La longitud se expresa en metros.

### **Función**

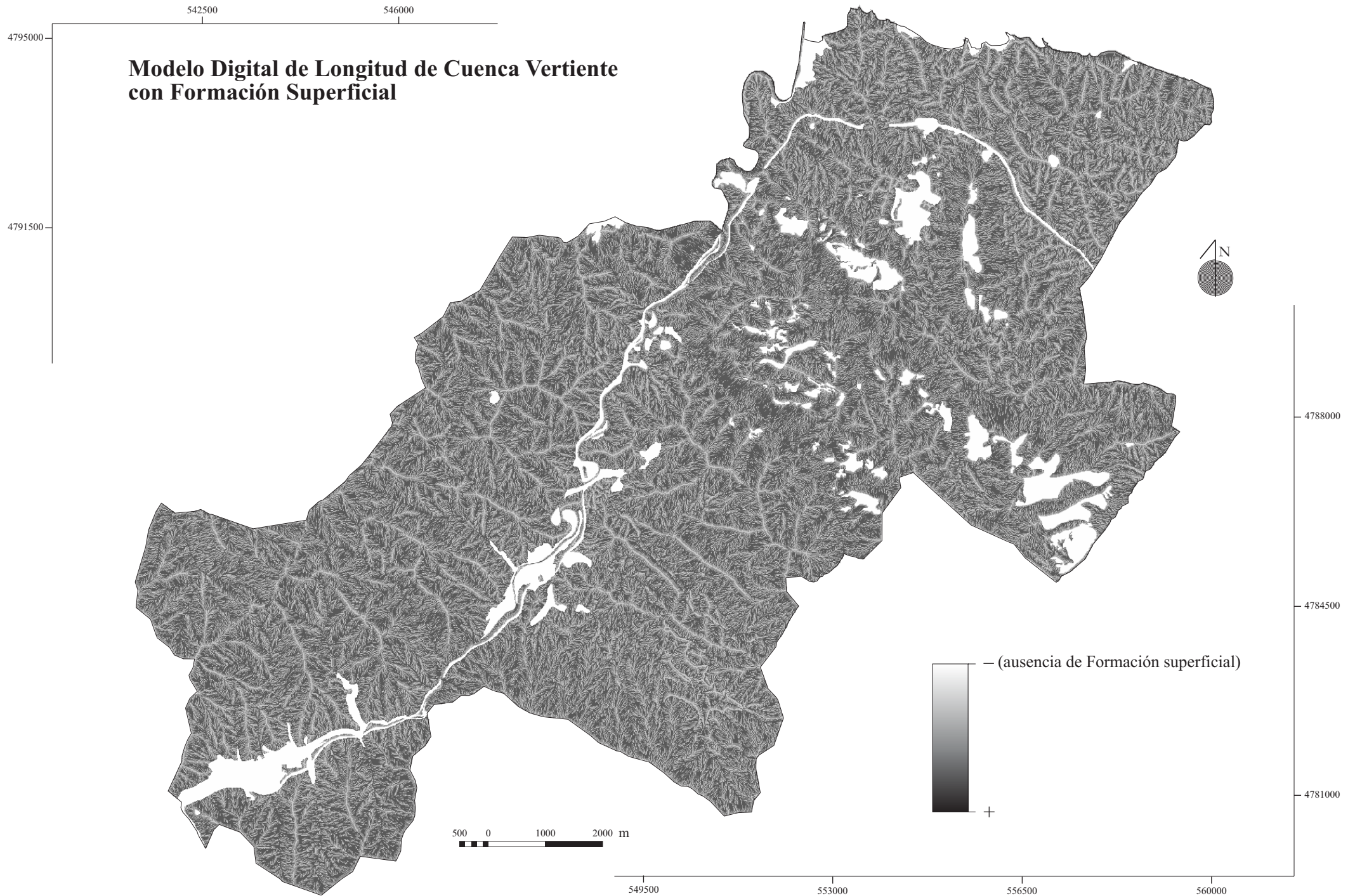
Se le atribuye una función similar a la variable AFS. Refleja el potencial de acumulación de agua subterránea en la formación superficial de cada celda. Es de esperar que, a mayor área, mayores sean las presiones de agua en los poros y la posibilidad de producirse roturas.

### **Procedimiento de obtención**

La variable se obtiene a partir de una información vectorial (variable FMS), que se rasteriza y se utiliza como “máscara”, para luego estimar, a partir del MDE, la longitud del recorrido seguido por las líneas de flujo en la zona que contiene formación superficial. Por



# Modelo Digital de Longitud de Cuenca Vertiente con Formación Superficial





tanto, todo lo descrito para la variable LONG se debe tener presente aquí. Para obtener esta variable se utiliza el archivo AML *femask.aml* que genera la malla regular máscara, conteniendo formación superficial, que luego se utilizará en el archivo *fegrid1.aml*, que es el que generará la variable LFS. Este programa utiliza la función *flowlength* de Arc/Info (GRID), utilizando la opción *upstream*, aplicada a un modelo de dirección de flujo modificado por la presencia o ausencia de la formación superficial.

### **Codificación**

Valores numéricos, expresados en unidad de longitud, que se han reclasificado en 5 clases

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática de fiabilidad y precisión dependientes del MDE y del mapa de formaciones superficiales de los que se deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Ver Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y mapa de Formaciones Superficiales (FS). A pesar de la precisión del modelo, es posible que en algunos casos, por pequeñas irregularidades que no pueden quedar reflejadas, se produzcan “rupturas” de continuidad en la longitud, por lo que algunos valores de LFS pueden ser inexactos.

## ***PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DRENANTE (PENDM)***

Modelo digital de pendiente media de la cuenca drenante.

Formato matricial.

### **Definición**

PENDM es la Pendiente Media de la Cuenca, definida como el valor medio de la pendiente, siguiendo el recorrido de las líneas de flujo acumulado. La pendiente se calcula según la línea de longitud máxima de la cuenca para cada celda. La variable deriva del MDE, tomando un rango de valores que oscila entre 0 y 90 grados. Es una variable cuantitativa y continua.

### **Función**

La pendiente media de la cuenca expresa la capacidad que tiene la misma para favorecer la infiltración del agua en el subsuelo y por tanto, la inestabilidad. Pendientes medias o bajas deberían favorecer la infiltración y la aparición de roturas (Baeza, 1994). Esta variable está, lógicamente, relacionada con la pendiente.

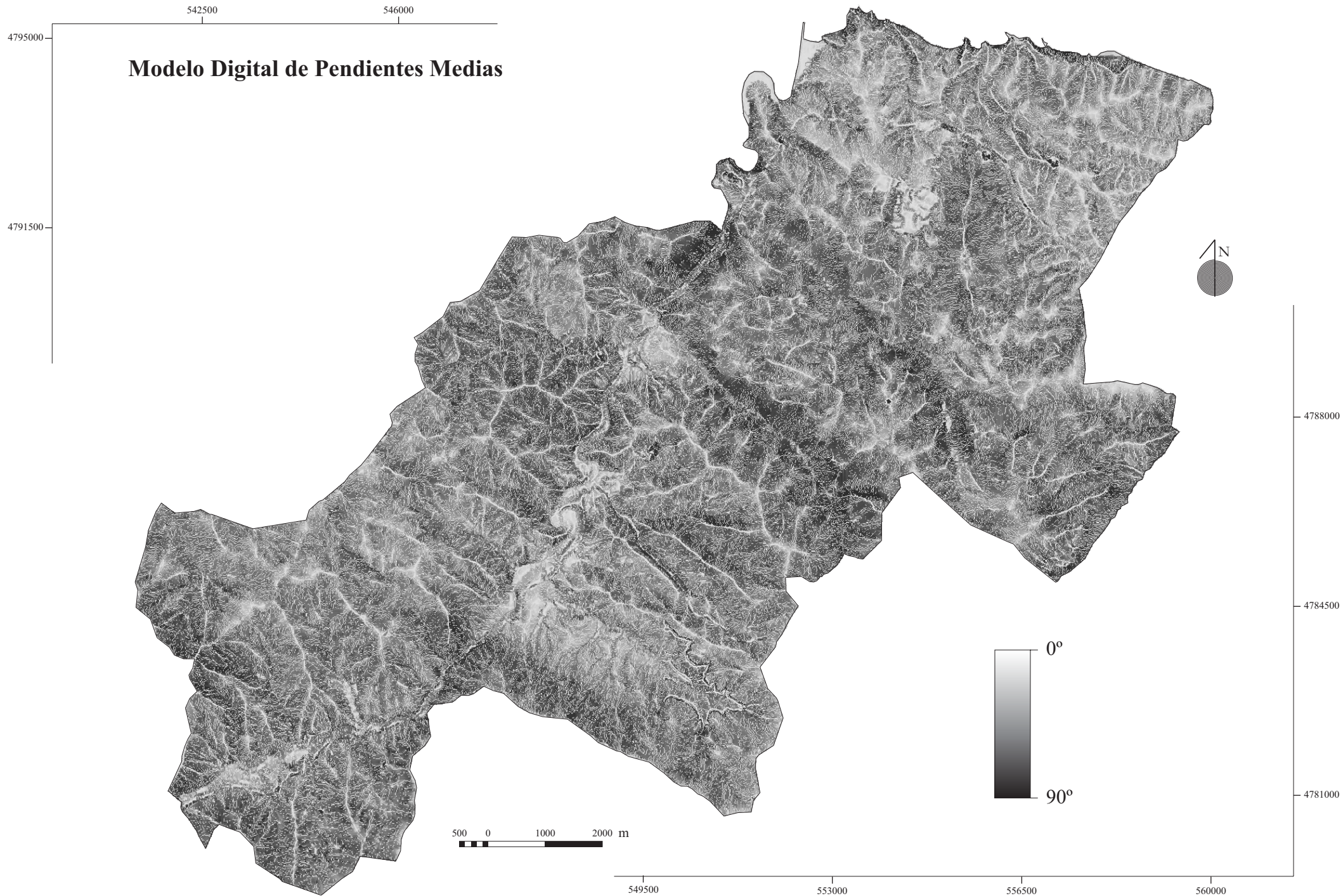
### **Procedimiento de obtención**

La variable se deriva del MDE, generada por Arc/Info dentro del subprograma GRID. Para su creación es necesaria la participación directa de tres funciones del subprograma y de la variable ya generada LONG mediante un algoritmo. Para obtener la variable se utiliza el archivo AML *fegrid1.aml*, archivo que corre después de hacerlo el archivo *femask.aml*.

Las funciones utilizadas son la *flowdirection*, *flowlength* y *acos* que calculan la dirección del flujo, la longitud del recorrido del flujo hasta cada celda y la inversa del coseno, respectivamente. El recorrido del flujo (proyección horizontal) hasta cada celda, se divide por el recorrido del flujo hasta la misma celda, según la pendiente (LONG). El arco seno



# Modelo Digital de Pendientes Medias





del resultado es la pendiente media (consultar manual de referencia de comandos GRID de Arc/Info; ESRI, 1994).

### **Codificación**

Valores en grados de 0° a 90°, reclasificados en 10 clases.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática cuya fiabilidad y precisión dependen del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores, la variable también los tendrá. Consúltese el apartado de observaciones adicionales del MDE. Como es una pendiente media el error de esta variable es mínimo.

## FORMACIONES SUPERFICIALES

### *ESPESOR DE LAS FORMACIONES SUPERFICIALES - I (ESPE I)*

Es una cobertura continua de variable discreta.

Formato vectorial. Topología: polígonos y arcos.

#### **Definición**

Se representan unidades que expresan el espesor más frecuente de la formación superficial existente en el área de cada unidad. Formación superficial se define como todos los sedimentos y rocas exógenas, poco o nada consolidadas, situados en la interfase litosfera-atmósfera, con o sin relación genética con el substrato y estrechamente asociadas a la evolución del relieve actual, del que son su expresión litológica y correlativa. Incluye tanto los depósitos superficiales como los regolitos de alteración.

Este mapa tiene un significado “probabilístico” que se puede escribir como: “hay una probabilidad superior al 90% de que cualquier punto de un polígono presente un espesor de formación superficial entre los límites indicados”.

El espesor no se considera como un mero atributo de la formación superficial, puesto que a una misma formación pueden corresponderle distintos espesores y varias formaciones pueden presentar un mismo espesor. Por lo tanto, cada unidad o polígono, viene caracterizada por su espesor, y otras características como el tipo genético o litológico, son atributos asociados.

## **Función**

El espesor de la formación superficial influye en la cantidad de agua que puede contener y en la magnitud de las presiones que pueden generarse. Asimismo, un gran espesor puede reducir el efecto estabilizador de las raíces. A igualdad de otras variables, un mayor espesor de la formación superficial favorece la inestabilidad, determinando la capacidad de almacenamiento de agua en el terreno ( $>$  transmisividad), alcanzándose mayores presiones de poros y aumentando el peso de la masa. Por el contrario, para que el terreno se sature, la cantidad de agua debe ser superior. El espesor de la formación superficial será además determinante para el desarrollo de la cobertura vegetal, condicionando el crecimiento en profundidad de las raíces de los árboles. Haigh et al (1988), en un estudio sobre deslizamientos y desprendimientos en el Himalaya, determinaron que las variables más significativas para deslizamientos son la cobertura arbórea (en %), el espesor de la formación superficial y la pendiente. Siddle et al. (1985) proclaman la importancia del espesor del suelo, considerándolo como factor limitante de la inestabilidad.

## **Procedimiento de obtención**

El mapa de formaciones superficiales se ha elaborado inicialmente a partir de fotointerpretación (basada en el mapa del mismo tipo elaborado, con menor detalle, para el Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa) y posteriormente con observaciones sistemáticas sobre el terreno, con medidas de espesor, pozos, afloramientos, etc.

## **Codificación**

Se han diferenciado las siguientes categorías:

Polígonos

1 - Roquedo

2 - 0 - 0,5 m de espesor

3 - 0,5 – 1 m de espesor

4 – 1 – 2 m de espesor

5 – 2 – 4 m de espesor

6 - > 4 m de espesor

Una particularidad de esta zona de estudio es la existencia de lapiaces semicubiertos en los que localmente aparecen espesores de regolito de alteración de hasta 3 m, pero de poca extensión lateral, puesto que hay muchos afloramientos de roca. En tales casos, y sabiendo que su límite es muy difuso, se clasifican con código 2.

#### Arcos

1 – Límite entre depósito superficial y regolito de alteración

2 – Límite entre dos tipos de depósitos superficiales

3 – Límite entre dos tipos de regolitos de alteración

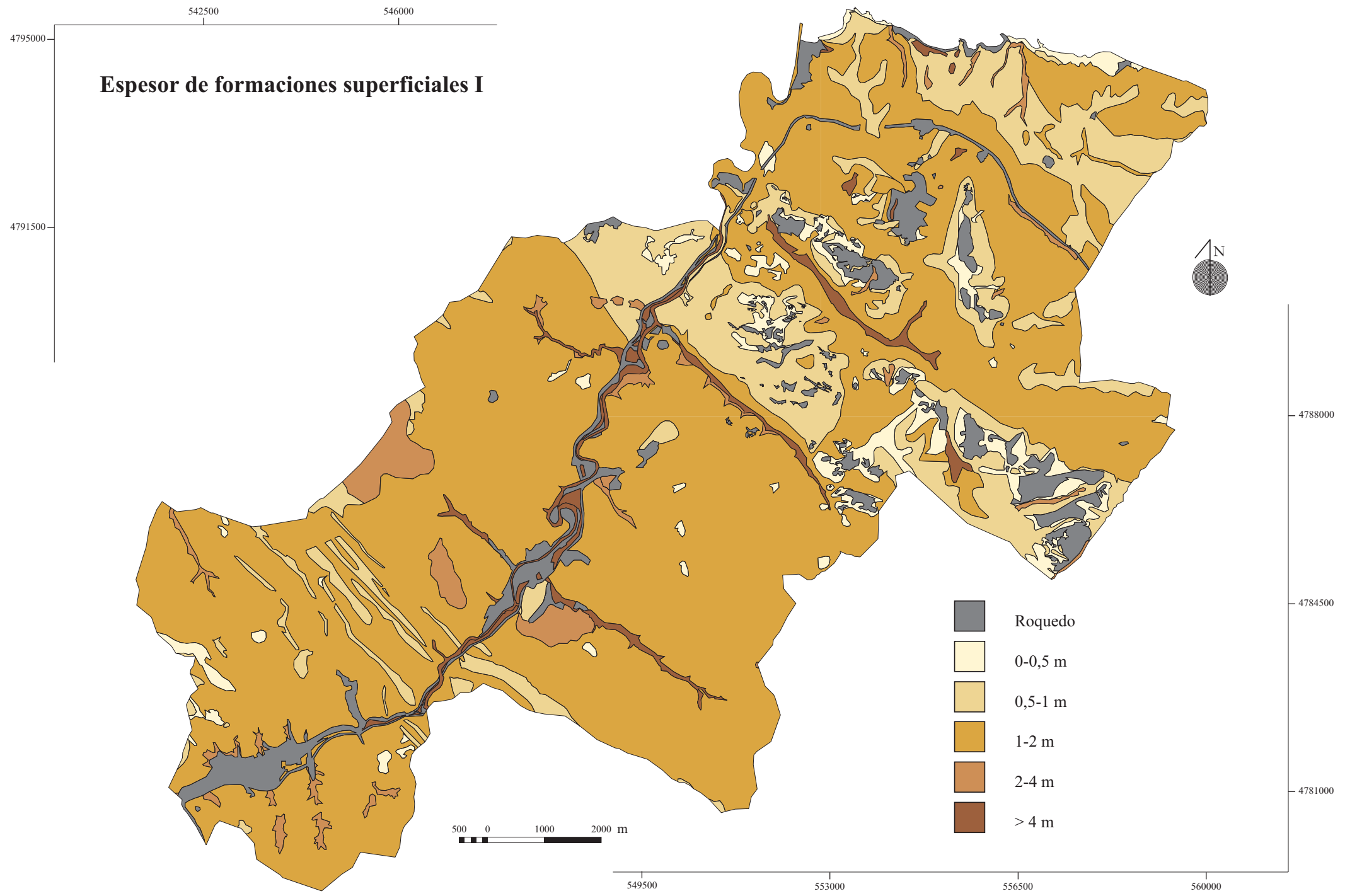
Valores asignados para el análisis multivariante:

1	Roquedo	0
2	0-0,5 m espesor	0,1
3	0,5-1 m espesor	1,1
4	1-2 m espesor	5
5	2-m espesor	5
6	>4 m espesor	5

#### **Observaciones adicionales**

Ver procedimiento de obtención.

# Espesor de formaciones superficiales I



500 0 1000 2000 m

549500 553000 556500 560000

4788000  
4784500  
4781000





## ***ESPEJOR DE LAS FORMACIONES SUPERFICIALES - II (ESPE II)***

Es una cobertura continua de variable discreta.

Topología: polígonos y arcos.

### **Definición**

Esta variable es análoga a la anterior pero utiliza una fuente de datos de menor precisión.

### **Función**

Similar a ESPE I.

### **Procedimiento de obtención**

La información deriva del mapa de formaciones superficiales incluido en el Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa, elaborado a escala 1:25.000. Este mapa, originalmente en papel, fue digitalizado manualmente y corregido por el Servicio de Información Territorial del Departamento de Obras Hidráulicas y Urbanismo de la Diputación Foral de Guipúzcoa. Este último mapa ha sido revisado y mejorado mediante criterios de campo y fotointerpretación. Las modificaciones han consistido, además de la inclusión de alguna formación nueva o la modificación de algún espesor, en la adaptación de los segmentos de acuerdo con la base topográfica empleada en este proyecto y la ortofoto del 93.

En conjunto tiene una precisión bastante menor que el anterior.

### **Codificación**

Se han diferenciado las siguientes categorías:

Polígonos

1 - Roquedo

2 - 0 - 0,5 m de espesor

3 - 0,5 – 1 m de espesor

anexo I

4 – 1 – 2 m de espesor

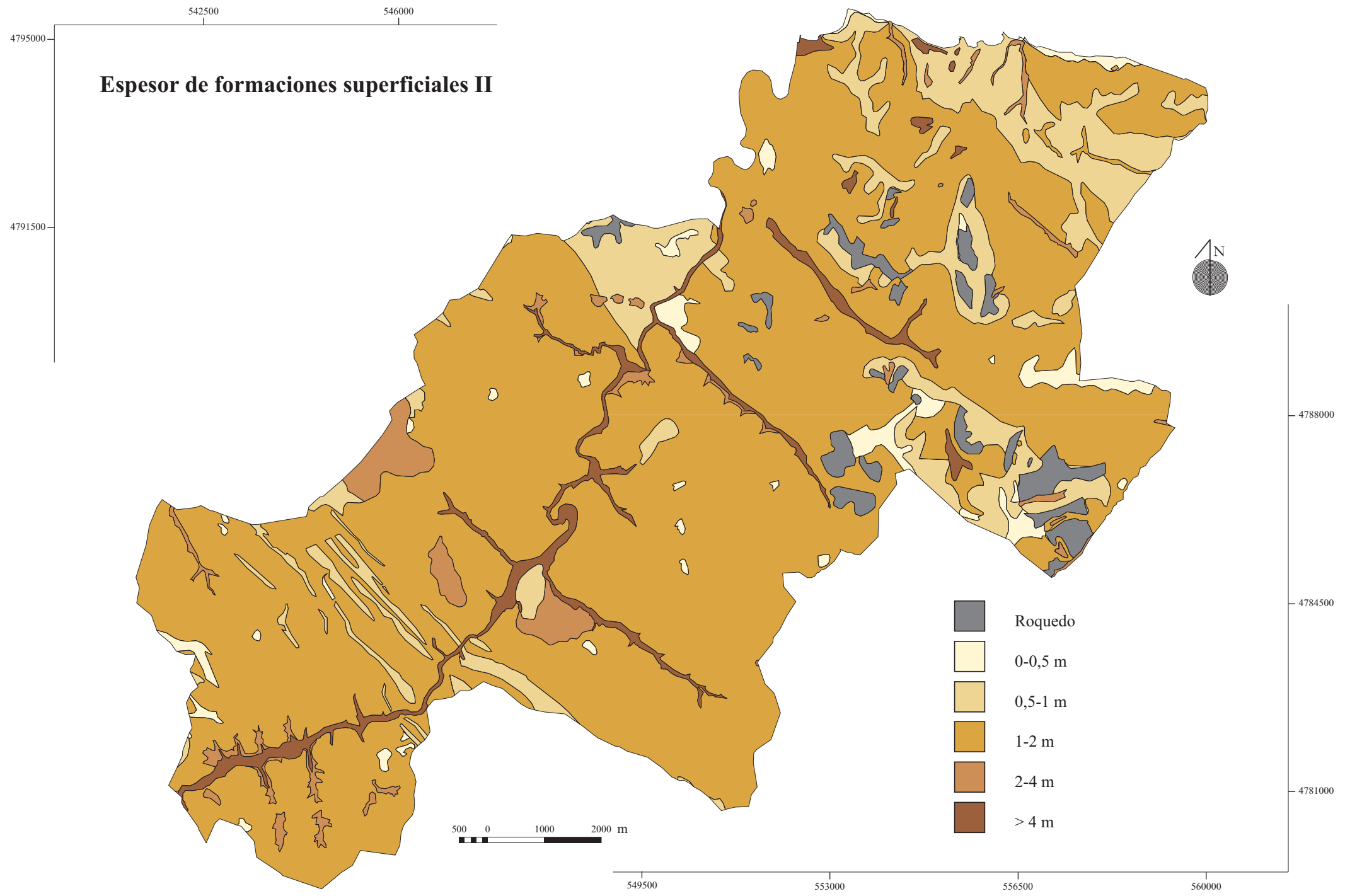
5 – 2 – 4 m de espesor

6 - > 4 m de espesor

### **Observaciones adicionales**

Ver procedimiento de obtención.

# Espesor de formaciones superficiales II



- Roquedo
- 0-0,5 m
- 0,5-1 m
- 1-2 m
- 2-4 m
- > 4 m

500 0 1000 2000 m

549500 553000 556500 560000

4795000  
4791500

4788000  
4784500  
4781000



## ***PRESENCIA DE FORMACIONES SUPERFICIALES (FS)***

Es una cobertura continua de variable discreta.

Topología: arcos y polígonos.

### **Definición**

La variable Formación Superficial define la presencia o ausencia de la formación superficial (depósito y/o regolito de alteración) en la celda. Es una variable cualitativa obtenida de forma manual constituyendo una cobertura vectorial de polígonos en Arc/Info. Es una variable binaria con sólo dos valores: 1 para las celdas sin formación superficial y 2 para las celdas donde existe formación superficial.

### **Función**

Este parámetro se relaciona con la presencia de deslizamientos superficiales, dado que afectan a la formaciones superficiales. Además de los depósitos superficiales, los niveles de alteración superficial de las rocas pueden verse afectados por roturas. La variable se utiliza, junto con el MDE, para obtener las variables derivadas LFS y AFS.

### **Procedimiento de obtención**

Este mapa deriva directamente del mapa Formaciones superficiales – Espesor I.

### **Codificación**

Se han codificado con 1 las zonas con formación superficial y con 2 aquellas en las que aflora directamente la roca del substrato, los núcleos urbanos densos, los polígonos industriales y las vías de comunicación asfaltadas.

### **Observaciones adicionales**

Ver Formaciones superficiales – Espesor I.

anexo I

## **COBERTERA VEGETAL – USOS DEL SUELO**

### ***VEGETACIÓN I (VEGE I)***

Es una cobertura continua de variable discreta.

Topología: polígonos.

#### **Definición**

Variable que expresa el tipo y densidad de las formaciones vegetales de acuerdo a su posible influencia en la estabilidad/inestabilidad de las laderas.

Los criterios de clasificación de las distintas unidades son los siguientes:

- Densidad y extensión de las raíces

- Densidad de cobertura arbórea

- Porte aéreo y perennidad

- En el caso de los bosques, tipo de sotobosque

La variable VEGET hace referencia a la cobertera vegetal que cubre el suelo de la zona de estudio, pero también incluye el uso del suelo. Es una variable cualitativa, obtenida de forma manual, representada mediante una cobertura vectorial de polígonos.

#### **Función**

Los mecanismos mediante los cuales la vegetación actúa sobre la estabilidad de las laderas pueden clasificarse en hidrológicos (influyendo en el nivel freático, la capacidad de infiltración de la superficie del suelo, la humedad del propio suelo, etc.) y mecánicos (influyendo en la tensión normal de la superficie de ruptura, variando las propiedades de cohesión de las partículas del suelo, influyendo en la erosión, etc.), (Greenway, 1987; Mulder, 1991).

La influencia de la vegetación en la estabilidad de las laderas puede ser beneficiosa o adversa. Los mecanismos hidrológicos actúan disminuyendo la presión de poros y el aparato radicular incrementa la resistencia al corte, favoreciendo ambos mecanismos la estabilidad. La vegetación está muy relacionada con algunas de las variables que aquí se mencionan y muy especialmente con la altitud y la litología (Francés, 1987). De todas formas, la vegetación actual es un reflejo de la evolución de los usos del suelo. Asimismo, el tipo y densidad de la cobertura vegetal dificulta, en diferente grado, el avance de la masa movilizada durante su recorrido ladera abajo. Por otro lado, Rice y Lewis (1991) han descrito los efectos erosivos provocados por la continua deforestación que sufren algunas áreas y su relación con la inestabilidad de las laderas. Sea como fuere, parece que hay un acuerdo general en que la cubierta vegetal mejora la protección del terreno contra los deslizamientos superficiales y la erosión (Cotecchia, 1978; Varnes 1984; Greenway, 1987; Hutchinson, 1995).

### **Procedimiento de obtención**

Este mapa está basado en el “inventario forestal de 1998 a escala 1:25.000” de la Diputación Foral de Guipúzcoa. Este inventario incluye, además de la información forestal, una cartografía muy precisa de todas las formaciones vegetales. Su digitalización se ha llevado a cabo usando la ortofoto digital del 93.

### **Codificación**

- 1 – Bosque muy denso de frondosas
- 2 – Bosque denso de frondosas
- 3 – Bosque semiabierto de frondosas
- 4 – Bosque muy denso de coníferas (replantación forestal)
- 5 – Matorral
- 6 – Prados, pastos y cultivos
- 7 – Zonas sin vegetación (áreas urbanas, infraestructuras, vegetación rala y dispersa de acantilados, roquedos, etc.).



El código 1 corresponde a zonas de encinar cantábrico. El robledal-quejigal calcícola, marojal, robledal acidófilo y robledal bosque mixto atlántico, hayedo calcícola o éutrofo y el hayedo acidófilo se ha clasificado como bosque denso de frondosas (código 2). El código 3 representa el bosque mixto de crestón y pie de cantil calizo, los bortales, abedulares, las alisedas cantábricas, fases juveniles o muy degradadas de robledal acidófilo y robledal bosque mixto atlántico, y los alcornoques. Las plantaciones forestales, fundamentalmente de pinos aunque también alerces, constituyen el código 4. Los espinares, prebrezales atlánticos y brezales-argomales-helechales se identifican con el código 5. En el código 6 se incluyen los prados y cultivos atlánticos, las praderas montanas, el pasto pretano calcícola, los lastonares y los prados juncuales. Las zonas sin vegetación, las gleras, los complejos vegetales de roquedos calizos, la vegetación de acantilados litorales, la de arenales costeros y la vegetación de marismas representan el código 7.

Cada unidad viene expresada por un polígono. Todos los arcos que definen los diferentes polígonos tienen el mismo código (límites de vegetación).

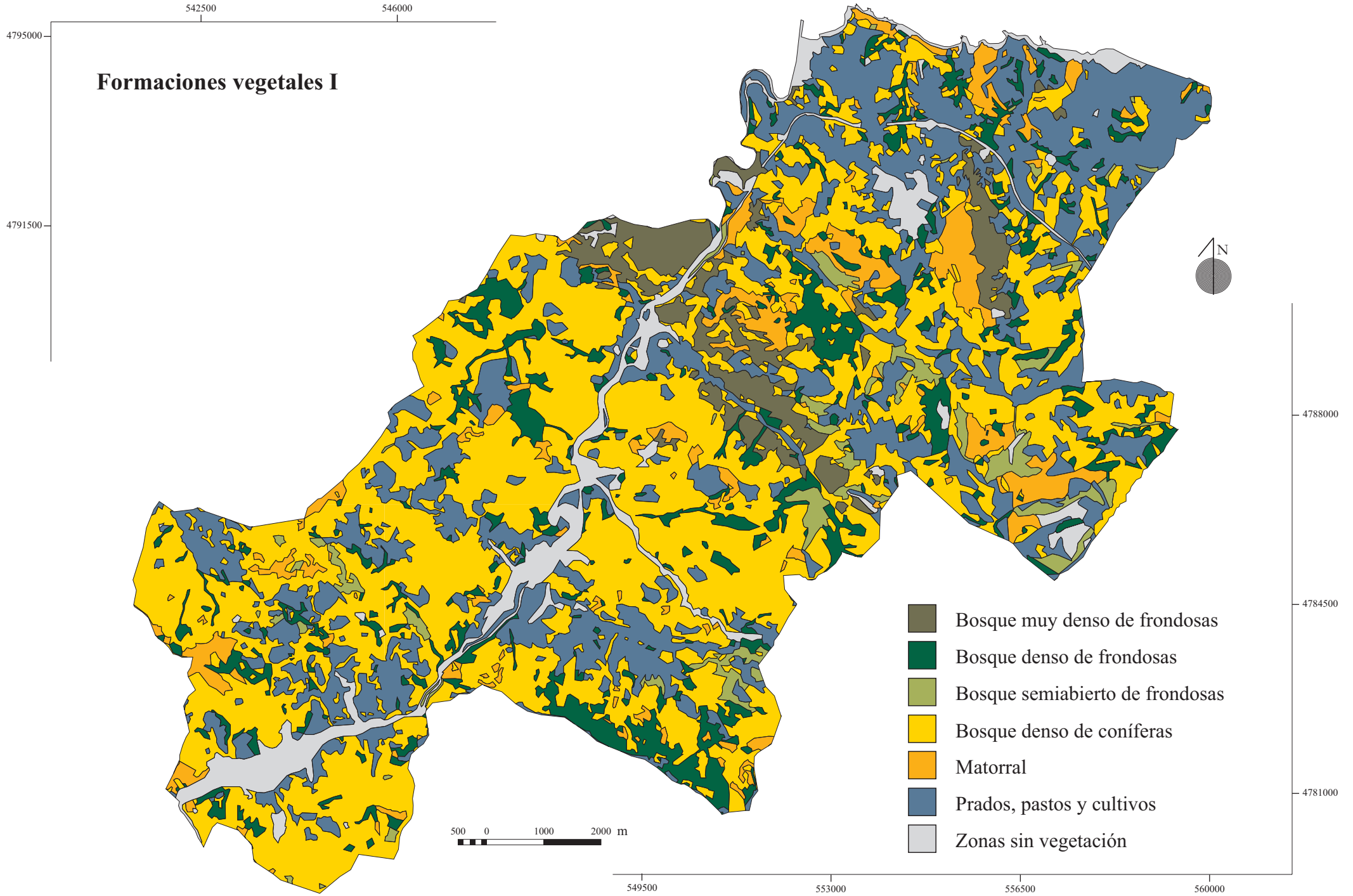
Valores asignados para el análisis multivariable:

1	Bosque muy denso de frondosas	1
2	Bosque denso de frondosas	3
3	Bosque semiabierto de frondosas	7
4	Bosque muy denso de coníferas (repobl. forestal)	5
5	Matorral	8
6	Prados, pastos y cultivos	25
7	Zonas sin vegetación	40

## **Observaciones adicionales**

El Inventario Forestal original, además de incluir un amplia base de datos asociada, es un mapa reciente (usos de suelo actualizados) y su digitalización se ha llevó a cabo usando la ortofoto digital del 93.

# Formaciones vegetales I





## ***VEGETACIÓN II (VEGE II)***

Es una cobertura continua de variable discreta.

Topología: polígonos.

### **Definición**

Significado similar al anterior, pero a partir de una fuente menos precisa.

### **Función**

Similar a la anterior.

### **Procedimiento de obtención**

Este mapa esta basado en el “Mapa de Vegetación de la Comunidad Autónoma del País Vasco, a escala 1:25.000”. El mapa, originalmente en formato papel, fue digitalizado manualmente por el Gobierno Vasco. Las 20 clases de vegetación originales se reclasificaron en las categorías descritas con la ayuda de expertos botánicos. En conjunto, es un mapa bastante menos preciso que VEGE I.

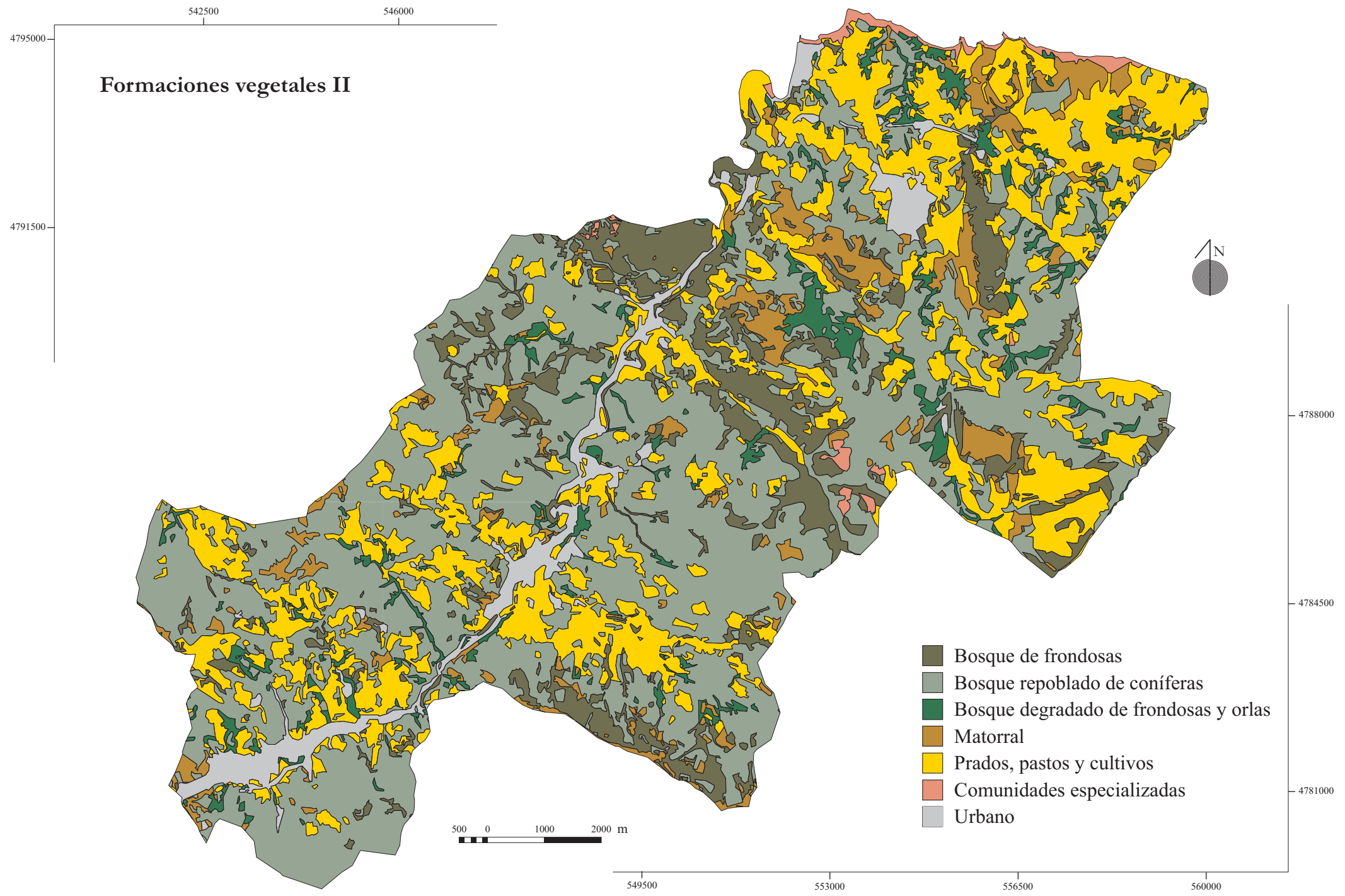
### **Codificación**

- 1 - Bosques
- 2 - Repoblación de coníferas
- 3 - Bosque degradado y orlas
- 4 - Matorral
- 5 - Prados, pastos y cultivos
- 6 - Comunidades especializadas
- 7 - Áreas urbanas

### **Observaciones adicionales**

La calidad del mapa original no es muy buena en cuanto a la definición de los contornos de las unidades. Además, su base topográfica es distinta y de menos precisión que la que se utiliza en este estudio. La digitalización fue manual y la vegetación es muy cambiante por las actividades de explotación forestal. Por todo ello, ha sido necesario revisarla y adaptarla. Este proceso se ha realizado utilizando la ortofoto de 1993, con la ayuda de la fotointerpretación de estereopares del año 1988 (en los que está basado) y del trabajo de campo.

# Formaciones vegetales II



- Bosque de frondosas
- Bosque repoblado de coníferas
- Bosque degradado de frondosas y orlas
- Matorral
- Prados, pastos y cultivos
- Comunidades especializadas
- Urbano





# LITOLOGÍA

## *MAPA LITOLÓGICO I (LITO I)*

Es una cobertura continua de variable discreta.

Topología: polígonos.

### **Definición**

Se cartografían unidades de igual constitución litológica (características físicas de las rocas o sedimentos).

### **Función**

Esta variable refleja la constitución, composición, textura y estructura geológica. Estos atributos condicionan la resistencia de cizalla, la permeabilidad, la susceptibilidad a la meteorización física y química, etc.

Se considera que los deslizamientos superficiales afectan bien a depósitos superficiales, bien al regolito de alteración del substrato rocoso, dependiente de la litología a partir de la que se ha formado.

### **Procedimiento de obtención**

El mapa deriva del mapa geológico del Ente Vasco de la Energía y del mapa de formaciones superficiales incluido en el Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa, ambos a escala 1:25.000. El mapa del EVE fue digitalizado manualmente por el Gobierno Vasco; el de formaciones superficiales fue también digitalizado manualmente y posteriormente revisado y corregido por la Diputación Foral de Guipúzcoa. Como, además, la base cartográfica era distinta en cada caso, ha sido necesario realizar las correcciones de adaptación a la base topográfica del estudio. Por último, con criterios de campo y de

fotointerpretación se ha mejorado la cartografía original, para obtener un nivel de detalle acorde con la escala de este análisis.

## **Codificación**

La clasificación de los depósitos superficiales y de las unidades del substrato refleja criterios distintos. Los primeros se han clasificado de acuerdo con criterios texturales siguiendo el Sistema de Casagrande (IGME, 1987b). Las unidades del substrato se han clasificado con criterios litológicos descriptivos en sentido amplio, para poder así reducir el número de unidades que realmente afloran.

Atributos de los polígonos:

Unidades del substrato

- 1 - Flysch detrítico calcáreo
- 2 - Flysch lutítico
- 3 - Calizas estratificadas
- 4 - Margocalizas
- 5 - Margas
- 6 - Areniscas y conglomerados
- 7 - Flysch arenoso
- 8 - Calizas masivas
- 9 - Lutitas calcáreas y margocalizas
- 10 - Calizas margosas
- 11 - Calcarenitas, margas y brechas calcáreas
- 12 - Flysch calcáreo
- 13 - Rocas volcanoclásticas
- 14 - Rocas volcánicas en coladas
- 15 - Brechas poligénicas
- 16 – Brechas silíceas

## Depósitos superficiales

- 17 - Gravas bien gradadas
- 18 - Gravas mal gradadas
- 19 - Gravas arcillosas
- 20 - Arenas bien gradadas
- 21 - Arenas mal gradadas
- 22 - Arenas limosas
- 23 - Arenas arcillosas
- 24 - Limos y arenas muy finas
- 25 - Arcillas plásticas
- 26 - Rellenos artificiales

Descripción de las unidades del substrato y correspondencia con las unidades definidas en el Mapa Geológico del País Vasco a escala 1:25.000, del Ente Vasco de la Energía (entre paréntesis, se incluyen el código del EVE/ la Hoja 1:25.000 correspondiente).

1 – Flysch detrítico calcáreo: alternancia rítmica (en bancos de 5-20 cm) de margas, margocalizas y calizas arenosas de tamaño de grano fino (4/63-II; 16/63-III). Abundan los *slumps* sinsedimentarios. Son de edad Maastrichtiense.

Dentro de esta clase, se incluye también el Flysch detrítico calcáreo del Terciario (24/63-III), en el que alternan calizas arenosas o lutíticas y margas. Su edad es Ypresiense inferior.

La unidad presenta permeabilidad baja.

2 - Flysch lutítico (26/63-I; 25/63-II; 6/63-III; 30/63-IV). Pertenecen al denominado “Flysch Negro” (Formación Deva). Es una alternancia flyschoide de lutitas y areniscas negras, dominando las lutitas. Los niveles de areniscas, de tamaño de grano de

muy fino a medio, presentan un espesor medio de 15 a 20 cm. Corresponden al Complejo Supraurgoniano y datan del Albiense superior-Cenomaniense inferior.

Esta unidad presenta permeabilidad muy baja.

3 - Calizas estratificadas. En esta clase se incluyen distintas unidades:

- Calizas estratificadas del Complejo Urganiano (20/63-II). Son calizas que presentan litofacies y biofacies muy similares a las calizas masivas, pero se presentan estratificadas en niveles de potencia inferior al metro.

- Calcarenitas y calciruditas bioclásticas estratificadas en niveles de 5 a 90 cm (15 cm de media), de la misma edad (21/63-II). Están organizadas en secuencias estratocrecientes y presentan estratificación ondulada no paralela, lo que les confiere un aspecto noduloso.

- Lentejones carbonatados dentro de la formación margosa del Cretácico Superior que presentan potencias de hasta 20 m (10/63-III).

- Calizas micríticas (biomicritas) no recristalizadas, de color rojo salmón a gris verdoso, pertenecientes al Daniense-Montiense (21/63-III). Se presentan bien estratificadas en niveles que oscilan entre 30 y 40 cm, formando paquetes no superiores a 40 m.

- Niveles de calizas (15/63-II) y niveles de brechas calcáreas (7/63-I; 16/63-II), de poca continuidad lateral y esporádicamente intercalados en la unidad del Urganiano detrítico-carbonatado.

Todas estas litologías tienen una permeabilidad de tipo medio.

4 – Margocalizas. Unidad constituida por margocalizas blancas y grises estratificadas en bancos de 60 cm de media (1/63-II). Desde un punto de vista petrográfico son biomicritas y micritas arcillosas. Datan del Santoniense inferior.

Son de baja permeabilidad.

5 – Margas. Son margas oscuras que incluyen algunos niveles aislados de arenisca y de caliza. En esta clase se incluyen varias unidades:

- Margas de Itziar (21/63-I; 24/63-II; 29/63-IV). Son margas y limolitas calcáreas negras. Constituyen una sucesión monótona con estratos de decimétricos a métricos. Hacia la base de la serie están bien estratificadas e incluyen algunos niveles lenticulares, de poca extensión lateral, de areniscas y olistolitos de caliza; hacia el techo, su carácter estratificado es difuso, siendo muy similares a los materiales de la parte basal del “Flysch Negro”. Generalmente se encuentran descalcificadas y alteradas, presentando tonalidad ocre, y en ocasiones presentan esquistosidad. Son depósitos de edad Albiense medio o superior.
- Formación margosa del Cretácico Superior (8/63-III). Está constituida por margas laminadas y estratificadas en paquetes que llegan a superar el metro, con algunas intercalaciones de niveles de caliza y arenisca. Su color es gris oscuro hacia la base y gris claro hacia el techo de la serie. Cuando estos materiales están asociados a lentejones del Complejo Volcánico de Placencia, presentan un color rosa salmón. Son de edad Cenomaniense medio-Campaniense-Maastrichtiense basal.
- Intercalaciones margosas (17/63-III) de potencias inferiores a 40 m, dentro del Flysch detrítico-calcáreo del Cretácico.
- Unidad lutítica carbonatada con pequeños niveles de arenisca intercalados, y cuya potencia es inferior a 20 m (23/63-III). Está asociada a la base del Flysch detrítico-carbonatado del Terciario.

Estas litologías son de baja permeabilidad.

6 – Areniscas y conglomerados. En esta clase se incluyen tres unidades:

- Areniscas de Istiña (10/63-I; 23/63-II). Son areniscas de grano medio grueso de tonos marrones, estratificadas en niveles de 5-35 cm. Se caracterizan por la presencia de abundante glauconita, niveles de óxidos de hierro y niveles de materia orgánica. Desde un punto de vista petrográfico son litarenitas o grauvacas líticas. Su edad es Albiense inferior.
- Conglomerados del Complejo Supraurgoniano (24/63-I). Están formados por cantos de tamaño muy variable (desde mm a 2 o 3 cm) de cuarcita, litarenita y caliza, dentro de una matriz litarenítica (paraconglomerados). Se presentan en bancos que varían desde decímetros a 3 o 4 m.

- Intercalaciones lenticulares de areniscas, dentro de las formaciones margosas del Cretácico Superior (9/63-III).

Estas litologías son de baja permeabilidad.

7 - Flysch arenoso (25/63-I; 26/63-II; 5/63-III; 31/63-IV). Pertenecen al denominado “Flysch Negro” (Formación Deba). Consiste en una alternancia flyschoide de areniscas y lutitas negras, dominando las areniscas. Los niveles de areniscas, de tamaño de grano de muy fino a medio, presentan un espesor medio de 15 a 20 cm. Corresponden al Complejo Supraurgoniano y datan del Albiense superior-Cenomaniense inferior.

Su permeabilidad es baja.

8 – Calizas masivas. Son calizas biomicríticas masivas en ocasiones recristalizadas, de color gris claro en superficie fresca (5/63-1; 18/63-II; 1, 3 y 4/63-III; 24/63-IV). Su origen es arrecifal, presentando abundantes rudistas y otros bivalvos, corales, algas, esponjas, equinodermos y orbitolinas. Corresponden al Complejo Urganiano.

La litología en conjunto es de alta permeabilidad.

9 - Lutitas calcáreas y margocalizas. Desde un punto de vista litológico, esta clase es muy similar a la 5 – Margas. Se ha clasificado aparte, por incluir una mayor variedad litológica, contener proporcionalmente más niveles de margocalizas, y por presentar muchos cambios laterales de facies. Corresponde con la unidad del mapa geológico del EVE denominada “Urganiano detrítico-carbonatado”, previo a las facies arrecifales (6/63-I; 14/63-II; 2/63-III; 27/63-IV). Es una serie detrítica-carbonatada constituida por lutitas calcáreas, calizas margosas, margas, margocalizas, lutitas y limolitas calcáreas, generalmente masivas, que suelen estar muy descalcificadas. Intercalan esporádicamente niveles de calizas (15/63-II), lentejones de lutitas carbonatadas de tipo *mud mounds* (17/63-II; 28/63-IV) y niveles de brechas calcáreas (7/63-I; 16/63-II). En algunas zonas presentan esquistosidad intensa.

En conjunto presenta baja permeabilidad.

10 - Calizas margosas (8/63-I; 19/63-II; 26/63-IV). Son calizas margosas de color gris oscuro o negras y de estructura masiva. Presentan fauna de rudistas. Corresponden al Complejo Urganiano.

En esta clase también se engloban las Margas y margocalizas de color de rojo salmón a gris verdoso, mal estratificadas (19/63-III), de edad Maastrichtiense superior-Daniense-Montiense.

Ambas unidades se caracterizan por presentar una permeabilidad media.

11 - Calcarenitas, margas y brechas calcáreas. Corresponden a la Formación Sasiola (9/63-I; 22/63-II). Esta formación está constituida por una alternancia de niveles de calizas, brechas calcáreas, calcarenitas y margas. Se organizan en secuencias turbidíticas, que suelen comenzar con brechas y terminar con laminaciones onduladas margosas. Son frecuentes los olistolitos decamétricos de calizas. La Formación Sasiola presenta una esquistosidad que en ocasiones llega a ser muy intensa. Su edad es Aptiense superior.

Su permeabilidad es de tipo medio.

12 – Flysch calcáreo. Está constituido por margas, margocalizas y bancos de calizas micríticas, en alternancia rítmica centi-decimétrica (3/63-II). Abundan los *slumps* sinsedimentarios en la parte baja de la serie. Se le ha asignado una edad Santoniense superior.

Su permeabilidad es baja.

13 – Rocas volcanoclásticas (13/63-III). Su origen es epiclástico y piroclástico. Esta unidad incluye tufitas (cineritas), brechas y aglomerados (*lapillistone*). Su composición corresponde con traquitas, basaltos porfídicos y basaltos microlíticos. Son del Cretácico Superior (Complejo Volcánico de Placencia).

Son rocas de permeabilidad media.

14 – Rocas volcánicas en coladas. Se incluyen niveles con estructura en *pillow* (11/63-III), coladas masivas y brechas volcánicas (*pillow-brechas*) (14/63-III). Son basaltos más o menos espilitizados y traquitas (12/63-III), pertenecientes al Cretácico Superior (Complejo Volcánico de Placencia).

En esta clase también se incluyen *sills* tabulares (2/63-I; 7/63-III) y cuerpos tabulares discordantes (15/63-III), con potencias métricas a decamétricas, de estructura microgranuda y cuya composición más común es la diabasa.

Se caracterizan por presentar una permeabilidad media-baja, excepto los *sills* cuya permeabilidad es baja.

15 – Brechas poligénicas. Esta unidad está representada por un nivel de 12 m de potencia constituido por bloques de areniscas y cantos blandos (2/63-II) correspondientes a la unidad paleogeográfico-estructural de San Sebastián. Son de edad Cenomaniense-Santoniense.

Permeabilidad de tipo medio.

16 – Brechas silíceas. Se presentan en cuerpos brechificados de composición cuarzo-albítica que afectan a materiales calizos del Aptiense superior.

Permeabilidad de tipo medio.

#### Descripción de los depósitos superficiales:

Las formaciones superficiales presentes en la zona de estudio están constituidas por materiales sedimentarios no consolidados, por lo que se han considerado como suelos en sentido geotécnico. Para su clasificación se ha utilizado el *Airfield Classification System* de suelos, desarrollado por A. Casagrande (IGME, 1987b); entre paréntesis, se indica el código correspondiente a esta clasificación. Esta clasificación utiliza como criterios (estimados en el campo), el tamaño del grano y las propiedades plásticas del suelo. Su



mayor limitación estriba en que sólo especifica la textura del suelo y no la estructura del mismo.

17 - Gravas bien gradadas. Mezclas de gravas y arena bien gradadas, sin o con muy pocos finos (GW). Son materiales poco plásticos con drenaje excelente y alta capacidad de carga.

18 - Gravas mal gradadas. Mezclas de gravas y arenas gruesas mal gradadas, sin o con muy pocos finos (GP). Capacidad de carga de moderada a alta, poca elasticidad y drenaje excelente.

19 - Gravas arcillosas. Mezclas de grava arena y arcilla bien gradadas, excelentemente aglutinadas por matriz (GC). Son materiales con alta capacidad de carga, muy poca elasticidad y prácticamente impermeables.

20 - Arenas bien gradadas. Arenas y arenas y gravas bien gradadas, sin o con pocos finos (SW). Son materiales con capacidad de carga alta, prácticamente sin elasticidad y con excelente drenaje.

21 - Arenas mal gradadas. Arenas mal gradadas sin o con muy pocos finos (SP). Estos materiales se caracterizan por tener capacidad portante de moderada a alta, por ser poco elásticos y por tener excelente drenaje.

22 - Arenas limosas. Arenas con finos, arenas muy limosas, arenas arcillosas, mezclas de arenas y arcillas mal gradadas (SF). Presentan capacidad de carga de baja a moderada, poca o moderada elasticidad y son impermeables o poco permeables.

23 - Arenas arcillosas. Mezclas de arenas y arcillas bien gradadas, excelentemente aglutinadas por matriz (SC). Estos materiales tienen alta capacidad de carga, elasticidad muy ligera, y son prácticamente impermeables.

24 - Limos y arenas muy finas. Limos inorgánicos y arenas muy finas, arenas finas limosas o arcillosas, limos arcillosos poco plásticos (ML). Son materiales poco o moderadamente compresibles, de baja capacidad de carga, elasticidad de moderada a ligera y que drenan mal.

25 - Arcillas plásticas. Arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH). Estos materiales son muy compresibles, su capacidad de carga es muy baja, son de elasticidad alta y permeables.

26 - Rellenos artificiales. Son depósitos normalmente heterométricos de naturaleza generalmente poligénica, cuyas propiedades y comportamiento físico son muy variables.

Valores asignados para el análisis discriminante:

1	Flysch detrítico calcáreo	30
2	Flysch lutítico	30
3	Calizas estratificadas	15
4	Margocalizas	5
5	Margas	15
6	Areniscas y conglomerados	5
7	Flysch arenoso	10
8	Calizas masivas	1
9	Lutitas calcáreas y margocalizas	10
10	Calizas margosas	5
11	Calcarenitas, margas y brechas calcáreas	2

12	Flysch calcáreo	30
13	Rocas volcanoclásticas	1
14	Rocas volcánicas en coladas	2
15	Brechas poligénicas	1
16	Brechas silíceas	1
17	Gravas bien gradadas	20
18	Gravas mal gradadas	20
19	Gravas arcillosas	22
20	Arenas bien gradadas	18
21	Arenas mal gradadas	19
22	Arenas limosas	19
23	Arenas arcillosas	22
24	Limos y arenas muy finos	22
25	Arcillas plásticas	25
26	Rellenos artificiales	20

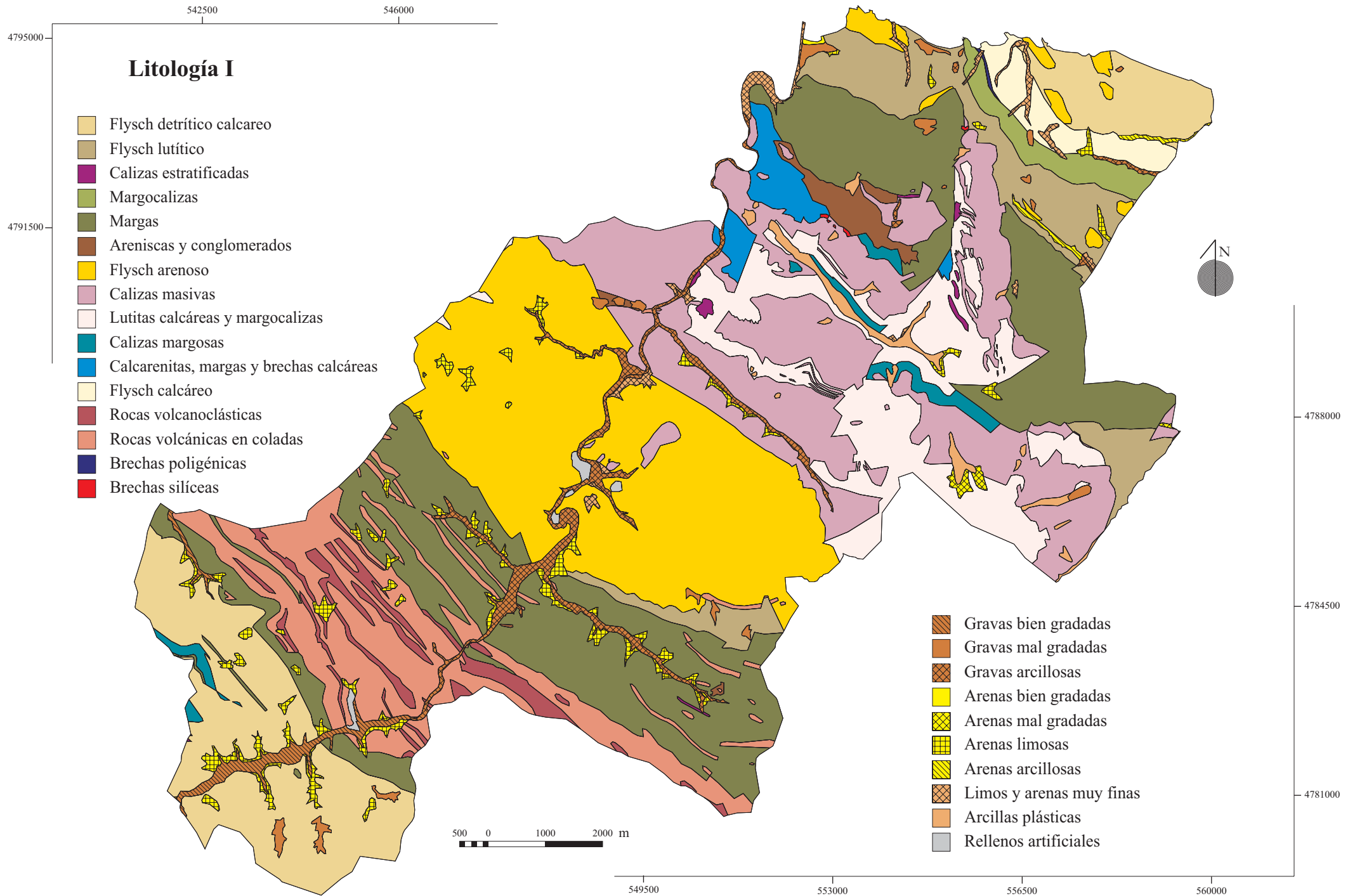
### **Observaciones adicionales**

Ver procedimiento de obtención.

Es importante señalar que las unidades cartografiadas presentan limitaciones que derivan de su propia naturaleza litológica y que son un reflejo de la complejidad del ambiente sedimentario de transición en el que se depositaron. Así, los límites entre algunas unidades no son netos, sino graduales, por lo que el límite representado es sólo orientativo. Algunas unidades se interdigitan unas con otras, dando lugar a contactos complejos difícilmente cartografiables por las malas condiciones de afloramiento (cobertura vegetal). Muchas unidades presentan alternancias más o menos rítmicas de diversas litologías, pero localmente pueden predominar unas u otras clases litológicas; estas variaciones, no cartografiables, son muy importantes en cuanto al comportamiento geotécnico. Por

anexo I

último, hay que decir que algunas unidades se caracterizan por presentar cambios bruscos de facies, tanto laterales como verticales.





## ***MAPA LITOLÓGICO II (LITO II)***

Es una cobertura continua de variable discreta.

Topología: polígono.

### **Definición**

Similar al anterior, pero basado en datos menos precisos.

### **Función**

Ver mapa litológico I.

### **Procedimiento de obtención**

El mapa deriva de los mapas de litología y de formaciones superficiales incluidos en el Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa, a escala 1:25.000. Fueron digitalizados manualmente y revisados y corregidos por la Diputación Foral de Guipúzcoa. Aún así, ha sido necesario realizar correcciones de adaptación a la base topográfica del estudio y de mejora, con criterios de campo y de fotointerpretación, hasta obtener un resultado más satisfactorio. En todo caso, es menos preciso que LITO I.

### **Codificación**

La clasificación de los depósitos superficiales y de las unidades del substrato refleja criterios distintos. Los primeros se han clasificado de acuerdo con criterios texturales siguiendo el Sistema de Casagrande. Las unidades del substrato se han clasificado con criterios litológicos descriptivos en sentido amplio, para poder así reducir el número de unidades que realmente afloran.

Atributos de los polígonos:

- 1 - Areniscas y conglomerados
- 2 - Lutitas y limolitas

- 3 - Areniscas con bancos de lutitas
- 4 - Limolitas con bancos de areniscas
- 5 - Lutitas con bancos de areniscas
- 6 - Margas
- 7 - Calizas impuras estratificadas
- 8 - Calizas masivas
- 9 - Rocas volcánicas piroclásticas
- 10 - Rocas volcánicas en coladas
- 11 - Gravas bien gradadas
- 12 - Gravas mal gradadas
- 14 - Gravas arcillosas
- 21 - Arenas bien gradadas
- 22 - Arenas mal gradadas
- 23 - Arenas limosas
- 24 - Arenas arcillosas
- 30 - Limos y arenas muy finas
- 40 - Arcillas plásticas
- 50 - Rellenos artificiales

### **Observaciones adicionales**

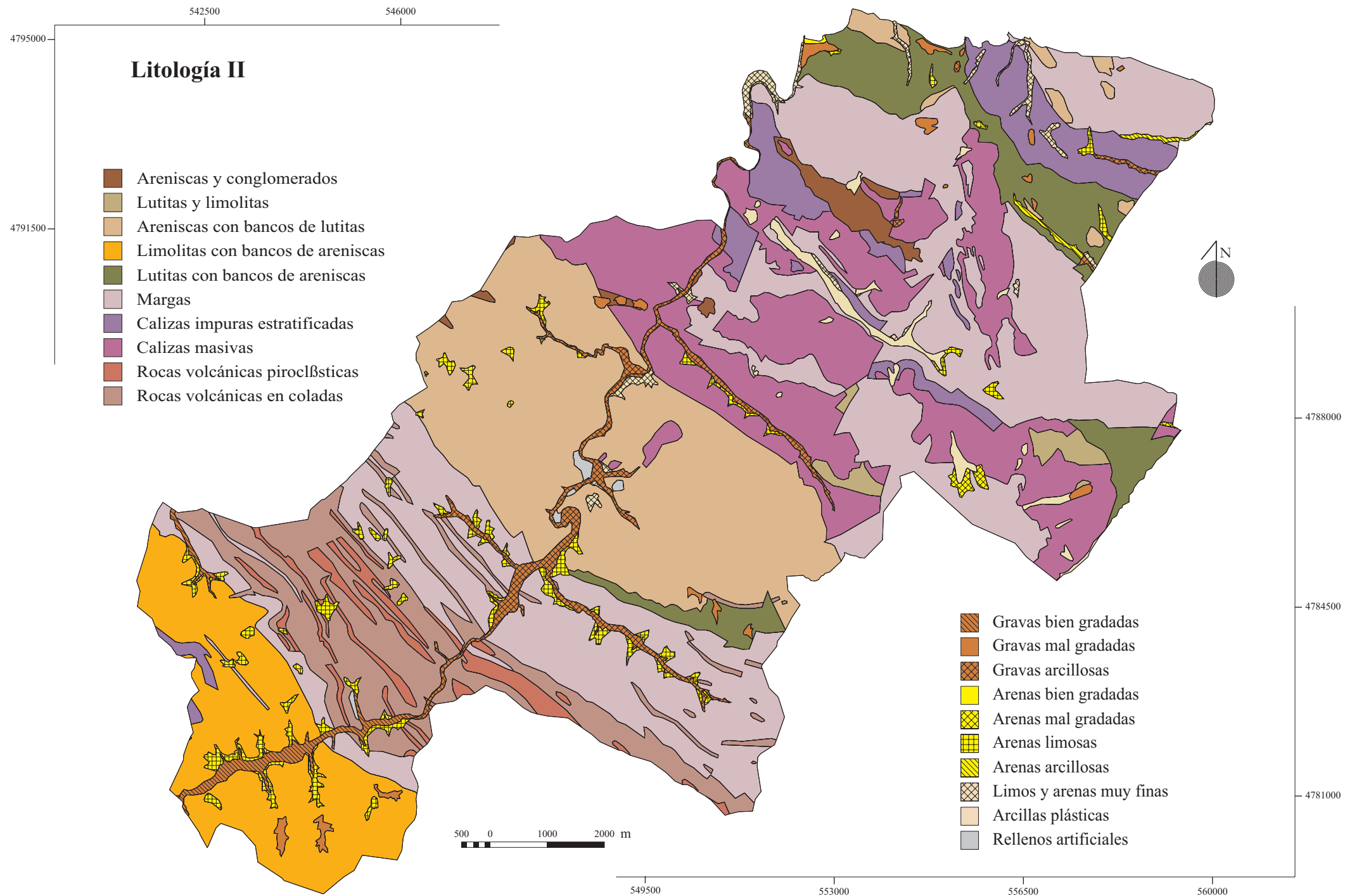
Es importante señalar las mismas limitaciones ya comentadas en el mapa litológico I.



# Litología II

- Areniscas y conglomerados
- Lutitas y limolitas
- Areniscas con bancos de lutitas
- Limolitas con bancos de areniscas
- Lutitas con bancos de areniscas
- Margas
- Calizas impuras estratificadas
- Calizas masivas
- Rocas volcánicas piroclásticas
- Rocas volcánicas en coladas

- Gravas bien gradadas
- Gravas mal gradadas
- Gravas arcillosas
- Arenas bien gradadas
- Arenas mal gradadas
- Arenas limosas
- Arenas arcillosas
- Limos y arenas muy finas
- Arcillas plásticas
- Rellenos artificiales





## **ANEXO II: METADATOS SOBRE LAS VARIABLES DE LA POBLA DE LILLET**

En este anexo se describe el banco de datos correspondiente a la zona de La Pobla de Lillet. La definición de las variables, su función, el procedimiento de obtención, la codificación y las observaciones adicionales son similares a las descritas en el Anexo I para el Bajo Deva, por ello, se omiten en muchos casos.

### **MOVPT**

#### **Procedimiento de obtención**

La variable se ha obtenido mediante interpretación de fotografía aérea, visitas de campo para comprobación (en el caso de existencia de dudas), trasvase a poliéster (con retícula de coordenadas y superpuesto sobre la ortofoto correspondiente), digitalización con *AutoCad*® y posterior topología en Arc/Info. Los deslizamientos inventariados pertenecen al episodio de lluvias intensas de Noviembre de 1982 en el Prepirineo y Pirineo catalán. Los datos recogidos son el polígono, delimitando el movimiento, un punto para la zona de rotura (situado en el centro de la misma) y un punto para la zona de depósito (situado casi en el punto de máximo alcance). Estas roturas se preservan con dificultad y en pocos años apenas se distinguen. Dado el tiempo transcurrido desde que se produjeron (16 años), la fuente de información principal para proceder a su localización ha sido la fotografía aérea y los ortofotomapas.

#### **Codificación**

Cuando se rasteriza esta variable de puntos, se define el fondo de la malla regular (celdas sin punto) con valor 0, representando todas las celdas sin roturas observadas, mientras que las de valor 1 son las celdas que incluyen roturas.

### **Observaciones adicionales**

El inventario de roturas se obtiene a partir de la interpretación de los fotogramas a escala 1:22.000 de junio de 1983 del Vuelo de Cataluña (pasadas 3, 4 y 5) y trabajo de campo (1 día) para resolver dudas de la fotointerpretación. Después, el inventario se pasaba sobre soportes de poliéster que contenían la retícula con las coordenadas x, y. La delimitación de las roturas en los poliéstere se realizó mediante la superposición de los mismos sobre las ortofotos a escala 1: 5.000. Los movimientos se delimitaron mediante una envolvente que contenía la cicatriz de rotura y el depósito, y marcando dos puntos: uno será el supuesto centroide de la cicatriz de rotura y el otro sobre el límite inferior de la zona de depósito. El punto del correspondiente, centroide, se ha utilizado como situación del movimiento en el análisis de susceptibilidad a la rotura de los deslizamientos superficiales. Se procuró incluir todos los deslizamientos superficiales de la zona, excepto los desprendimientos. Una posible fuente de error en la localización de los movimientos proviene de las diferencias de 0.5 a 1.5 mm observadas entre las retículas de los poliéstere (menos deformados) y la de las ortofotos (más deformadas, debido al soporte de papel satinado con que están hechas). Posterior digitalización en *AutoCad*® v. 12 y entrada en Arc/Info. El trabajo fue realizado entre enero y abril de 1998. Precisión gráfica de los datos a escala 1:5.000.

## **MDE**

### **Procedimiento de obtención**

En el caso de la Poble de Lillet la variable se construyó a partir de un archivo de texto usando una función directa de Arc/Info creada para tal efecto. Dicha función es *Asciigrd* y permite generar un modelo digital a partir de un archivo de texto. Este archivo debe contener una cabecera con una serie de información que utilizará el programa para generar el modelo.

## **Observaciones adicionales**

Producido por el Instituto cartográfico de Cataluña (ICC).

## **MDEFILL**

### **Definición**

El modelo MDEFILL es un Modelo Digital de Elevaciones cuyos sumideros (depresiones de pequeña entidad) han sido rellenados. Representa, al igual que el MDE, la altitud sobre el nivel del mar en metros. Sus valores dependerán de la zona de estudio (zona cercana al mar, zona montañosa, etc.) y son valores cuantitativos continuos. Por tanto es una variable derivada del MDE original, de la que se pueden derivar todas las variables derivadas del modelo.

En el proceso de interpolación para obtener el MDE, se generan falsas depresiones (celdas rodeadas por otras de mayor elevación) que no existen en la realidad y que impiden derivar modelos digitales de flujo coherentes. Para eliminar tales irregularidades, se puede usar la variable MDEFILL en vez del MDE. El MDEFILL se ha utilizado como variable que representa la elevación, y para derivar otros modelos digitales de terreno.

### **Función**

Representa la misma función que la variable elevación del MDE. De todas formas, esta variable no se ha utilizado como variable para el análisis debido a la falta de una relación física clara entre la misma y los deslizamientos superficiales. Sin embargo, se ha utilizado para derivar otros modelos digitales. En el caso del Valle del Deba, no se ha utilizado en ningún caso.

### **Procedimiento de obtención**

La variable se obtiene a partir de una función directa del subprograma *GRID* de Arc/Info. Se trata de la función *fill* que rellena posibles hondonadas o depresiones del

terreno, fruto del modelo digital y que por tanto, no están en la topografía real, impidiendo la generación de la red de drenaje coherente. En la zona de La Pobra de Lillet todas las variables derivadas del MDE han sido generadas a partir de esta variable.

Hay que tener en cuenta que en zonas de geomorfología cárstica, con dolinas y otras depresiones, así como cuando el terreno tiene depresiones, es mejor utilizar el MDE sin rellenar, para recrear mejor la realidad del terreno, tal y como sucede en el valle del Deba.

### **Observaciones adicionales**

Es una variable de obtención automática en la que su fiabilidad y precisión depende del MDE del que deriva. Si el MDE tiene errores la variable también los tendrá. Consúltese el apartado del MDE.

## **PEND, ORIENT, RUGOS, CURVAR, PERFIL, PLA, ACUENCA, LONG, AFS, LFS, PENDM**

Se han obtenido con el mismo procedimiento descrito en el Anexo I.

### **Procedimiento de obtención**

Es una variable derivada del MDEFILL.

### **Observaciones adicionales**

Consúltese el apartado de metadatos del MDE y del MDEFILL.

## **INSOL**

### **Procedimiento de obtención**

Se ha utilizado una declinación solar de 22.5° correspondiente al 21 de junio, latitud de 42° y un intervalo de cálculo de la trayectoria solar de 60 minutos, dando como resultado 15 modelos de insolación. La media de los 15 modelos es la variable definitiva que se utiliza en el análisis estadístico.

Para más detalles, ver Anexo I.

## **VEGE**

### **Procedimiento de obtención**

La variable VEGET es una variable primaria obtenida manualmente a partir de la interpretación de fotogramas aéreos a escala 1:22.000, comprobación de campo, trasvase de la información a poliéster, posterior digitalización y construcción de la topología de polígono en Arc/Info.

La obtención de esta variable comporta un mayor consumo de tiempo en comparación con las derivadas del MDE. Está afectada también por un mayor nivel de subjetividad puesto que los datos se recogen por una persona con mayor o menor experiencia en fotointerpretación. Si las categorías son muy generales y de número reducido, la subjetividad de la fotointerpretación se reduce y aumenta la fiabilidad de los datos. Por ello, es importante definir bien la base de datos previamente al trabajo de recogida de la información, para ahorrar tiempo en decisiones posteriores. Una buena digitalización evitará cometer errores al crear la topología y evitará errores de omisión de etiquetas.

### **Codificación**

- 1- Sin vegetación: zonas donde no hay vegetación. Substrato rocoso, margen desnuda de barranco y canchal.

- 2- Prado natural: vegetación de prado, zonas de pastoreo, con algún(os) árbol(es) aislado(s) o algún grupo reducido de árboles.
- 3- Prado antrópico: tierras de cultivo de gran extensión limitadas por terrazas de piedra o bien terrazas más o menos estrechas con distinta altura del muro de piedras, pudiendo encontrarse abandonadas o no.
- 4- Bosque denso: en foto aérea no se observa o se observa poco el substrato herbáceo o arbustivo (se han agrupado dos categorías iniciales de bosque denso y moderadamente denso).
- 5- Bosque abierto: en foto aérea se observa perfectamente el substrato herbáceo o arbustivo pudiendo variar la separación entre árboles.
- 6- Matorral: esta categoría se ha definido sobre todo en las visitas de campo. Incluye el matorral con algunos árboles dispersos o algún grupo de árboles de pequeña entidad.
- 7- Ríos, minas y escombreras: incluye explotaciones a cielo abierto y sus escombreras, así como los cauces de ríos principales.
- 8- Núcleos urbanos: se trata de los núcleos urbanos (La Pobla de Lillet, Castellar de N'Hug) que no han entrado en el análisis.

Valores asignados para el análisis discriminante:

1	Sin vegetación	1
2	Prado natural	6
3	Prado antrópico, terrazas, cultivos	12
4	Bosque denso	15
5	Bosque abierto	12
6	Bosque bajo, matorral	9
7	Ríos, cicatrices, minas	1
8	Núcleos urbanos	0 (no entra en el análisis)



### **Observaciones adicionales**

Información obtenida a partir de la interpretación de fotogramas a escala 1:22.000, del vuelo de Cataluña del ICC de junio de 1983 (pasadas 3, 4 y 5) y trabajo de campo (1 día) para resolver dudas de la fotointerpretación. Simultáneamente, se pasaba la información sobre poliésters que incluían la retícula con las coordenadas x, y. Los poliésters se disponían sobre las ortofotos a escala 1:5.000 de la zona, y el perímetro de las distintas categorías se dibujaba sobre la base de las ortofotos. Se observó una diferencia de 0,5 a 1,5 mm entre las retículas de los poliéster (menos deformados) y la de las ortofotos (más deformadas, debido al papel satinado con que están hechas). Cada polígono fue etiquetado con una o dos letras en mayúscula, según una leyenda propia sobre la densidad y tipo de cobertura vegetal, a la vez que se incorporaba la información de existencia de substrato rocoso / formación superficial. La digitalización se realizó en *AutoCad*® v. 12. La información se recopiló y digitalizó entre enero y Abril de 1998. La precisión gráfica de los datos es de escala 1:5.000.

## **FS**

### **Procedimiento de obtención**

La variable FMS es una variable primaria obtenida manualmente a partir de la interpretación de fotografía aérea a escala 1:22.000, comprobación de campo, trasvase de la información a poliésters, posterior digitalización y construcción de la topología de polígonos en Arc/Info. Los errores son similares a los que se producen para la variable VEGE.

La separación entre roca y formación superficial se realizó también con estudio de foto aérea y visitas de campo. La roca predomina en zonas de cresta, divisorias de agua, lomas y convexidades. Se marcaron los afloramientos de roca y se fusionaron algunos polígonos de roca cuando eran pequeños y estaban suficientemente juntos. El resto se interpretó como formación superficial.

Valores asignados para el análisis multivariable:

1	Roca (sin formación superficial)	1
2	Formación superficial	4

### **Observaciones adicionales**

Información obtenida a partir de la interpretación de fotos a escala 1:22.000 del vuelo Cataluña del ICC, de junio de 1983 (pasadas 3, 4 y 5) y trabajo de campo (1 día) para resolver dudas de la fotointerpretación. Simultáneamente se pasaba la información sobre poliésters que contenían la retícula con las coordenadas x, y. Los poliésters se disponían sobre las ortofotos a escala 1:5.000 de la zona, y el perímetro de las distintas categorías se dibujaba sobre la base de las ortofotos. Se observó una diferencia de 0,5 a 1,5 mm entre las retículas de los poliésters (menos deformados) y la de las ortofotos (más deformadas, debido al papel satinado con que están hechas). Solo se delimitaron aquellas áreas que en foto aérea se veían como roca y el resto se atribuyó a formación superficial. Se utilizaron las etiquetas R para roca y el resto tenía la etiqueta de la vegetación, puesto que se aprovechó los mismos poliésters para digitalizar las dos variables. La digitalización se realizó en *AutoCad*® v. 12. La recopilación de la información y su digitalización se realizó entre Enero y Abril de 1998.

La precisión gráfica de los datos está a escala 1:5.000.

## **ESPE**

### **Procedimiento de obtención**

ESPE es una variable primaria obtenida manualmente a partir de la interpretación de fotografía aérea a escala 1:22.000, comprobación de campo, trasvase de la información a poliésters, posterior digitalización y construcción de la topología de polígonos en Arc/Info. Los errores son similares a los que se producen para la variable VEGE.

La variable ESPE se obtuvo a partir de extrapolación de foto aérea y 3 días de campo, siguiendo pistas forestales, carreteras y pequeños senderos en los que se midió con una cinta métrica el espesor de la formación superficial.

### **Codificación**

Contiene 3 categorías: 1 para el roquedo, 2 para la formación superficial < 0.5 m de espesor y 3 para la formación superficial > 0.5 m de espesor.

Valores asignados para el análisis multivariable:

1	Roca (sin formación sup.)	1
2	0-0.5 m de grosor de formación sup.	2
3	> 0.5 m de grosor de la formación	4

### **Observaciones adicionales**

Información obtenida a partir de trabajo de campo (3 días) e interpretación de las mismas fotos utilizadas para delimitar la vegetación y la formación superficial. La información se trazó, en gran parte sobre mapas a escala 1:5.000 y posteriormente se pasó a los poliésters. La información fue recogida entre Junio y Septiembre de 1998. La digitalización fue realizada en *AutoCad*® v. 12. La precisión gráfica de los datos está a escala 1:5.000.



## **ANEXO III: PROGRAMAS AML (Arc/Info) PARA ELABORAR MODELOS DIGITALES A PARTIR DEL MDE.**

Para la generación de los modelos digitales de las variables derivadas del MDE hay que ejecutar los siguientes “programas” en Arc/Info, de acuerdo con lo explicado en el Anexo I..

### ***Fegrid.aml***

```
&ARGS .NOMBRE_DTM
&IF [EXIST ORIENT -GRID] &THEN KILL ORIENT ALL
&IF [EXIST PEND -GRID] &THEN KILL PEND ALL
&IF [EXIST FD -GRID] &THEN KILL FD ALL
&IF [EXIST ACUENCA -GRID] &THEN KILL ACUENCA ALL
&IF [EXIST LONG -GRID] &THEN KILL LONG ALL
&IF [EXIST CURVAR -GRID] &THEN KILL CURVAR ALL
&IF [EXIST PENDM -GRID] &THEN KILL PENDM ALL
&IF [EXIST FAC -GRID] &THEN KILL FAC ALL
&IF [EXIST LFS -GRID] &THEN KILL LFS ALL
&IF [EXIST AFS -GRID] &THEN KILL AFS ALL
&IF [EXIST DTMFILL -GRID] &THEN KILL DTMFILL ALL
/* ASIGNAMOS PASO DE MALLA DEL DTM SUPERFICIE DE CADA CELDA
&DESCRIBE %.NOMBRE_DTM%
&SV CELDA %GRD$DX%
&SV SUPERFICIE [CALC %CELDA% * %CELDA% ]

/* DEFINIMOS EXTENSION AREA DE TRABAJO
MAPEX %.NOMBRE_DTM%

/* RELLENAMOS SUMIDEROS DEL DTM
/* FILL %.NOMBRE_DTM% DTMFILL Lo hemos desactivado

/* DEFINIMOS VARIABLE DEL NUEVO DTM
/* &SV NOM DTMFILL esto era el script original
&SV NOM DEM

/*DERIVADAS DIRECTAS DEL DTM

ORIENT = ASPECT (%NOM%)

PEND = SLOPE (%NOM%)

CURVAR = CURVATURE (%NOM%, PERFIL, PLA)

/* LA FD NOS DA LAS ORIENTACIONES DE FLUJO DE CADA CELDA (LA USAMOS PARA
CALCULAR OTRAS VARIABLES)
FD = FLOWDIRECTION (%NOM%)

/* LA FAC NOS DA EL NUMERO DE CELDAS QUE VIERTEN EN OTRA (LA USAMOS PARA
CALCULAR OTRAS VARIABLES)
FAC = FLOWACCUMULATION (FD)
```

```

/* MULTIPLICANDO LA FAC POR LA SUPERFICIE DE CELDA OBTENEMOS EL AREA DE
CUENCA ACUMULADA
ACUENCA = ( FAC ) * %SUPERFICIE%

/* CALCULAMOS LA LONGUITUD MAXIMA ACUMULADA AGUAS ARRIBA
LONG = FLOWLENGTH (FD,(1 / COS ( PEND DIV DEG )), UPSTREAM)

/* CALCULAMOS LA PENDIENTE MEDIA DE LA LONGUITUD MAXIMA ACUMULADA (SE
LLAMARÁ PENDM1)
PENDM1 = ACOS (FLOWLENGTH (FD,#,UPSTREAM) / LONG ) * DEG

PENDM = CON (ISNULL (PENDM1), 0.0, PENDM1)

/* PARA CALCULAR LAS VARIABLES EN LAS QUE INTERVIENE LA FORMACION SUPERFICIAL
/* UTILIZAMOS UNA MASCARA SEGUN LA PRESENCIA/AUSENCIA DE ESTA

SETMASK GFS

LFS = FLOWLENGTH ( FLOWDIRECTION (%NOM%),(1 / COS (SLOPE (%NOM%) DIV DEG )),
UPSTREAM)

AFS = ( FLOWACCUMULATION (FLOWDIRECTION (%NOM%)) ) * %SUPERFICIE%

SETMASK OFF

/* ELIMINA GRIDS INTERMEDIAS
&IF [EXIST FAC -GRID] &THEN KILL FAC ALL
&IF [EXIST FD -GRID] &THEN KILL FD ALL
&IF [EXIST PENDM1 -GRID] &THEN KILL PENDM1 ALL

```

## ***GRID.aml***

```

/* SE EJECUTA EN ARC Y NO EN GRID
/* NOMBRE_FS COBERTURA CON LA INFORMACION DE FORMACION SUPERFICIAL // ROCA
/* ITEM DEL CAMPO NUMERICO DE LA PAT QUE CONTIENE LA INFORMACION (DONDE 1 ES
LA NO PRESENCIA DE FORMACION SUPERFICIAL)
/* En el caso en que no sea igual a 0 modificar la tercera línea empezando por abajo
/* Para ejecutar este script hay que poner &run GRIDS.aml <Nombre de la cobertura de formacion superficial>
/* <nombre del item con el tipo de información> <nombre del DEM>
/* Este aml ejecuta el FGRID1
/* -----
&ARGS NOMBRE_FS ITEM .NOMBRE_DTM
&IF [EXIST GFST -GRID ] &THEN KILL GFST ALL
&IF [EXIST GFS -GRID ] &THEN KILL GFS ALL
&DESCRIBE %.NOMBRE_DTM%
&SV TAMAÑO %GRD$DX%
&SV ORIGEN %GRD$XMIN%, %GRD$YMIN%
&SV FILAS %GRD$NROWS%, %GRD$NCOLS%
POLYGRID %NOMBRE_FS% GFST %ITEM% # #
%TAMAÑO%
N
%ORIGEN%
%FILAS%
GRID
DISP 9999 3
MAPEX GFST

```

```
GFS = SELECT (GFST, 'VALUE > 1')
&IF [EXIST GFST -GRID ] &THEN KILL GFST ALL
&R FEGRID1  %NOMBRE_DTM%
```

### ***Rugosidad.aml***

```
/*-----
/*Calcula la rugosidad en funcion de la variabilidad del angulo normal a la
/*superficie utilizando los modelos de orientaciones y pendientes.
/*Considera un entorno 3x3 de cada celda calcula el modulo del vector suma:
/*value 0 con maxima dispersion hasta 1 para minima dispersion.
/*-----

&if %:program% ne GRID &then
&return &warning Este programa debe ejecutarse desde Grid ...

&s .mdo = [ response 'Modelo de orientaciones ...?' ]
&s .mdp = [ response 'Modelo de pendientes ...?' ]

mape %:mdo%

&messages &off
gridx = (sin ( %:mdo% div deg )) * (sin ( %:mdp% div deg))
gridy = (cos ( %:mdo% div deg)) * (sin ( %:mdp% div deg))
gridz = cos ( %:mdp% div deg )
sumx = sqr (focalsum ( gridx ))
sumy = sqr (focalsum ( gridy ))
sumz = sqr (focalsum ( gridz ))
modulo = sqrt ( sumx + sumy + sumz ) div 9
image modulo

kill gridx all
kill gridy all
kill gridz all
kill sumx all
kill sumy all
kill sumz all

&type -----
&type 'EL MODELO RESULTANTE SE LLAMA MODULO:'
&type '- VALUE OSCILA DE 0 A 1'
&type '- VALUE PROXIMO A 1 CON MINIMA DISPERSION'
&type -----

&messages &on
&return
```

## *Insolación.aml*

```
/* Creacion de modelos de insolacion.
/* Supone una latitud de +43.5grados; declinacion en grados e intervalo en minutos.
/* Da un modelo mds%.np% para cada iteraci3n: value 0 en sombra y 255 en m3xima luz
/* calculado con la funcion hillshade de Grid.
/* Para ejecutarlo se hace desde GRID. Se escribir &run insolacion <nombre del MDE> <declinaci3n>
<intervalo en minutos>
/* Para el 21 de junio en Guip3zcoa hay que escribir &run MDE 22.5 60; y resultan 15 MDS
/* Al final hay que hacer una media de todos los MDS resultantes.
/*-----

&cargs .mde .declinacion .intervalo
&if %:program% ne GRID &then
&return &warning Este programa debe ejecutarse desde Grid ...

&if [null %.mde%] &then
&return Uso: &r insolacion MDE DECLINACION INTERVALO

/* rutinas de cambio de unidades
&s .pi = 3.1416
&s .min2rad = [angrad [calc %.intervalo% * 0.25]]

/* Inicia variables
&s .dec = [angrad %.declinacion%]
&s .lat = [angrad 43.5]
&s .int = [angrad [calc %.intervalo% * 0.25]]

&s .np = 0
&s .anghor
&s .azimut
&s .elevac

&s .itpos = [round [calc %.pi% / %.int%]]
&s .itneg = [calc %.itpos% * -1]
&s .sind = [sin %.dec%]
&s .cosd = [cos %.dec%]
&s .sinl = [sin %.lat%]
&s .cosl = [cos %.lat%]

/* Iteracion

&format 2; &messages &off
&do i = %.itneg% &to %.itpos%

&s .anghor = [calc %i% * %.int%]
&s .sinh = [sin %.anghor%]
&s .cosh = [cos %.anghor%]
&s .elevac = [asin [calc [calc %.sind% * %.sinl%] + [calc %.cosd% * %.cosl% * %.cosh%]]]
&s .azimut = [acos [calc [calc [calc %.sind% * %.cosl%] - [calc %.cosd% * %.sinl% * %.cosh%]] / [cos
%.elevac%]]]
&if %i% > 0 &then
&s .azimut = [calc %.pi% + [calc %.pi% - %.azimut%]]

&if %.elevac% ge 0 &then
&do
&s .np = [calc %.np% + 1]
&type [format 'Calculando it. %1% (%2%/3%) ...' %.np% [radang %.azimut%] [radang %.elevac%]]
mds%.np% = hillshade (%.mde%, [radang %.azimut%] , [radang %.elevac%] , all)
```



```
image mds%.np%  
&end  
&end  
&type -----  
&type LOS MODELOS RESULTANTES SON MDS1 ... MDS%.np%:  
&type - VALUE OSCILA DE 0 A 255  
&type -----  
&messages &on  
&return
```



## **ANEXO IV: TABLAS DE VALIDACIÓN DE LOS MAPAS HEURÍSTICOS DE PELIGROSIDAD DEL BAJO DEVA.**

Los datos se han obtenido a partir de fotointerpretación del vuelo de 1991 y trabajo de campo y reflejan, por municipios, la superficie afectada por todas las tipologías de movimientos en masa identificadas, en cada una de las clases de peligrosidad correspondientes a los mapas de riesgos a escala 1:5.000 (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1986a). Por cada municipio se presentan cuatro tablas, según se trate de movimientos en masa relacionados o no con las actividades humanas y que la población incluya todos los movimientos identificados o sólo los ocurridos entre 1954 y 1991.

También se incluye el Índice de Inestabilidad Real ( $I_r$ ) que se define como el cociente entre el tanto por ciento de superficie afectada por deslizamientos en cada clase (o nivel de amenaza) del mapa de peligrosidad con respecto a la superficie total afectada y el valor porcentual de la superficie que esa clase ocupa en el total del territorio estudiado. Este índice ha sido utilizado para contrastar la cartografía de riesgos mencionada (Remondo et al., 1996) y para comparar su carácter predictivo con los mapas realizados mediante las técnicas estadísticas utilizadas en este trabajo.

## DEVA

Deslizamientos aparecidos entre 1954-5 y 1991 (164 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	8,45	16,25	10642,1	2,83	0,17
1	21,53	41,41	99945,8	26,57	0,64
2	16,45	31,64	64225,9	17,07	0,54
3	3,36	6,46	77675,8	20,65	3,20
4	2,20	4,23	123719,8	32,88	7,77

Deslizamientos no relacionados con actividades humanas aparecidos entre 1954-5 y 1991 (80 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	8,45	16,25	3887,7	1,41	0,09
1	21,53	41,41	71647,9	26,09	0,63
2	16,45	31,64	24484,8	8,92	0,28
3	3,36	6,46	58472,9	21,29	3,29
4	2,20	4,23	116062,2	42,27	9,99

Todos los deslizamientos identificados (371 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	8,45	16,25	24033,1	3,09	0,19
1	21,53	41,41	174578,2	22,45	0,54
2	16,45	31,64	257273,6	33,09	1,04
3	3,36	6,46	140782,5	18,11	2,80
4	2,20	4,23	180837,8	23,26	5,50

Todos los deslizamientos no relacionados con actividades humanas (194 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	8,45	16,25	12782,3	2,47	0,15
1	21,53	41,41	108640,1	20,98	0,51
2	16,45	31,64	149932,5	28,95	0,91
3	3,36	6,46	90811,7	17,53	2,71
4	2,20	4,23	155744,4	30,07	7,11

## MENDARO

Deslizamientos aparecidos entre 1954-5 y 1991 (97 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	3,10	12,7	1413,7	1,87	0,15
1	8,89	36,4	11093,8	14,71	0,40
2	3,74	15,3	11250,8	14,92	0,97
3	8,45	34,6	43707,4	57,97	1,67
4	0,22	0,9	7932,5	10,52	1,67

Deslizamientos no relacionados con actividades humanas aparecidos entre 1954-5 y 1991 (32 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	3,10	12,7	589,0	2,1	0,16
1	8,89	36,4	3298,7	11,8	0,32
2	3,74	15,3	2807,8	10,1	0,66
3	8,45	34,6	19026,3	68,3	1,97
4	0,22	0,9	2120,6	7,6	8,44

Todos los deslizamientos identificados (138 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	3,10	12,7	2847,1	2,5	0,19
1	8,89	36,4	13783,7	12,3	0,34
2	3,74	15,3	17062,7	15,2	0,99
3	8,45	34,6	69645,1	62,1	1,79
4	0,22	0,9	8816,1	7,8	8,66

Todos los deslizamientos no relacionados con actividades humanas (50 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	3,10	12,7	2022,4	4,36	0,34
1	8,89	36,4	3298,7	7,11	0,19
2	3,74	15,3	6656,2	14,34	0,94
3	8,45	34,6	32299,5	69,60	2,01
4	0,22	0,9	2120,6	4,60	5,11

## ELGOIBAR

Deslizamientos aparecidos entre 1954-5 y 1991 (187 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	4,85	11,85	3436,1	1,97	0,17
1	7,37	17,98	27901,2	16,01	0,89
2	14,58	35,57	48753,5	27,97	0,79
3	11,13	27,16	85039,0	48,79	1,78
4	3,04	7,46	9169,5	5,26	0,70

Deslizamientos no relacionados con actividades humanas aparecidos entre 1954-5 y 1991 (89 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	4,85	11,85	1295,9	1,68	0,14
1	7,37	17,98	7853,9	10,18	0,57
2	14,58	35,57	28313,6	36,69	1,03
3	11,13	27,16	36383,6	47,15	1,74
4	3,04	7,46	3318,3	4,30	0,58

Todos los deslizamientos identificados (286 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	4,85	11,85	7638,0	2,64	0,22
1	7,37	17,98	41959,7	14,52	0,81
2	14,58	35,57	114923,2	39,77	1,12
3	11,13	27,16	111840,7	38,71	1,42
4	3,04	7,46	12585,9	4,35	0,58

Todos los deslizamientos no relacionados con actividades humanas (150 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	4,85	11,85	3200,5	2,59	0,22
1	7,37	17,98	12605,5	10,20	0,57
2	14,58	35,57	46986,4	38,01	1,09
3	11,13	27,16	57275,2	46,33	1,70
4	3,04	7,46	3553,9	2,87	0,38

## EIBAR

Deslizamientos aparecidos entre 1954-5 y 1991 (87 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	1,67	7,46	3730,6	5,0	0,67
1	2,38	10,65	5870,8	7,9	0,74
2	7,87	35,17	26173,4	35,1	0,99
3	9,54	42,63	35637,4	47,8	1,12
4	0,99	4,00	3161,2	4,2	1,05

Deslizamientos no relacionados con actividades humanas aparecidos entre 1954-5 y 1991 (27 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	1,67	7,46	3730,6	13,8	1,85
1	2,38	10,65	1472,6	5,4	0,51
2	7,87	35,17	14647,7	54,1	1,54
3	9,54	42,63	6852,6	25,3	0,59
4	0,99	4,00	392,7	1,4	0,35

Todos los deslizamientos identificados (141 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	1,67	7,46	3730,6	3,07	0,41
1	2,38	10,65	11663,1	9,61	0,90
2	7,87	35,17	37718,7	31,07	0,88
3	9,54	42,63	61967,9	51,05	1,20
4	0,99	4,00	6302,8	5,19	1,30

Todos los deslizamientos no relacionados con actividades humanas (55 movimientos en masa).

Clase	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %	Superficie afectada por movimientos (m <sup>2</sup> )	% de superficie afectada	I <sub>r</sub>
0	1,67	7,46	3730,6	7,33	0,98
1	2,38	10,65	5674,5	11,16	1,05
2	7,87	35,17	20656,0	40,62	1,15
3	9,54	42,63	19045,9	37,45	0,88
4	0,99	4,00	1747,5	3,44	0,86





**ANEXO V: CARACTERIZACIÓN TEMPORAL DE LOS DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TÉCNICAS DE Cs-137. TABLAS DE DATOS.**

Deslizamiento I: Caserío San Martín

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Cs-137</b>	<b>Localización</b>
A-1	0,0-2,5	10,2	Zona estable
A-2	2,5-5,0	9,8	
A-3	5,0-7,5	11,1	
A-4	7,5-10,0	11,4	
A-5	10,0-12,5	8,7	
A-6	12,5-15,0	10,3	
A-7	15,0-17,5	10,8	
A-8	17,5-20,0	13,2	
A-9	20,0-22,5	8,1	
A-10	22,5-25,0	8,8	
A-11	25,0-30,0	6,7	
A-12	30,0-35,0	8,7	

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Cs-137</b>	<b>Localización</b>
B-1	0,0-5,0	<LID	Escarpe
B-2	5,0-10,0	2,8	
B-3	10,0-15,0	<LID	
B-4	15,0-20,0	1,7	
B-5	20,0-25,0	2,3	
B-6	25,0-30,0	<LID	
B-7	30,0-35,0	<LID	

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Cs-137</b>	<b>Localización</b>
C-1	0,0-5,0	<LID	Escarpe
C-2	5,0-10,0	<LID	
C-3	10,0-15,0	<LID	
C-4	15,0-20,0	<LID	
C-5	20,0-25,0 (roca)	<LID	

Muestra	Profundidad (cm)	Cs-137	Localización
D-1	0,0-2,5	5,8	Depósito
D-2	2,5-5,0	3,2	
D-3	5,0-7,5	<LID	
D-4	7,5-10,0	<LID	
D-5	10,0-12,5	<LID	
D-6	12,5-15,0	4,3	
D-7	15,0-17,5	1,9	
D-8	17,5-20,0	2,4	
D-9	20,0-22,5	3,1	
D-10	22,5-25,0	2,7	

Muestra	Profundidad (cm)	Cs-137	Localización
E-1	0,0-2,5	2,8	Depósito
E-2	2,5-5,0	2,0	
E-3	5,0-7,5	2,3	
E-4	7,5-10,0	8,4	
E-5	10,0-12,5	8,3	
E-6	12,5-15,0	5,4	
E-7	15,0-17,5	1,6	
E-8	17,5-20,0	5,1	
E-9	20,0-22,5	<LID	
E-10	22,5-25,0	6,6	
E-11	25,0-27,5	11,2	
E-12	27,5-30,0	8,8	
E-13	30,0-32,5	6,5	
E-14	32,5-35,0	3,3	

Muestra	Profundidad (cm)	Cs-137	Localización
F-1	0,0-5,0	14,3	Zona estable
F-2	5,0-10,0	11,5	
F-3	10,0-15,0	3,8	
F-4	15,0-20,0	<LID	
F-5	20,0-25,0	3,6	
F-6	25,0-30,0	2,4	
F-7	30,0-35,0	<LID	
F-8	35,0-40,0	<LID	
F-9	40,0-45,0	<LID	
F-10	45,0-50,0	<LID	

DeslizamientoII: Sakoneta.

Muestra	Profundidad (cm)	Cs-137	Localización
A-1	0,0-5,0	49,7	Zona estable
A-2	5,0-10,0	19,4	
A-3	10,0-15,0	7,0	
A-4	15,0-20,0	3,1	
A-5	20,0-25,0	<LID	
A-6	25,0-30,0	<LID	
A-7	30,0-35,0	<LID	
A-8	35,0-40,0	<LID	
A-9	40,0-45,0	<LID	
A-10	45,0-50,0	<LID	

Muestra	Profundidad (cm)	Cs-137	Localización
B-1	0,0-5,0	27,7	Zona estable
B-2	5,0-10,0	13,3	
B-3	10,0-15,0	1,8	
B-4	15,0-20,0	<LID	
B-5	20,0-25,0	<LID	
B-6	25,0-30,0	1,6	
B-7	30,0-35,0	<LID	
B-8	35,0-40,0	<LID	
B-9	40,0-45,0	<LID	
B-10	45,0-50,0	1,6	
B-11	50,0-55,0	<LID	

Muestra	Profundidad (cm)	Cs-137	Localización
C-1	0,0-5,0	<LID	Escarpe
C-2	5,0-10,0	<LID	
C-3	10,0-15,0	<LID	
C-4	15,0-20,0	<LID	
C-5	20,0-25,0	2,6	
C-6	25,0-30,0	<LID	
C-7	30,0-35,0	<LID	
C-8	35,0-40,0	<LID	
C-9	40,0-45,0	<LID	

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Cs-137</b>	<b>Localización</b>
D-1	0,0-5,0	<LID	Escarpe
D-2	5,0-10,0	2,0	
D-3	10,0-15,0	<LID	
D-4	15,0-20,0	2,7	
D-5	20,0-25,0	2,9	
D-6	25,0-30,0	<LID	
D-7	30,0-35,0	<LID	
D-8	35,0-40,0	<LID	

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Cs-137</b>	<b>Localización</b>
E-1	0,0-5,0	2,6	Depósito
E-2	5,0-10,0	3,1	
E-3	10,0-15,0	2,7	
E-4	15,0-20,0	4,2	
E-5	20,0-25,0	9,1	
E-6	25,0-30,0	8,0	
E-7	30,0-35,0	7,7	
E-8	35,0-40,0	4,7	
E-9	40,0-45,0	1,8	
E-10	45,0-50,0	2,8	
E-11	50,0-55,0	<LID	

## **ANEXO VI: CD DEL BANCO DE DATOS DIGITAL.**

