

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Facultad de Ciencias

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y  
FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

TESIS DOCTORAL

**Desarrollo, aplicación y validación de  
procedimientos y modelos para la evaluación  
de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a  
procesos geomorfológicos**

MEMORIA PRESENTADA POR

**Jaime Bonachea Pico**

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR LA  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

SANTANDER, JULIO 2006



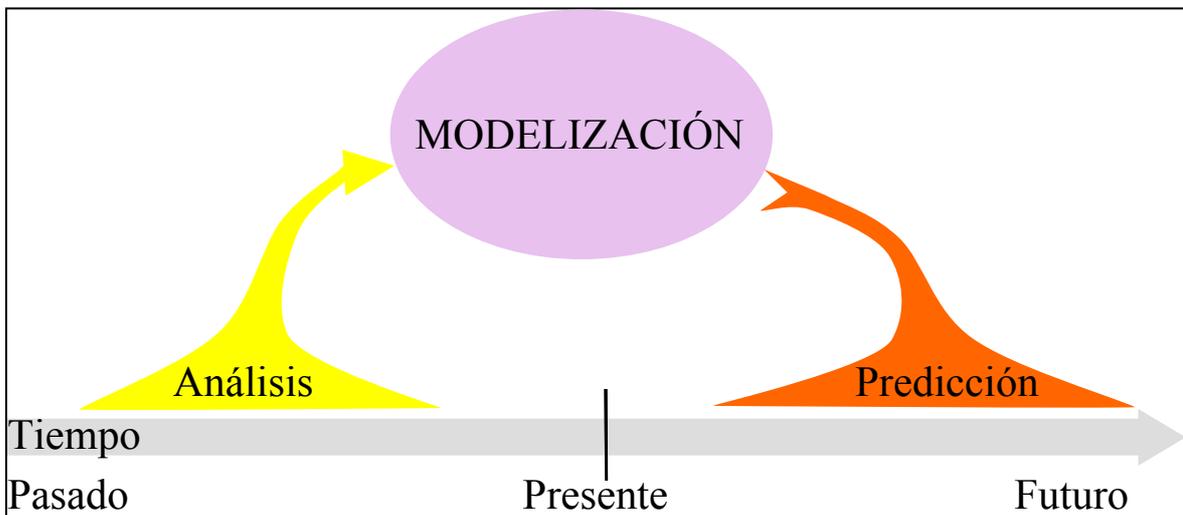
# CAPÍTULO 6

## METODOLOGÍA



## CAPÍTULO 6 METODOLOGÍA

La metodología que se describe a continuación se basa en el principio del uniformismo, que considera el presente como la clave del pasado (aquí el pasado es la clave del presente y del futuro) (Figura 6.1), y que se ha comentado al plantear las hipótesis de trabajo. Esto es, el análisis de los sucesos ocurridos en el pasado para, mediante su modelización, realizar predicciones acerca de su comportamiento futuro (Cendrero et al., 2006). La aplicación de esa metodología se esquematiza en el diagrama de flujo de la Figura 6.2. A partir de la identificación de un proceso, en este caso los movimientos de ladera, y en función de un determinado modelo de rotura y su relación con una serie de factores condicionantes o preparatorios, es posible identificar *dónde* se puede producir un proceso de similares características; esto es, elaborar un modelo de susceptibilidad a los deslizamientos por medio de técnicas estadísticas. Asimismo, del análisis de la frecuencia de movimientos en el pasado y de su magnitud, en función de una serie de escenarios, se pueden hacer extrapolaciones sobre el comportamiento futuro de los deslizamientos, tanto en lo relativo a su magnitud como a su frecuencia (*cuándo*).



**Figura 6.1.** Diagrama metodológico del proceso de modelización de deslizamientos.

Por otro lado, el análisis de los daños producidos en el pasado por el tipo de movimiento considerado, permite determinar qué elementos han sufrido daños, su valor y cuáles han sido esos daños (*qué y cuánto es afectado*). La relación entre las pérdidas y el valor de los elementos expuestos permitirá realizar estimaciones sobre la vulnerabilidad de estos elementos. La estimación de daños o de pérdidas indirectas es más complicada, ya que no suelen existir datos sobre daños indirectos, por lo que se debe recurrir a ciertas suposiciones o escenarios que traten de representar esas pérdidas indirectas potenciales.

De la integración de los modelos de peligrosidad, valor de un elemento determinado y su vulnerabilidad, se obtendrá un modelo de riesgo específico para cada elemento afectado. La suma de estos modelos de riesgo específico para el conjunto de los elementos presentes en la zona, permite generar un modelo de riesgo directo para un área dada. La combinación de los modelos de peligrosidad y de pérdidas indirectas permitirá obtener un modelo de riesgo indirecto para la misma área de estudio. Mediante la suma de modelos de riesgo directo y de riesgo indirecto se generará un modelo de riesgo total que muestra las pérdidas económicas esperables en el periodo de tiempo considerado como consecuencia del proceso analizado (*cuánto*).

Con el fin de proceder sistemáticamente, se describirá en primer lugar cómo se elaboran los modelos de susceptibilidad y su posterior transformación en modelos de peligrosidad, teniendo en cuenta la frecuencia y magnitud de los deslizamientos en el pasado. Más adelante, se acometerá el inventario de elementos expuestos y el análisis de los daños producidos en el pasado, lo que permitirá evaluar la vulnerabilidad de los diferentes elementos. Por último, se elaborarán los modelos de riesgo mediante la combinación de los modelos de peligrosidad y de vulnerabilidad de los diferentes tipos de elementos.

### 6.1 La expresión matemática del riesgo

La metodología planteada en este trabajo se basa conceptualmente, en la expresión de Varnes (1984) y UNDRO (1991), que considera el riesgo como función de la peligrosidad (H), de los elementos expuestos (E) y de su vulnerabilidad (V):

$$R = f \{H, E, V\}$$

La expresión anterior es conceptualmente muy clara y de general aceptación. Sin embargo, su aplicación a situaciones reales presenta problemas, en la mayoría de los casos no resueltos de manera totalmente satisfactoria. Esos problemas surgen de la dificultad de expresar en términos cuantitativos los distintos factores que intervienen en la función, ya sea la probabilidad de ocurrencia de futuros episodios peligrosos (H), los elementos expuestos (E) o el grado de daño que cada uno de ellos experimentará como consecuencia de un evento futuro (V). Algunos autores han abordado este aspecto y han propuesto expresiones que tratan de aportar una mayor precisión a la formulación general.

Morgan et al. (1992) formulan una expresión similar para expresar el riesgo:

$$R = P(H) * P(S|H) * V(P|S) * E$$

donde:

R son las pérdidas anuales en el valor de un elemento.

P(H) es la probabilidad anual de que se produzca un deslizamiento.

P(S|H) es la probabilidad anual de que el elemento sea afectado por un deslizamiento.

V(P|S) es la vulnerabilidad del elemento o proporción de valor perdido.

E es el valor del elemento.

En esta expresión, los dos primeros términos equivalen a la peligrosidad, mientras que en el último se introduce el término valor del elemento.

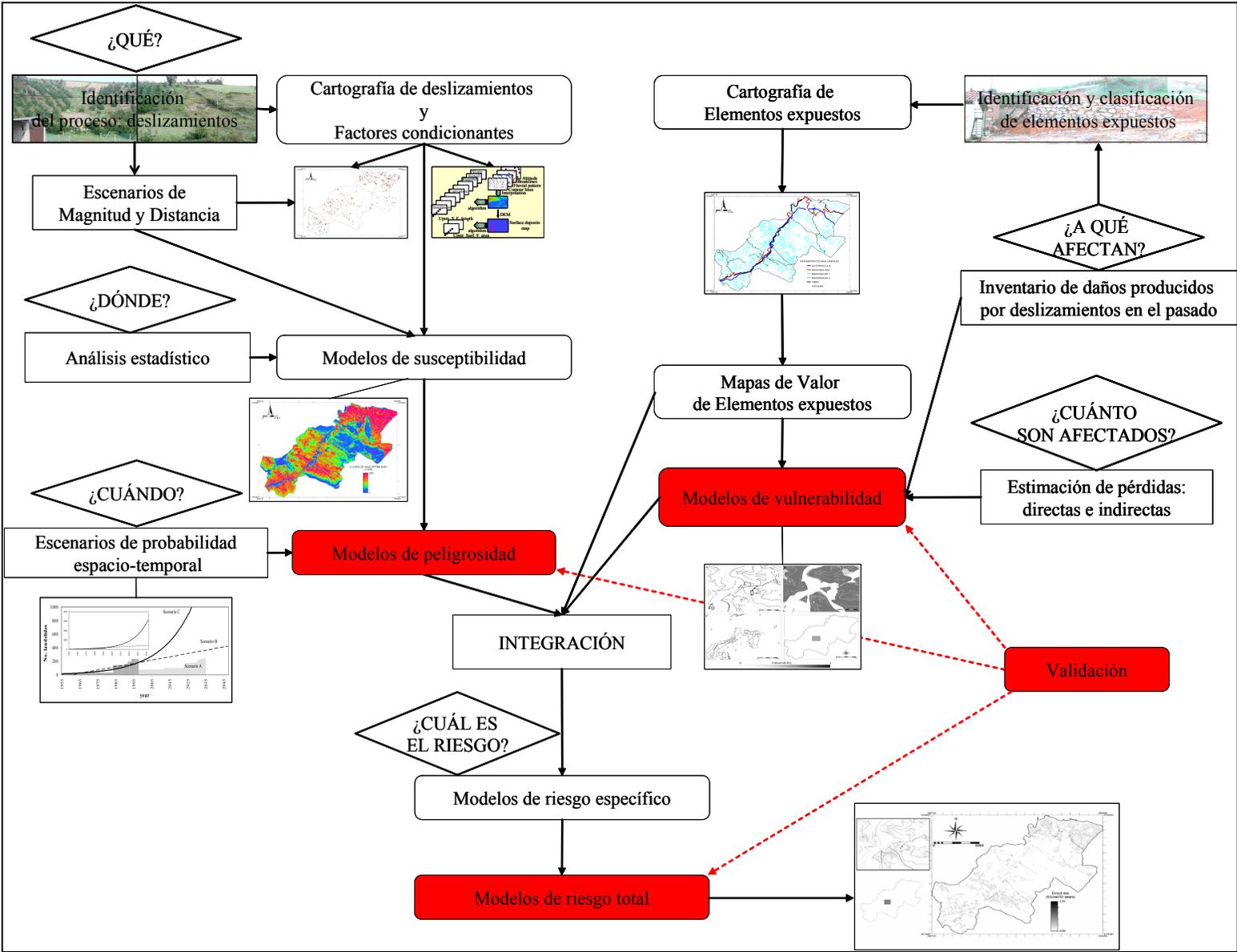


Figura 6.2. Diagrama de flujo mostrando el proceso de análisis de riesgo por deslizamientos seguido en este trabajo. En rojo, etapas en las que es deseable la validación.

Chung & Fabbri (2004), para obtener una representación de carácter cuantitativo e inequívoco del riesgo, reformulan la expresión de Varnes (1984) y UNDRO (1991), que ahora adopta la siguiente forma:

$$\mathbf{R = Valor\ del\ Elemento * Prob\{D \cap L\}}$$

donde:

$Prob\{D \cap L\}$  es la probabilidad de que un elemento quede dañado (D) por un deslizamiento en el futuro (L).

Este término de la expresión se puede descomponer, a su vez, en:

$$\mathbf{Prob\{D \cap L\} = Prob\{D|L\} * Prob\{L\}}$$

donde:

$Prob\{D|L\}$  es la probabilidad condicionada de que el elemento quede dañado (D) si la unidad de superficie del territorio (píxel  $p$ ) es afectada por un futuro deslizamiento.

$Prob\{L\}$  es la probabilidad de que el píxel  $p$  quede afectado por un futuro deslizamiento.

Por tanto, la expresión final del riesgo quedaría como:

$$\mathbf{R = Valor\ del\ Elemento * Prob\{D|L\} * Prob\{L\}}$$

La forma de incorporar los factores condicionantes (G) a la expresión de evaluación del riesgo de forma matemática sería la siguiente:

$$\mathbf{R = Valor\ del\ Elemento * Prob\{D \cap L|G\}}$$

donde:

$Prob\{D \cap L|G\}$  es la probabilidad de que un elemento sea dañado por un futuro deslizamiento, dado que en el píxel  $p$  existen unos determinados factores condicionantes.

Esta probabilidad, a su vez, se puede descomponer en

$$\mathbf{Prob\{D \cap L|G\} = Prob\{(D|L)|G\} * Prob\{L|G\}}$$

En este caso:

$Prob\{(D|L)|G\}$  es la probabilidad condicionada de que el elemento quede dañado, si el píxel  $p$  queda afectado por un deslizamiento, dado que se han identificado una serie de factores condicionantes en el píxel  $p$ . Este término equivaldría a la vulnerabilidad (V).

$Prob\{L|G\}$  es la probabilidad de ocurrencia de un futuro deslizamiento en el píxel  $p$ , dados los factores condicionantes existentes en  $p$ . Este término equivaldría a la peligrosidad o amenaza (H).

Como la  $\text{Prob}\{(D|L)|G\}$  de un deslizamiento de una determinada magnitud es aproximadamente igual a  $\text{Prob}\{D|L\}$ , puesto que la vulnerabilidad no depende tanto de las variables del terreno como de las características de los elementos o de su resistencia al impacto de un deslizamiento de una magnitud dada, la expresión definitiva del riesgo queda así:

$$\mathbf{R = Valor\ del\ Elemento * Prob\{D|L\} * Prob\{L|G\}}$$

que es una formulación más precisa que la expresión propuesta por Varnes (1984) antes citada:

$$\mathbf{R = E * V * H}$$

En este trabajo se presenta un nuevo procedimiento para la evaluación del riesgo que implica:

a) Estimación de la  $\text{Prob}\{L|G\}$  o peligrosidad en dos fases:

- Construcción de un modelo de probabilidad espacial o modelo de susceptibilidad considerando la magnitud y alcance de los deslizamientos.
- Transformación del modelo de susceptibilidad en un modelo de probabilidad espacio-temporal.

b) Estimación de la vulnerabilidad ( $\text{Prob}\{D|L\}$ ), para cada tipo de elemento, a partir de la relación entre pérdidas sufridas por el elemento si éste es afectado por un deslizamiento, y el valor o coste de reemplazar ese elemento. La Figura 6.3 muestra un esquema del procedimiento seguido para evaluar la vulnerabilidad.

c) Obtención de modelos de riesgo, incorporando el valor de los elementos expuestos,  $\text{Prob}\{L|G\}$  y  $\text{Prob}\{D|L\}$ .

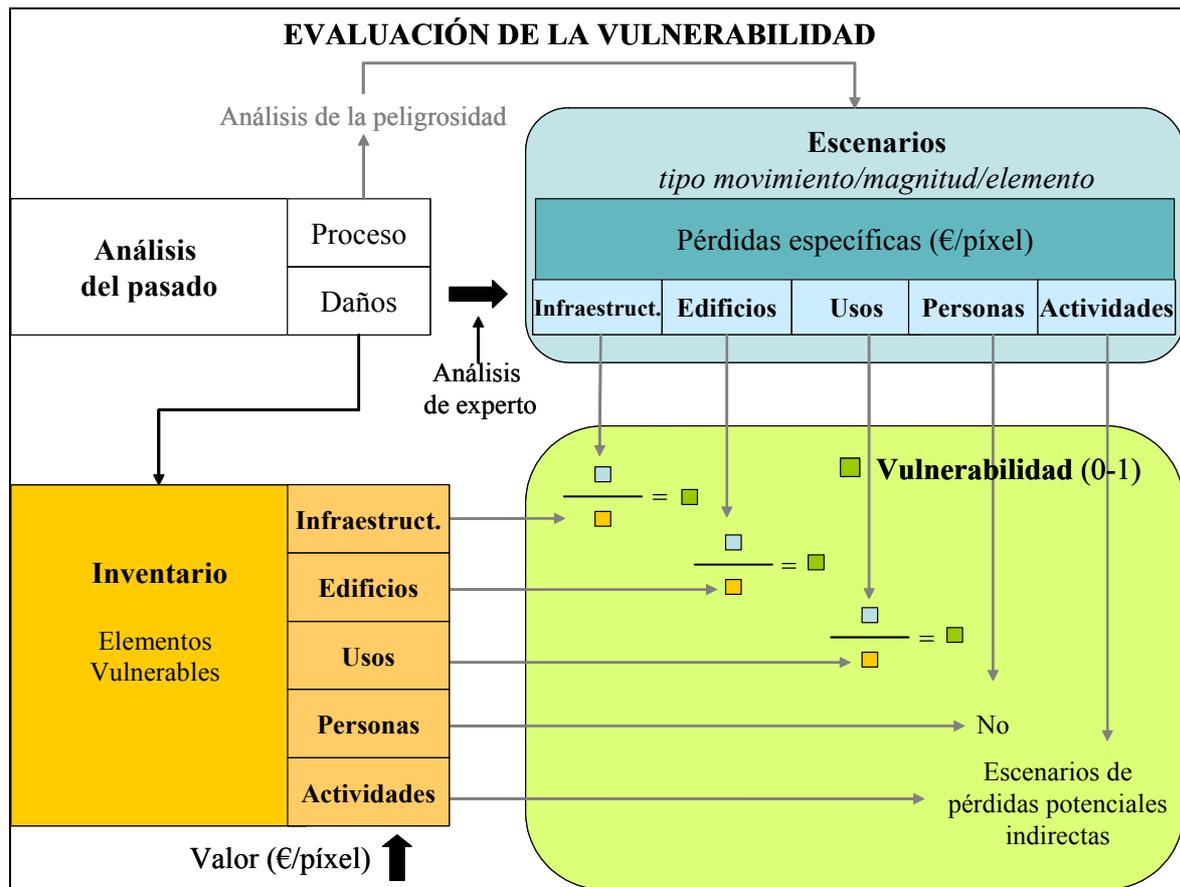
## 6.2 Desarrollo de la metodología de trabajo

En el desarrollo del esquema metodológico representado en la Figura 6.2, se pueden señalar las siguientes grandes etapas que serán objeto de descripción detallada a lo largo de este capítulo:

- *Elección de un área de estudio*: la metodología se ha aplicado en un área de estudio concreta, la zona del Bajo Deva (Guipúzcoa).
- *Toma y preparación de datos*: en una primera fase se ha completado la cartografía de movimientos previamente elaborada y se han identificado posibles factores condicionantes adicionales. También se han analizado los distintos tipos de elementos afectados por deslizamientos en el pasado, los daños que han sufrido, así como su valor económico.
- *Elaboración de modelos*: en primer lugar, se han elaborado modelos de susceptibilidad mediante funciones estadísticas. Posteriormente, se han transformado en modelos de probabilidad espacio-temporal teniendo en cuenta la frecuencia de movimientos en el pasado y la influencia humana sobre los mismos, de manera que se han considerado varios

escenarios de tendencias futuras. Los modelos de probabilidad espacio-temporal se han integrado con el modelo de valor del elemento y con el modelo de vulnerabilidad ante deslizamientos de cada elemento. El resultado final son los modelos de riesgos con un significado cuantitativo.

- *Validación de los modelos:* metodológicamente, la validación sigue al análisis de datos por medio de los diferentes modelos, pero en la práctica el proceso de análisis-validación se ha desarrollado de forma iterativa a lo largo de todo el tratamiento. Las técnicas de validación se utilizarán como criterio para seleccionar los mejores modelos y analizar la influencia de la mejora en la precisión/resolución de las variables en los modelos resultantes.
- *Análisis de resultados:* finalmente, se discutirán los resultados obtenidos y se comentarán las principales conclusiones de este trabajo.
- *Aplicación del método a otro tipo de proceso geomorfológico:* La metodología desarrollada para elaborar modelos de susceptibilidad de deslizamientos será aplicada para modelizar la susceptibilidad de colapsos en terrenos evaporíticos, para lo cual se ha seleccionado una zona que presenta esta problemática, en el valle del Ebro, aguas abajo de la ciudad de Zaragoza.



**Figura 6.3.** Diagrama conceptual para la evaluación de la vulnerabilidad. Se tiene que del análisis de deslizamientos ocurridos en el pasado, se estudia el proceso y por otro lado los daños. Del análisis del pasado se identifican por un lado, los distintos elementos vulnerables y su valor en (€/píxel), y por otro lado, teniendo en cuenta un escenario similar al utilizado para analizar la peligrosidad se calculan las pérdidas específicas por año que se obtienen en base a daños actuales en el pasado. La vulnerabilidad, por tanto, se expresa como la relación entre pérdidas y coste.

### 6.3 Descripción y selección del área de estudio

#### 6.3.1 Justificación

El área de estudio comprende los municipios de Deva, Mendaro, Elgoibar y Eibar, situados en la zona noroeste de la provincia de Guipúzcoa, en su límite con Vizcaya. La elección de esta zona es consecuencia, principalmente, del conocimiento previo existente sobre ella, así como de la excelente información cartográfica disponible y, por otro lado, del interés de la Diputación Foral de Guipúzcoa, concretamente del Departamento para la Ordenación y Promoción Territorial, para desarrollar una infraestructura de datos y metadatos (con estándares europeos), para toda la provincia, que pueda servir de base en la toma de decisiones. Esta política se enmarca dentro de la propuesta europea INSPIRE (*IN*frastructure for *S*patial *I*nfoRmation in *E*urope). El objetivo fundamental de esta directiva europea es facilitar que los órganos responsables de la toma de decisiones en los 25 Estados miembros, dispongan de unos datos espaciales abundantes y fiables. Aunque INSPIRE está centrado fundamentalmente en la infraestructura de datos espaciales, en sentido general, contempla de forma específica aspectos sobre cartografía temática y de riesgos. Así, una base de datos cuya realización considera INSPIRE es la referente a las “zonas afectadas por riesgos naturales: zonas vulnerables caracterizadas por la existencia de riesgos de carácter natural, por ejemplo inundaciones, **corrimientos de tierra**, aludes, incendios forestales, terremotos, erupciones volcánicas”.

En la zona del Bajo Deva el riesgo de daños por deslizamientos no es, en principio, elevado, debido a que la mayoría de los movimientos presentes son de pequeña magnitud. Sin embargo, el número de movimientos es muy alto y afectan a una superficie bastante extensa, por lo que presenta condiciones favorables para la realización de análisis estadísticos. Además, aunque no sean habituales, algunos de esos movimientos producen daños importantes, como por ejemplo el que afectó en diciembre de 2005 a la autopista Bilbao-San Sebastián.

Por último, la cartografía de deslizamientos realizada por Remondo (2001), junto con la información cartográfica facilitada por la Diputación Foral de Guipúzcoa, han facilitado extraordinariamente el desarrollo del trabajo que aquí se presenta.

#### 6.3.2 Características generales

##### 6.3.2.1 Marco geográfico

El área de estudio se sitúa en la zona más occidental de la provincia de Guipúzcoa, formando parte de la cuenca del Bajo Deva (Figura 6.4). La superficie total estudiada es de 139,4 km<sup>2</sup>, estando comprendida entre las coordenadas rectangulares UTM:

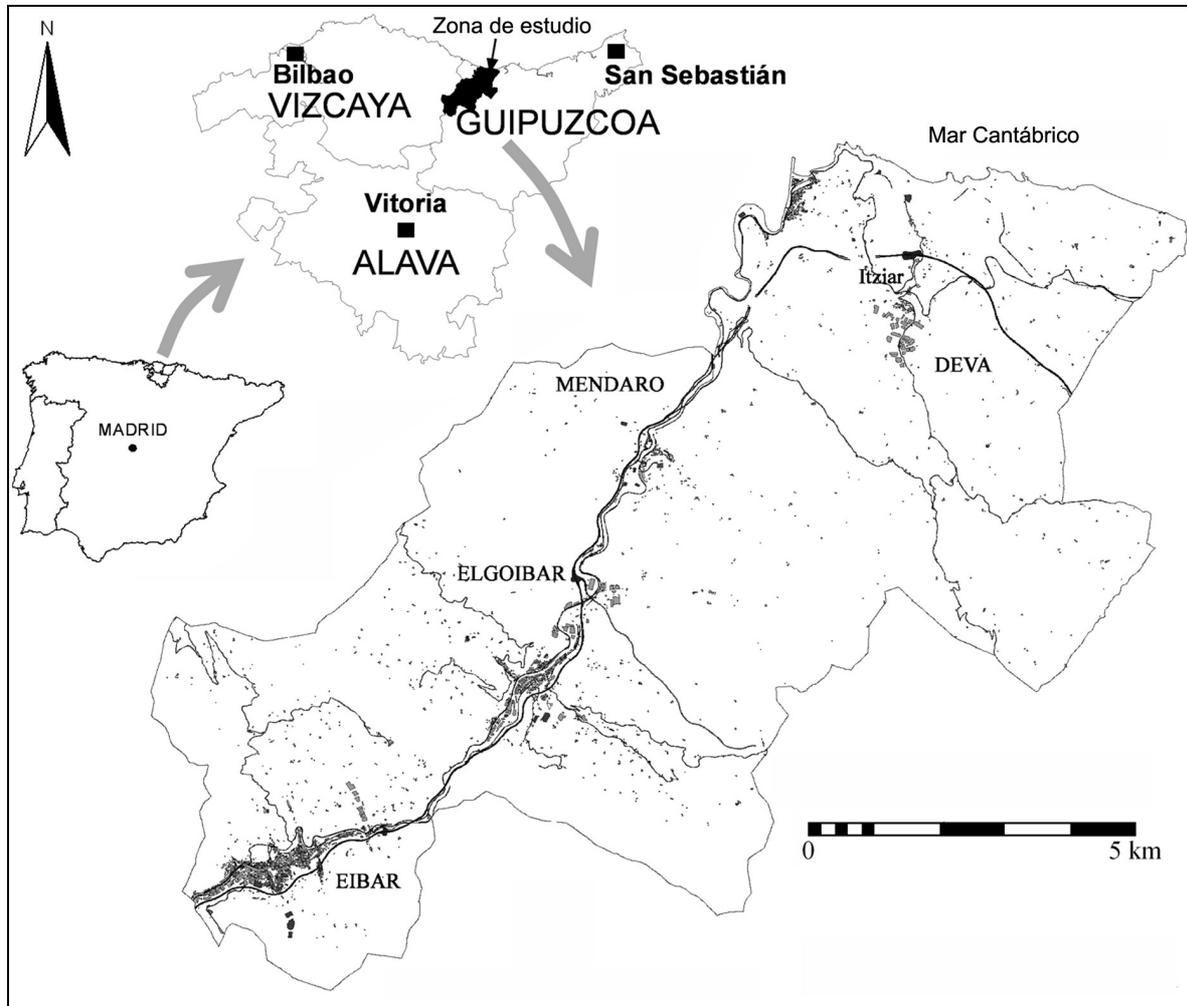
$$X_{min} = 540744,8755; Y_{min} = 4779392,5000; X_{max} = 559594,8755; Y_{max} = 4794932,5000;$$

cuyos puntos delimitan una superficie rectangular total de 293,3 km<sup>2</sup>.

La característica orográfica más destacada del área de estudio es, sin duda, su relieve accidentado; con altitudes que oscilan entre 0 y 895 metros y pendientes entre 0° y 81°. El río Deva atraviesa la zona en dirección SE-NE, perpendicularmente a la estructura geológica, hasta su desembocadura en el mar Cantábrico, junto a la población de Deva. Paralelos a esta estructura y perpendiculares al cauce principal, aparecen una serie de

cauces delimitados por valles de laderas rectilíneas con bastante pendiente y fondos de valle muy estrechos.

El municipio de Deva, en su zona más septentrional, limita con el mar Cantábrico y se caracteriza por presentar una rasa cortada por acantilados abruptos y bastante inestables, de la que sobresalen colinas y en la que se encajan pequeños arroyos.



**Figura 6.4.** Situación del área de estudio. Se muestran las principales líneas de comunicación y los edificios.

### 6.3.2.2 Marco climático

El clima de la zona se caracteriza por ser de tipo templado-húmedo; con medias anuales de 13 °C y 1.300 mm. Los inviernos suelen ser suaves y los veranos relativamente frescos. Las precipitaciones son frecuentes durante todas las estaciones, principalmente en el otoño y primavera. 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 aumento de la amplitud térmica diaria.

Los episodios de lluvias intensas, especialmente importantes en relación con la ocurrencia de deslizamientos, son relativamente frecuentes; las tormentas de 60 y 100 mm/día tienen

periodos de retorno de 2,3 y 10 años, respectivamente (Remondo, 2001). 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.

### 6.3.2.3 Marco geológico

El marco geológico de la zona de estudio ha sido ampliamente descrito en trabajos anteriores (Remondo, 2001; EVE, 2003) por lo que únicamente se hará una breve descripción de los materiales aflorantes (Figura 6.5).

Las edades de los materiales presentes abarcan desde el Cretácico inferior (Aptiense inferior-Albiense medio) hasta el Eoceno (Ypresiense), además de los depósitos de edad cuaternaria consistentes en depósitos aluviales, aluvio-coluviales, antropogénicos y litorales.

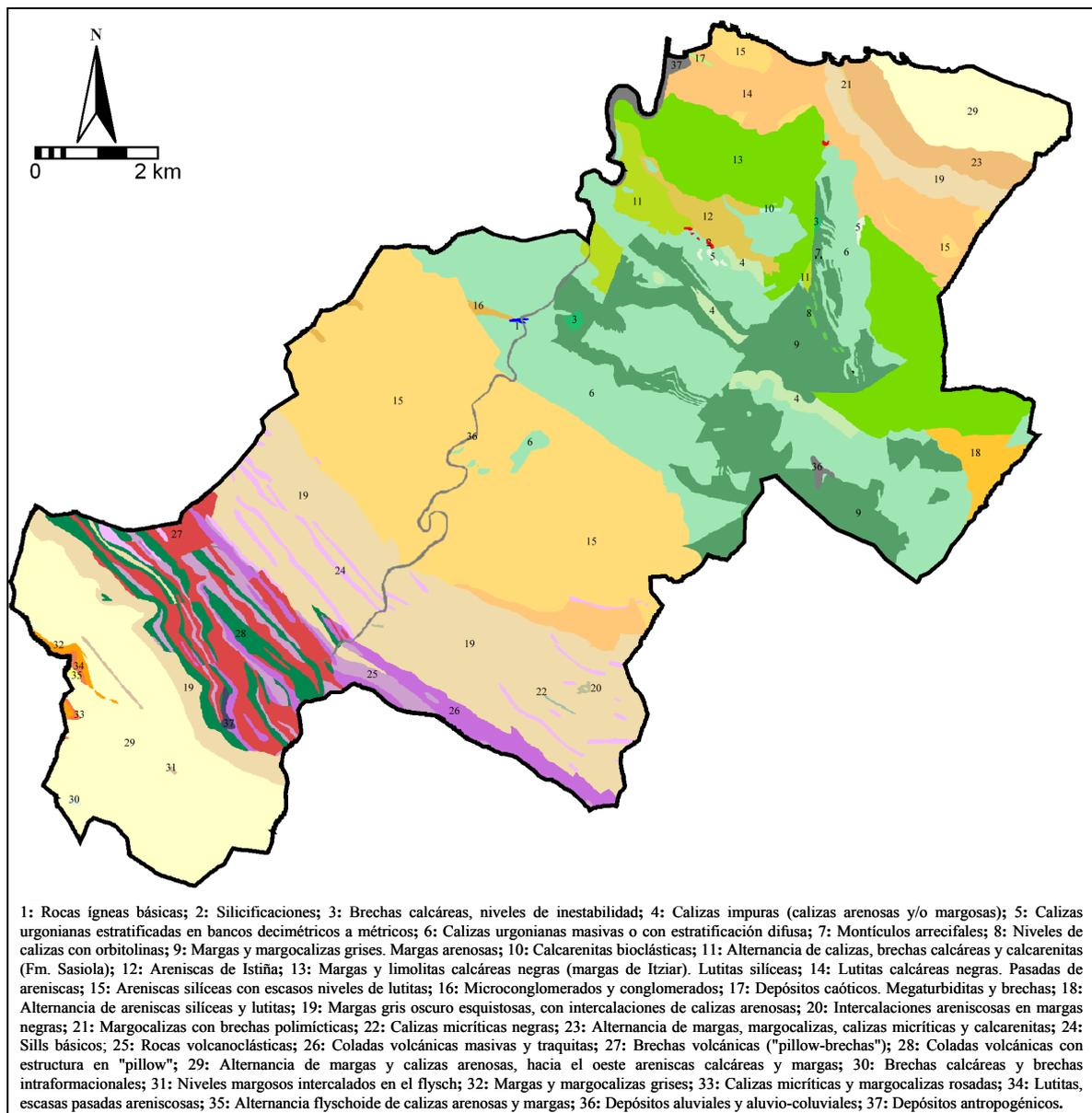


Figura 6.5. Mapa litológico del Bajo Deva (modificado de EVE, 2003).

Los materiales más antiguos corresponden a lo que se denomina *Complejo Urganiano*, formado por materiales principalmente calcáreos que aparecen en los 3 municipios situados más al norte. Por encima de estos depósitos se encuentra el *Complejo Supraurgoniano*, de carácter siliciclástico. En la parte alta de la serie aparece un *Flysch calcáreo*, que se muestra en los municipios de Deva, Eibar y Elgoibar. En los municipios de Eibar y Elgoibar también puede encontrarse un *Complejo Volcánico* formado por coladas, sills y brechas correspondientes al Turoniense-Santoniense. En la zona de Eibar aparecen los materiales más modernos (Terciario), pertenecientes a la formación Flysch, de carácter detrítico y calcáreo.

En el municipio de Deva se encuentran pequeñas alteraciones hidrotermales asociadas a fallas, con escasa representación cartográfica, formando cuerpos de morfologías irregulares. En Mendaro aparecen algunas rocas ígneas básicas de carácter filoniano (diabasas) encajadas en los materiales del Complejo Urganiano.

#### 6.3.2.4 Marco socioeconómico

- *Población y actividad económica*: El área de estudio tiene una población aproximada de 45.000 habitantes, lo que implica una densidad media en la zona de unos 325 hab/km<sup>2</sup>. En la Tabla 6.1, se presentan una serie de datos, por municipios, que muestran las principales características demográficas y económicas de la zona (INE, 2003; EUSTAT, 2003), que sirven de base para los análisis de vulnerabilidad y riesgo.

**Tabla 6.1.** Datos sociales y económicos de los municipios incluidos en la zona de estudio (elaboración propia a partir de datos de INE, 2003; EUSTAT, 2003).

Municipios	Población	Densidad media (habitantes/km <sup>2</sup> )	% Población Rural	% Población activa	Nº empresas	Empleos	Tasa de paro (% 2001)	Nº de edificios (2000)
<b>Deva</b>	5.185	100,99	18	64,9	513	2.670	6,03	707
<b>Eibar</b>	28.219	1.157,65	1,2	62,7	2.352	9.272	8,01	1.386
<b>Elgoibar</b>	10.440	275,55	6,6	63,8	1.006	5.575	5,55	882
<b>Mendaro</b>	1.444	59,53	0,0	64,1	122	823	2,58	219
<b>Total</b>	45.288	325			<b>3.993</b>	<b>18.340</b>		3.194

La población está empleada, principalmente, en la industria y los servicios (EUSTAT, 2003), concentrados en las zonas urbanas. En las zonas rurales, la actividad principal es la ganadería y la agricultura. Los polígonos industriales se sitúan en las márgenes del río Deva o bien ocupando pequeños valles transversales en los diferentes municipios.

Un aspecto que se debe tener en cuenta en relación con los posibles riesgos, es la intensidad media diaria de vehículos que circulan en los distintos tramos de las carreteras. La mayor parte de este tráfico se debe a la actividad industrial y de servicios que se localiza en los polígonos industriales. Por tanto, la interrupción de alguna de las carreteras como consecuencia de deslizamientos repercutirá de forma indirecta en la actividad económica de las diferentes empresas y de la comarca. Dependiendo del punto en que se produzca el deslizamiento, estos daños pueden ser muy importantes e incluso, afectar a zonas externas al área de estudio. Conocer el número de vehículos que circulan por determinadas zonas es importante a la hora de estimar las pérdidas potenciales que se pueden producir si en un

determinado punto queda bloqueada una carretera. Asimismo, es importante conocer las vías de tránsito alternativas en caso de que se produzca un deslizamiento.

La Figura 6.6 muestra unas vistas aéreas de la zona de estudio donde se puede observar la ubicación de los principales núcleos urbanos e industriales.



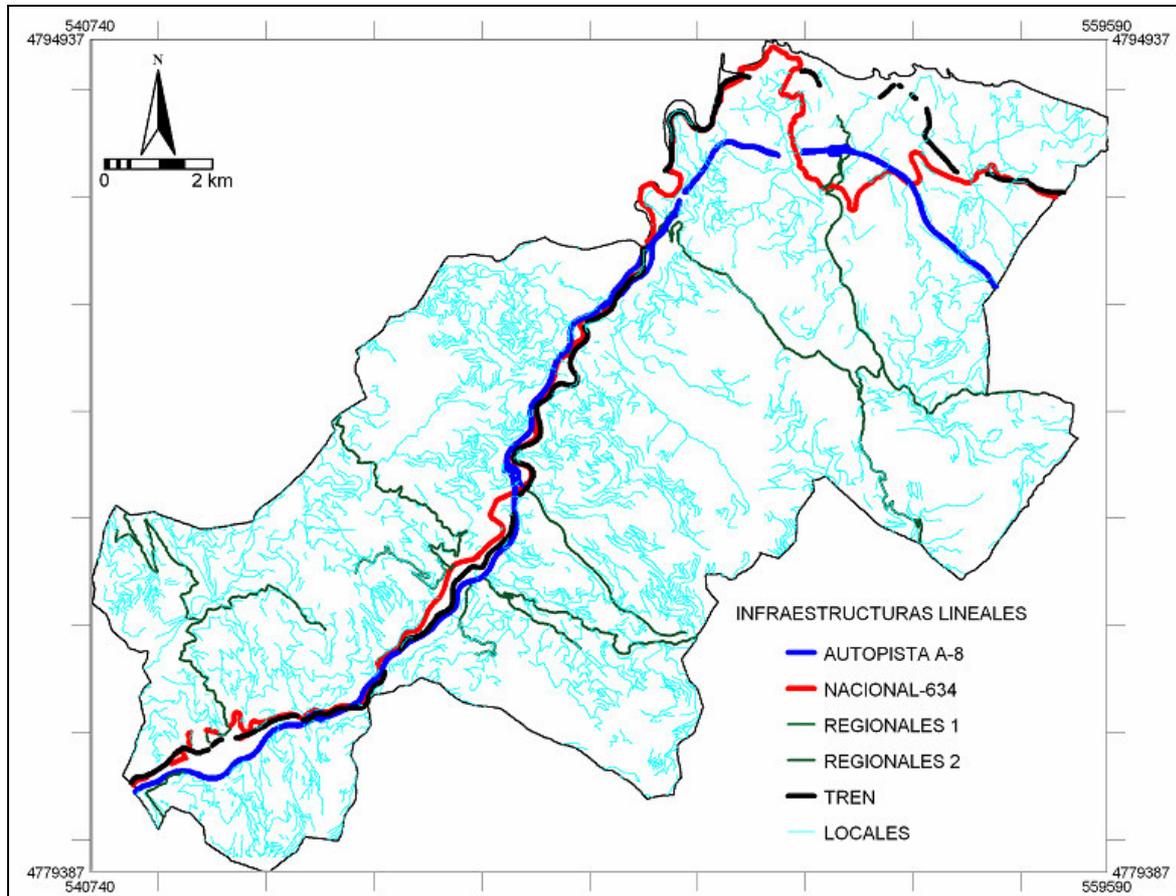
**Figura 6.6.** Fotografías aéreas de los principales núcleos urbanos e industriales de la zona del Bajo Deva (Departamento para la Ordenación y Promoción Territorial, DFG).

- *Infraestructuras lineales*: En el área de estudio existen diferentes tipos de infraestructuras de transporte: autopista, carretera nacional, carreteras regionales, carreteras locales y línea de ferrocarril (Figura 6.7). Estas infraestructuras se distribuyen a lo largo de todo el área de estudio y pueden verse afectadas por deslizamientos. La longitud total de cada tipo de vía de comunicación es:

1. Autopista A-8: 47,9 km. (suma de ambos sentidos).
2. Nacional N-634: 34,5 km.
3. Carreteras Regionales: 62,4 km.
4. Carreteras locales y caminos: 760 km.

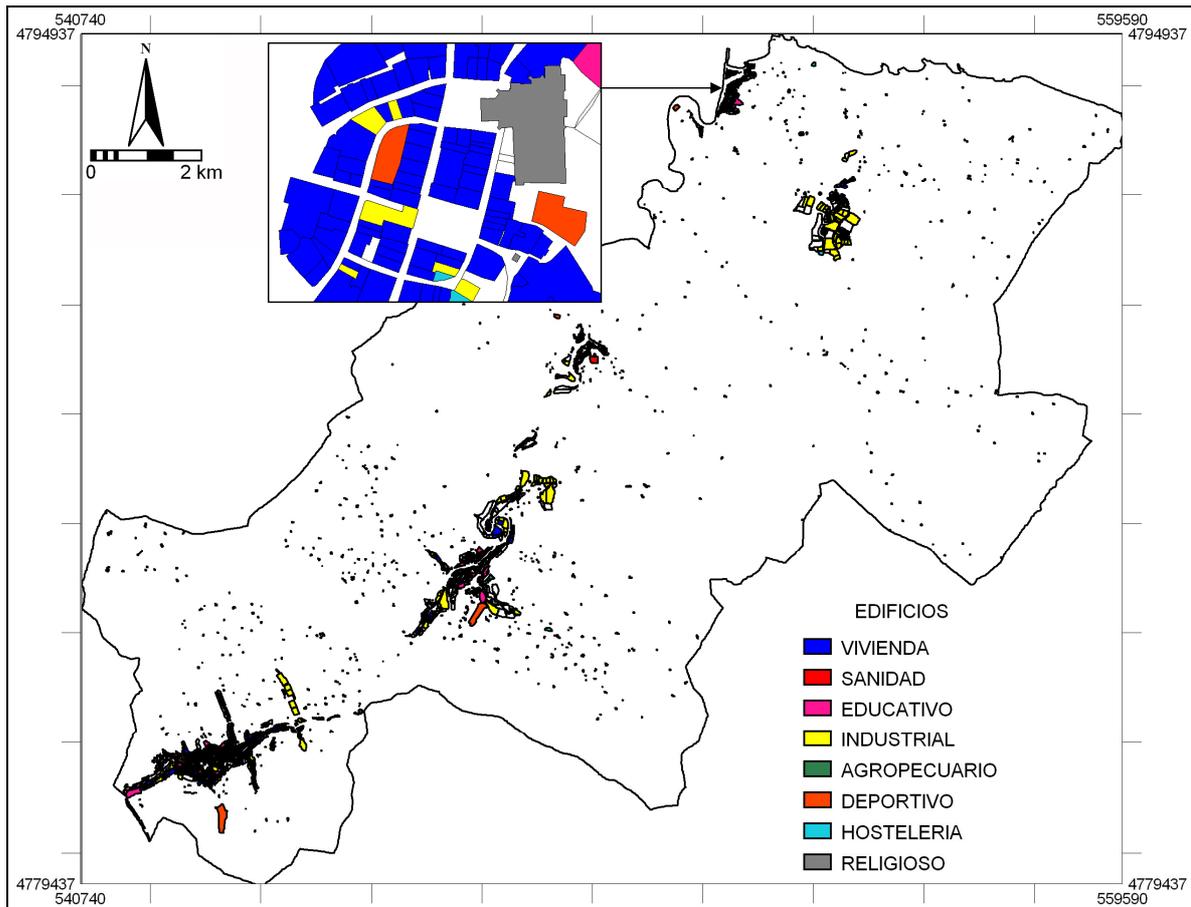
5. Euskotren (línea Bilbao-San Sebastián): 21,8 km. (sin tener en cuenta los tramos que discurren en túnel y que se supone no se ven afectados por deslizamientos).

Existen otros tipos de infraestructuras lineales como pueden ser conducciones de agua, saneamientos, gas, electricidad o teléfono, que no se han tenido en cuenta debido a las dificultades para obtener los datos correspondientes de las empresas y a las complicaciones que presenta su tratamiento en un SIG a la escala de trabajo que se emplea aquí.



**Figura 6.7.** Vías de comunicación existentes en la zona del Bajo Deva (Departamento para las Infraestructuras Viarias, DFG).

- *Edificios:* Existen cerca de 3.000 edificios en la zona dedicados a distintos tipos de usos: vivienda, almacén, industrial, agrícola, etc., según la base de datos del catastro. Las mayores concentraciones de edificios se sitúan, lógicamente, en los núcleos urbanos y en los diferentes polígonos industriales (Figura 6.8).



**Figura 6.8.** Distribución, según el tipo de uso, de los edificios existentes en el área de estudio (Departamento para la Fiscalidad y las Finanzas, DFG). Debido al escaso nivel de detalle se muestra, a modo de ejemplo, una pequeña zona del núcleo urbano de Deva en aumento.

*-Usos del suelo:* Los usos del suelo también tienen importancia para la evaluación de la exposición y la vulnerabilidad, puesto que tanto el valor del terreno como su productividad difieren considerablemente según el uso. Del inventario forestal del País Vasco, realizado en 1996, (Gobierno Vasco-Departamento de Agricultura y Pesca, 1997) se han identificado los siguientes tipos de uso (Figura 6.9):

**Improductivo:** son zonas en las que los factores del medio físico impiden la explotación agroforestal (acantilados, roquedos, etc.), o zonas donde su uso actual imposibilita la utilización agroforestal (carreteras, canteras, zonas urbanas, etc.). Se han diferenciado dentro de este tipo de uso, las siguientes clases: agua, cantera, roquedo y urbano.

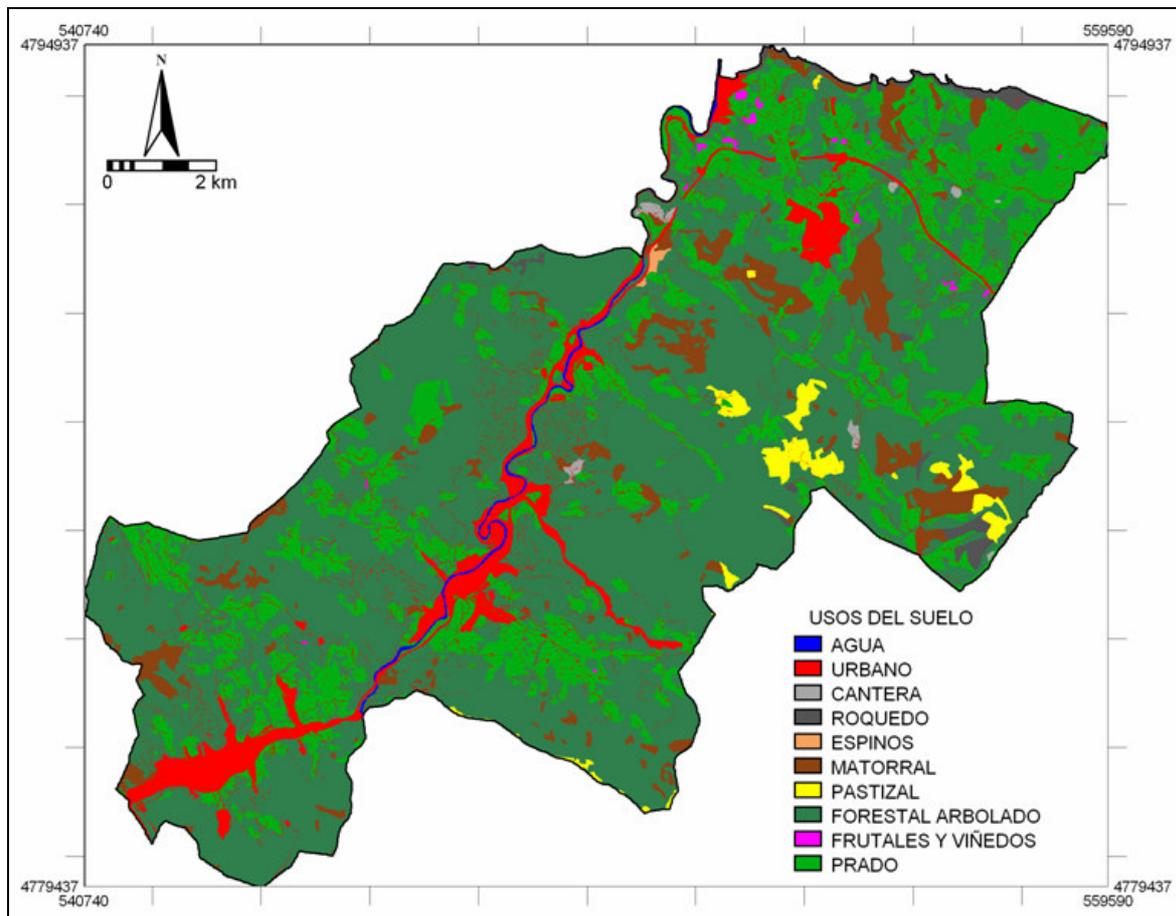
**Prados:** son terrenos con cubierta herbácea, típicos de climas húmedos y que producen varias siegas al año. Se dedican fundamentalmente a la actividad ganadera. Estos, con el paso del tiempo, se van transformando en áreas forestales, principalmente como consecuencia del abandono de la ganadería.

**Pastizales:** son aquellos terrenos de cubierta herbácea, que se dedican a pasto de diente para el ganado.

**Matorral:** se trata de áreas con vegetación arbustiva de pequeño o mediano porte. Comprende enebrales, brezales, argomales, etc.

**Forestal:** son las zonas cubiertas por árboles; si la densidad de la proyección de sus copas sobre la superficie del terreno supera el 50% se trata de arbolado denso, mientras que si es inferior al 20% se considera arbolado ralo. Ocupan la mayor parte del área de estudio y las especies predominantes son: *Betula* (Abedul), *Bosque Atlántico*, *Bosque de Cantil*, *Bosque de Ribera*, *Castanea*, *Chamaecyparis lawsoniana* (Ciprés), *Eucalyptus*, *Fagus sylvatica* (Haya), *Larix* (Alerce), *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Plantaciones de Frondosas*, *Platanus populus*, *Pseudotsuga menziesii* (Abeto), *Quercus faginea*, *Quercus ilex* (Encina), *Quercus robur*, *Quercus rubra*, *Robinia pseudoacacia* (Acacia).

**Cultivos:** son áreas que se trabajan de forma intensa y que se dedican a cereales, horticultura, frutales, etc. Se trata de pequeñas labores para consumo propio, cada vez más reducidas.



**Figura 6.9.** Principales tipos de usos del suelo existentes en la zona del Bajo Deva. Las unidades agua, urbano, cantera y roquedo, se han reunido en la unidad “improductivo” (modificado de Gobierno Vasco-Departamento de Agricultura y Pesca, 1997).

## 6.4 Toma y preparación de datos

En este apartado se describe el proceso de obtención de datos así como los tratamientos aplicados a los mismos para su posterior utilización en los modelos. Dichos datos se refieren a las variables que se resumen en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2.** Variables utilizadas en la generación de modelos.

<i>Variables continuas</i>	Modelo digital de elevaciones ( <b>MDE</b> )
	Modelo digital de orientaciones ( <b>Orientaciones</b> )
	Modelo digital de pendientes ( <b>Pendientes</b> )
	Modelo digital de insolación ( <b>Insolación</b> )
	Modelo de distancia a fallas ( <b>Fallas dist</b> )
	Modelo de distancia a cauces ( <b>Ríos dist</b> )
<i>Variables temáticas</i>	Litología ( <b>Lito</b> )
	Usos del suelo ( <b>Usos</b> )
	Espesor de regolito ( <b>Espesor</b> )

En el caso de las variables independientes utilizadas para la elaboración de modelos de susceptibilidad y de peligrosidad se han utilizado las bases de datos previamente obtenidas con las modificaciones siguientes:

- Las variables litología y espesor de regolito se han incorporado sin modificaciones.
- En el caso de los usos del suelo se han incorporado las infraestructuras y los edificios existentes en la zona de estudio.
- Se ha mejorado el modelo digital de elevaciones (y por tanto, sus derivados), obteniéndolo a partir de un mapa de curvas de nivel generado con un vuelo de 2001, lo que ha permitido mejorar su calidad y precisión.
- Se han incorporado nuevas variables, concretamente, distancia a líneas de fractura y a cauces fluviales.
- También se han introducido mejoras que afectan al tratamiento de las diferentes variables, tal y como se describe más adelante.

Finalmente, en lo que se refiere a los movimientos en masa, se ha completado el inventario de deslizamientos, incorporando los producidos entre 1997 y 2001.

Además, se han obtenido datos de tipo socio-económico y de daños, con el fin de elaborar modelos de vulnerabilidad y de riesgo. Dichos datos incluyen el inventario y cartografía de los elementos expuestos, intensidades de tráfico, pérdidas económicas en infraestructuras y terrenos, etc.

El tratamiento de las variables de tipo espacial se ha llevado a cabo en el entorno de diversos SIG (Ilwis 3.2 y ArcGis 9.0, fundamentalmente), los cuales facilitan en gran medida los análisis, así como la obtención de algunas de las variables geométricas.

Para el tratamiento del conjunto de la información se ha utilizado una resolución espacial de 10 x 10 metros, esto significa que toda la información cartográfica se ha rasterizado, por tanto, a un tamaño de píxel de 10 x 10 metros, lo que representa un total de 2.932.730

píxeles (1.555 líneas x 1.886 columnas) para toda la zona de estudio. Esta resolución proporciona suficiente detalle para reflejar la práctica totalidad de los rasgos considerados (deslizamientos, variables condicionantes, infraestructuras, edificios) y permite el tratamiento del conjunto de la zona. Para zonas concretas (Bonachea et al., 2004; Remondo et al., 2004) se ha utilizado una resolución de 1 x 1 metro, que representa más fielmente a los elementos considerados, pero que aumenta extraordinariamente el volumen de información.

A continuación se describe con detalle los datos utilizados en los diferentes análisis realizados.

#### **6.4.1 Datos relacionados con el análisis de la peligrosidad**

A continuación se detalla la naturaleza y características de los datos relativos a la hipótesis de rotura y a las variables relacionadas con la aparición de deslizamientos.

##### **6.4.1.1 Hipótesis de rotura**

Los deslizamientos no se distribuyen de forma aleatoria por la superficie del terreno, sino que siguen unas pautas o reglas. Esas reglas no se conocen en detalle, pero si se sabe que están relacionadas con una serie de parámetros geométricos, geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, de cobertura vegetal, etc. Determinando la contribución relativa de cada parámetro al proceso de inestabilidad, se puede estimar la mayor o menor susceptibilidad del terreno a deslizarse, suponiendo que el comportamiento futuro sea similar al pasado.

Diversos autores (Palmquist & Bible, 1980; Varnes, 1984; Crozier, 1986; Hutchinson, 1988) diferencian entre factores condicionantes, aquellos que reflejan las características del terreno e influyen en que unos deslizamientos aparezcan en unas zonas u otras, y factores desencadenantes, aquellos que causan directamente la ocurrencia de deslizamientos, como la precipitación, actividad sísmica, determinadas actividades humanas, etc.

Los deslizamientos superficiales acontecen a partir de una determinada inclinación de las laderas, aunque en pendientes muy fuertes tiene lugar la aparición de otros tipos de movimientos, como la caída de rocas (Dikau et al., 1996a). Las laderas que sufren mayor insolación, son, en general, más estables que aquellas más húmedas. Normalmente, las zonas de prados son más propensas a sufrir deslizamientos que las zonas de bosque, debido al efecto estabilizador que producen las raíces de los árboles (Greenway, 1987). Las formaciones superficiales son sensibles a los cambios en la cohesión del material y en la presión de poros. La litología también es un factor importante ya que condiciona la cohesión del material.

En el caso concreto de la zona de estudio, la mayor parte de los deslizamientos existentes se caracterizan por ser deslizamientos traslacionales superficiales (*shallow debris slides*) que afectan a la capa superficial del terreno, cuyo espesor es en general de 0,5-2 metros. Las superficies de ruptura se producen en general en el contacto entre regolito y roca, y suelen ser paralelas a la superficie del terreno. Estos deslizamientos, a menudo, se transforman en flujos cuando el espesor de regolito es pequeño o cuando la superficie favorece la concentración de agua en determinadas zonas (Remondo et al., 2003a).

Muchas veces son difíciles de identificar debido a su pequeño tamaño y a la intensa cobertura vegetal que enmascara su morfología. Los movimientos se desencadenan normalmente durante o después de intensas precipitaciones, siendo éstas el principal factor desencadenante, ya que disminuyen la resistencia de la ladera y aumentan la presión de poros y el peso del material más superficial. La velocidad de desplazamiento (Varnes, 1978) es rápida a muy rápida, de metros por minuto.

El tipo de deslizamientos citados representan aproximadamente el 75% de los deslizamientos existentes en la zona, por lo que el deslizamiento tipo considerado para la elaboración de modelos es: deslizamiento superficial, afectando al regolito y con superficie de ruptura en el contacto entre regolito y sustrato.

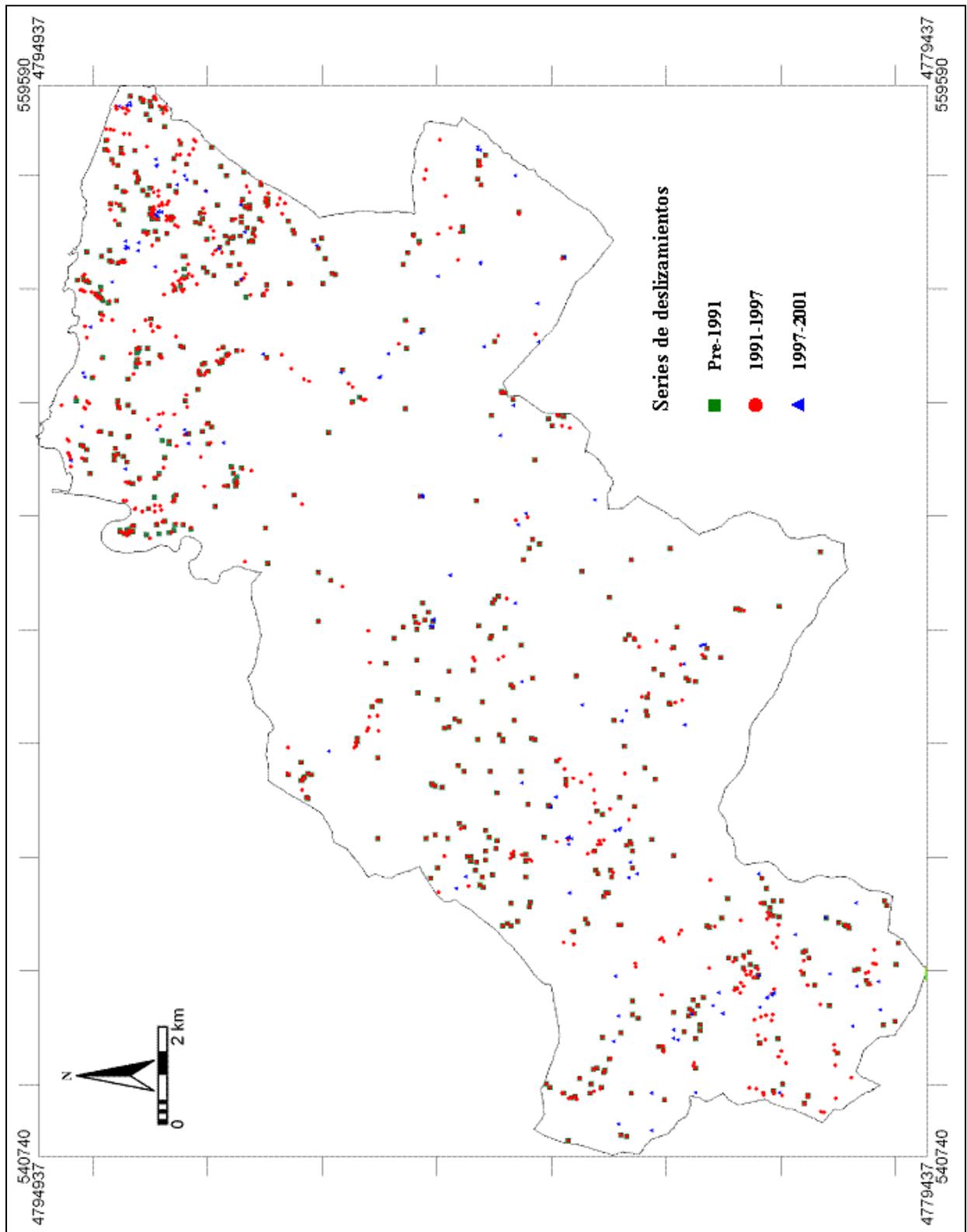
#### 6.4.1.2 Series de deslizamientos

Se han inventariado los movimientos en masa ocurridos en los 4 municipios estudiados durante el periodo 1954-2001 (Figura 6.10). El inventario, constituido en su mayor parte por deslizamientos superficiales y flujos que afectan al regolito, “*shallow debris slides*”, refleja tanto la distribución espacial como la temporal. Dicho inventario se ha basado en la interpretación de fotografías aéreas (1954-1997) y reconocimientos de campo así como en la interpretación de la ortofoto de 2001 y campañas de campo posteriores a esa fecha. Tanto las fotos aéreas como la ortofoto han sido facilitadas por la Diputación Foral de Guipúzcoa (DFG). El espesor de los depósitos se ha determinado en el campo, y a partir de él se han estimado los volúmenes. El tamaño medio de los movimientos es de unos 500 m<sup>2</sup>; siendo los más pequeños de unos pocos metros cuadrados, mientras que los mayores raramente superan los 2.500 m<sup>2</sup>. El volumen medio es de unos 250 m<sup>3</sup>. El tamaño medio de la zona de ruptura es de 160 m<sup>2</sup>, con una distancia recorrida de unos 30 metros, mientras que la anchura máxima media que alcanza la masa es de unos 25 metros. Las dimensiones promedio de los deslizamientos, como era de esperar, no varían con la incorporación de los nuevos movimientos inventariados y son similares a las descritas previamente.

En la base de datos correspondiente, y teniendo en cuenta las dimensiones de la zona de rotura, se ha representado cada deslizamiento por un píxel, que corresponde al centro de dicha zona.

El inventario constituye la información fundamental para el análisis espacial y temporal, así como para la posterior validación de los resultados obtenidos, tanto con los modelos probabilísticos de susceptibilidad como con los de peligrosidad.

El inventario de deslizamientos obtenido cubre los periodos: pre-1955; 1955-1971; 1971-1983; 1983-1985; 1985-1991; 1991-1993; 1993-1997; 1997-2001, en el municipio de Deva, que representa el 37% del área de estudio. En el resto de la zona, la cobertura temporal es menos completa, cubriendo los periodos pre-1991, 1991-1997 y 1997-2001. En cualquier caso, dado que para periodos iguales la relación entre los deslizamientos de Deva y los del resto de la zona se mantiene constante, se ha supuesto que la variación temporal es similar en todo el área de trabajo.



**Figure 6.10.** Inventario de deslizamientos, para el Bajo Deva, ocurridos en diferentes periodos: pre-1991, 1991-1997 y 1997-2001.



De acuerdo con la hipótesis de rotura planteada anteriormente y teniendo en cuenta ese conjunto de factores, se han seleccionado las variables que se considera pueden condicionar en mayor medida la aparición del tipo de deslizamientos descritos. Dichas variables, junto a los deslizamientos inventariados, son la base a partir de la cual se generan diversos modelos de susceptibilidad. Todas las variables (variables condicionantes) utilizadas en el estudio de la inestabilidad pueden clasificarse, desde un punto de vista de tratamiento, en los siguientes dos tipos:

- Variables temáticas o categóricas: son aquellas que muestran una distribución en clases o unidades de carácter cualitativo, como es el caso de la litología.
- Variables continuas: son aquellas que pueden tomar los infinitos valores de un intervalo, como es el modelo digital de elevaciones o modelos del terreno.

Todas estas variables quedan definidas y descritas en el anexo II, donde también se incluyen los metadatos de cada una de ellas.

#### 6.4.1.3.1 Variables continuas

- **Modelo digital de elevaciones (MDE):** este modelo se ha obtenido a partir de la base topográfica, a escala 1/5000, del Departamento de Ordenación y Promoción Territorial de la DFG, realizada con fecha de Diciembre de 2004 con una equidistancia 5 metros. Las alturas en la zona de estudio oscilan entre 0 y 895 metros. Este modelo es la base para la obtención de las siguientes variables:
- **Modelo digital de orientaciones (Orientaciones):** ha sido obtenido a partir del anterior. Se representa en valores de grado, de 0 a 360°.
- **Modelo digital de pendientes (Pendientes):** Se ha obtenido a partir del modelo digital de elevaciones. Las pendientes en el área de estudio oscilan entre 0° y 81°, siendo la pendiente media de aproximadamente 24°. Se representa en valores de grado, de 0 a 81° de pendiente.
- **Modelo digital de insolación (Insolación):** el modelo final representa la insolación media anual resultante de calcular la insolación media mensual medida el día 21 de cada mes (del año 2000), por ser esa fecha la coincidente con los equinoccios y solsticios con valores que van de 0 (mínima insolación, color negro) a 255 (máxima insolación, color blanco), con un total de 255 clases.
- **Modelo de distancia a fallas (Fallas\_dist):** a partir del mapa geológico del Ente Vasco de la Energía (EVE, 2003), se extrajeron las principales líneas de fractura (falla normal, inversa y contacto mecánico) y se ha creado un modelo de distancias desde cada segmento de la falla hacia el exterior, con precisión de 1 metro.
- **Modelo de distancia a cauces (Ríos\_dist):** corresponde a un modelo de distancias (igual que en el caso anterior) para la red hidrográfica obtenida a través del Departamento de Ordenación y Promoción Territorial de la DFG.

#### 6.4.1.3.2 Variables categóricas

Las variables temáticas utilizadas se relacionan a continuación. Los números representan el código numérico utilizado para el tratamiento estadístico de las mismas y no tiene, en sí mismo, significado ordinal. Se señala que, por las características del software utilizado, los códigos 0, 1 y 2 no se utilizan.

- **Litología (Lito):** la información de este mapa procede del mapa geológico del País Vasco editado por el Ente Vasco de la Energía y del Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa (**Diputación Foral de Guipúzcoa, 1986**), a escala 1/25000. El valor numérico asignado a cada unidad de litología es la siguiente:

- 3: Flysch detrítico calcáreo
- 4: Flysch lutítico
- 5: Calizas estratificadas
- 6: Margocalizas
- 7: Margas
- 8: Areniscas y conglomerados
- 9: Flysch arenoso
- 10: Calizas masivas
- 11: Lutitas calcáreas y margocalizas
- 12: Calizas margosas
- 13: Calcarenitas, margas y brechas calcáreas
- 14: Flysch calcáreo
- 15: Rocas volcanoclásticas
- 16: Rocas volcánicas en coladas
- 17: Brechas poligénicas
- 18: Brechas silíceas
- 19: Gravas bien gradadas
- 20: Gravas mal gradadas
- 21: Gravas arcillosas
- 22: Arenas bien gradadas
- 23: Arenas mal gradadas
- 24: Arenas limosas
- 25: Arenas arcillosas
- 26: Limos y arenas muy finas
- 27: Arcillas plásticas
- 28: Rellenos artificiales

- **Usos del suelo (Usos):** este mapa se ha obtenido por reclasificación de las unidades del Inventario Forestal del País Vasco de 1996 (Departamento de Industria, Agricultura y Pesca, 1997). La clase “urbano” se ha completado, incorporando ciertos elementos, como carreteras y edificios, no debidamente reflejados en el mapa anterior. El valor numérico asignado a cada unidad de uso del suelo es la siguiente:

- 3: Agua
- 4: Cantera
- 5: Espinos
- 6: Forestal Arbolado
- 7: Frutales y Viñedos
- 8: Matorral
- 9: Pastizal
- 10: Prado
- 11: Roquedo
- 12: Urbano

- **Espesor de regolito (Espesor):** el mapa de espesores se ha elaborado a partir de la interpretación de fotos aéreas, con información proporcionada por el mapa de formaciones superficiales elaborado, a menor detalle, para el Estudio Geomorfológico de Guipúzcoa (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1986) y posteriormente perfeccionado con observaciones sistemáticas sobre el terreno. Las unidades representadas expresan el espesor más frecuente de la formación superficial existente en el área de cada unidad. El valor numérico asignado a cada unidad de espesor de regolito es la siguiente:

- 3: Roca
- 4: 0-0,5 metros
- 5: 0,5-1 metros
- 6: 1-2 metros
- 7: 2-4 metros
- 8: >4 metros

Distintos análisis previos (Remondo, 2001; Remondo et al., 2003a, b) han puesto de manifiesto que otras variables potencialmente significativas (Tabla 6.3), contribuyen muy poco a la calidad de los modelos de susceptibilidad para esta zona de estudio, por lo que se ha decidido no tenerlas en cuenta. Por el contrario, se ha considerado que otras variables no incorporadas a dichos análisis podrían contribuir a mejorar los modelos. Es el caso de las distancia a fallas y a cursos de agua, incluidas en las variables continuas. En el caso de las fallas se entiende que, si éstas son activas, pueden contribuir a la aparición de deslizamientos (González-Díez, 1995; Lee et al., 2002), sobre todo en sus proximidades. En el caso de la proximidad a los cauces, debido a la actividad erosiva que ejercen éstos en sus márgenes y dado que los valles son muy estrechos y de fuertes pendientes, se considera que pueden influir en la aparición de deslizamientos por socavamiento basal (Remondo, 2001).

#### 6.4.2 Datos relacionados con el análisis de los elementos expuestos

La expresión del riesgo implica incorporar el valor de los distintos elementos potencialmente afectados por los deslizamientos. Por ello, es preciso realizar un inventario de los elementos expuestos o afectables, así como estimar su valor en términos monetarios y recabar datos sobre los daños experimentados en el pasado, como base para hacer estimaciones de lo que puede suceder en el futuro (estimación de la vulnerabilidad). Los distintos tipos de elementos vulnerables que se han considerado en el análisis son: las infraestructuras lineales (carreteras y ferrocarril), edificios, terrenos y actividades económicas, todos los cuales han experimentado daños en el pasado. Otros elementos, como conducciones de agua, gas, saneamientos, redes de telecomunicaciones, etc., probablemente también han sufrido daños en el pasado, pero no se han tenido en cuenta debido a la falta de datos y a la dificultad de representar tales elementos a la escala de trabajo. La población como tal tampoco se ha considerado, dado que no se conoce ningún caso de daños a personas en la zona. Es posible que haya personas afectadas por deslizamientos en el futuro, sobre todo si éstos son de mayores dimensiones, pero la probabilidad es muy baja.

La información de tipo cartográfico sobre los elementos citados se obtuvo de diferentes organismos (ayuntamientos, Departamentos de Transportes y de Hacienda de la Diputación Foral de Guipúzcoa, organismos de estadística, etc.). Los datos sobre valor de los elementos y daños pasados se obtuvieron de empresas constructoras, Departamentos de Transportes,

de Hacienda y de Desarrollo del Medio Rural de la Diputación Foral de Guipúzcoa, estadísticas y hemerotecas de diferentes organismos.

#### 6.4.2.1 Infraestructuras

Las vías de comunicación son seguramente el elemento más afectado por los deslizamientos (Figura 6.11).

La cartografía de carreteras y ferrocarril se obtuvo a través del Departamento para la Ordenación y Promoción Territorial de la Diputación Foral de Guipúzcoa; en su página web (<http://b5m.gipuzkoa.net/>), se puede descargar dicha información en formato *dxp*.

Se ha creado una base de datos de estas infraestructuras, caracterizadas por una serie de atributos, los cuales permitirán asignar a cada sector o segmento de vía su valor por metro, pérdidas, etc. (Tabla 6.4). Los atributos utilizados son los siguientes:

*Nombre de la infraestructura:* se ha mantenido la nomenclatura asignada por la DFG o el Gobierno central.

*Clase de vía:* Las diferentes vías han sido clasificadas en función de su categoría y su competencia (local, provincial, autonómica o nacional).

*Longitud:* representa la longitud de cada segmento en metros. Los segmentos se definen por dos nodos, inicial y final, que a veces coinciden con intersecciones.

*Nº de vehículos:* esta información ha sido elaborada por el Departamento de Transportes y Carreteras de la DFG para el año 2002 y se ha incorporado a la base de datos. A partir de distintas estaciones de aforo situadas en las principales vías, a cada tramo se le asigna la Intensidad Media Diaria de vehículos. Los valores obtenidos oscilan entre 21.698 y 50 vehículos/día. A las carreteras locales, para las cuales se carece de información, se les ha asignado, de manera conservadora, un valor de 25 vehículos diarios. A los tramos de otras carreteras para los que se carece de datos se les han asignado unos valores medios con respecto a los de los tramos próximos. En el caso del tren, sólo se han conseguido datos relativos al número de viajeros anuales entre las estaciones de Eibar y San Sebastián, los cuales durante el año 2001 fueron de 3.780.000 viajeros. Este tipo de datos constituye la base para el análisis de las pérdidas indirectas potenciales, que se explica más adelante.

**Tabla 6.4.** Tabla asociada al mapa de infraestructuras. Nombre, clase y clasificación de las infraestructuras; longitud total de cada clase e intensidad media diaria de vehículos.

Nombre	Clase	Clasificación	Longitud total (km.)	Nº vehículos/día
Carretera local	Local	Red Gris	762,67	25
Carretera GI-,...	Provincial	Red Naranja, Red Verde, Red Amarilla	62,4	12.563;...; 50
Autopista Nacional N-634 A-8,	Estatad, provincial	Red Roja	86,3	21.698;...; 2.975
Euskotren	Autonómica	Red Ferroviaria Regional	21,8	?



**Figura 6.11.** Detalles del deslizamiento que afectó a la autopista A-8 el 20 de diciembre de 2005, en el punto kilométrico 51,5 (sentido Bilbao). Dos coches y un camión fueron afectados directamente (arriba); labores de restauración (abajo). El carril sentido Bilbao quedó cortado durante día y medio.

### 6.4.2.2 Edificios

Los edificios son otro tipo de elementos afectados en ocasiones por deslizamientos (Figura 6.12). La cartografía de edificios se ha obtenido a partir de dos fuentes: por un lado, del Departamento para la Ordenación y Promoción Territorial de la DFG, en formato *.dxf*; por otro lado, a través de la página web del Departamento para la Fiscalidad y las Finanzas de la DFG (<http://www.gipuzkoa.net/udalherri/kartografia/kartografia.html>), en formato *.dwg*.



**Figura 6.12.** Escollera protegiendo un edificio afectado por un deslizamiento en el municipio de Mendaro.

A partir de la información del catastro, a cada edificio se le ha asignado su valor catastral en la base de datos, el cual sirve de referencia para establecer su valor de mercado. La base de datos asociada a esta cartografía consta de los siguientes atributos (Tabla 6.5):

*Número de Finca; Código municipio; Referencia catastral; Local; Planta; Destino; Superficie en m<sup>2</sup>; Valor catastral del local (€); Valor suelo del local (€); Valor construcción del local (€); Fecha de Alta.*

**Tabla 6.5.** Tabla asociada al mapa de edificios en la que se muestran los datos obtenidos para varios ejemplos (Departamento para la Fiscalidad y las Finanzas, DFG).

Nº de Finca	Código Munic.	Referencia catastral	Destino	Superficie (m <sup>2</sup> )	Valor catastral (€)	Valor suelo (€)	Valor construcción (€)	Fecha de Alta
16920	029	02DI035	Hostelería	43.800	142.422,15	59.995,53	82.426,62	1965-01
20673	030	E761002	Industrial	10.000	22.245,80	15.205,69	7.040,11	1960-01
10958	032	3639008	Agropecuario	7.000	18.987,08	12.873,71	6.113,37	1975-01
16284	082	0201001	Vivienda	10.322	73.705,50	19.050,55	54.654,95	1993-01

### 6.4.2.3 Terrenos o usos del suelo

Los daños en los terrenos como consecuencia de deslizamientos o de otros procesos erosivos implican una pérdida de la capacidad productiva de los suelos, así como una dificultad adicional para el laboreo del terreno, en muchos casos de carácter irreversible (Figura 6.13). Los atributos relacionados con el tipo de terrenos son los contemplados en el mapa de usos del suelo, anteriormente descrito (Figura 6.9), completándose la unidad “improductivo” del citado mapa con la inclusión en ella de las áreas ocupadas por las carreteras y edificios. La extensión de los distintos tipos de terrenos se muestra en la Tabla 6.6.



**Figura 6.13.** Ejemplo de deslizamientos afectando a distintas clases de usos del suelo, una zona reforestada y una zona de prados respectivamente, en el municipio de Deva.

**Tabla 6.6.** Área ocupada por los distintos tipos de usos del suelo en la zona de estudio.

Tipo de uso	Área (Km <sup>2</sup> )
Agua	0,586
Cantera	0,337
Espinos	0,112
Forestal Arbolado	84,878
Frutales y Viñedos	0,229
Matorral	8,137
Pastizal	1,945
Prado	31,915
Roquedo	1,277
Urbano	9,913
<b>Total</b>	<b>139,329</b>

### 6.4.3 Datos relacionados con el análisis del valor y daños en los elementos expuestos

La relación entre pérdidas medias por elemento afectado por deslizamientos y valor medio de los mismos sirve de base para evaluar la vulnerabilidad de cada elemento. La estimación de estos valores es compleja, pues conlleva trabajo de campo y búsquedas en fuentes diversas (hemerotecas, empresas constructoras, ayuntamientos, departamentos de transportes y de hacienda, compañías aseguradoras, etc.) y entrevistas con los propios habitantes de la zona. La estimación del valor para los distintos elementos se ha obtenido de la siguiente forma:

- a) El valor de las infraestructuras se ha calculado a partir de la información facilitada por distintas compañías constructoras, las cuales han proporcionado precios medios de construcción por metro para cada tipo de infraestructura.
- b) En el caso de los edificios el valor se ha estimado a partir del valor catastral. Los valores catastrales se han comparado, a través de un muestreo, con valores de mercado obtenidos de la prensa local, de empresas de tasación o de consultas con expertos y habitantes de la zona. Los valores así obtenidos son en general entre 5 y 7 veces superiores a los valores catastrales. En el tratamiento realizado, se ha hecho una estimación conservadora, considerando que el valor de mercado es el triple del valor catastral.

- c) A los distintos usos del suelo se les ha asignado un valor promedio obtenido a partir de la Encuesta de precios de la Tierra de 2002, que publica anualmente el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en colaboración con las Comunidades Autónomas. Este trabajo, realizado para toda España, recoge una recopilación de los precios de mercado de las zonas agrícolas. El valor asignado a cada unidad se expresa en €/m<sup>2</sup>.

La recopilación de datos sobre daños presenta muchas más dificultades y los resultados logrados han sido mucho menos satisfactorios. La información correspondiente está muy dispersa entre los distintos organismos, no está sistematizada y con frecuencia es de difícil acceso. En el caso de daños de poca entidad, dicha información simplemente no existe. A pesar de todo, se ha logrado recopilar datos sobre daños producidos o costos de reparación (desescombros, re-asfaltado de vías, construcción de escolleras, reparación de edificios, etc.) correspondientes a diferentes eventos, a veces en forma de información semi-cuantitativa obtenida a través de entrevistas personales. Con dicha información se han definido una serie de “escenarios de pérdidas específicas” que establecen, de manera conservadora, las pérdidas esperables para distintos tipos de elementos y para movimientos de una magnitud dada. En el caso de los usos del suelo, los datos sobre pérdidas han sido facilitados por la Oficina Agraria Comarcal de Elgoibar, la cual, en determinados periodos, y como consecuencia de los daños producidos por los deslizamientos, pagó indemnizaciones que contemplaban tanto la pérdida de suelo como la pérdida de productividad de determinados aprovechamientos.

#### **6.4.3.1 Datos relacionados con el análisis de pérdidas en la actividad económica**

En el caso de las actividades económicas no existen datos que hagan referencia a pérdidas debidas a deslizamientos, ya que dependen de muchos factores y, que sepamos, nunca han sido evaluadas en la zona (y raramente en cualquier otro lugar). A pesar de la escasez de datos y de las incertidumbres existentes, se ha desarrollado y aplicado un procedimiento que permite hacer una estimación de pérdidas indirectas mínimas.

Cuando un deslizamiento o cualquier otro proceso natural afecta a las estructuras humanas (por ejemplo, infraestructuras o edificios) se produce un efecto indirecto sobre las actividades socioeconómicas del entorno, el cual puede dejarse sentir a grandes distancias del lugar en el que ha ocurrido el proceso. La mayor parte de ese efecto se debe a interrupciones en las actividades económicas que se reflejan en pérdidas de horas de trabajo o de producción, pérdidas de mercado, incremento de costes, etc.

La zona de estudio se caracteriza por tener una intensa actividad industrial, constituyendo un importante núcleo de actividad económica situado entre las ciudades de Bilbao, San Sebastián y Vitoria. Por tanto, son las afecciones sobre las infraestructuras lineales de transporte las que podrían dar lugar a mayores efectos indirectos sobre las actividades económicas en el caso de que el tráfico de vehículos se bloquease en determinados momentos (los daños en edificios o naves industriales son mínimos, debido al pequeño tamaño de la mayoría de los deslizamientos, por lo que no se han considerado).

Los datos utilizados como base para calcular las pérdidas indirectas esperables son los relativos al tráfico de vehículos y de personas a lo largo de los diferentes tramos de las vías

de comunicación. Aplicando una serie de suposiciones que se describen más adelante, se ha hecho una estimación de las citadas pérdidas.

#### **6.4.3.2 Datos relacionados con el análisis de pérdidas en la población**

A pesar de que se han inventariado unos 3.000 deslizamientos en la zona de estudio desde 1954, no hay constancia de daños a personas como consecuencia de los mismos (el deslizamiento ocurrido en diciembre de 2005 en la autopista, de mayores dimensiones que los estudiados aquí, produjo daños a 3 vehículos sin ocasionar daños personales). Esto se explica, sin duda, por el reducido tamaño de la mayoría de los movimientos. Por tanto, en este trabajo no se estimará el riesgo por deslizamientos sobre las personas.

No obstante, es posible abordar la valoración de este tipo de daños, aplicando baremos similares a los utilizados por las compañías de seguros.

#### **6.4.4 Representación gráfica de los elementos**

El tratamiento conjunto de variables continuas y categóricas y de elementos expuestos requiere su previa rasterización y su representación mediante píxeles de 10 x 10 metros. La rasterización de ciertas variables y elementos presenta algunos problemas, que a continuación se describen.

- a) Los deslizamientos se han cartografiado inicialmente en formato de punto, que representa el centro de la zona de ruptura. En todos los casos se han representado, independientemente de su tamaño, mediante un píxel, es decir, ocupando un área de 100 m<sup>2</sup>. De esta forma quedan representados todos los movimientos, tanto los menores de 100 m<sup>2</sup>, como los que muestran dimensiones superiores a ese tamaño. Esto, a su vez, implica otro problema que es la infravaloración y sobreestimación de los deslizamientos con dimensiones mucho mayores o menores que las citadas (que no son demasiados). Puesto que el área promedio deslizada es de unos 160 m<sup>2</sup>, y la desviación sobre este valor es muy pequeña, se ha considerado conveniente la utilización de este tamaño de píxel.
- b) Otro problema se plantea con el mapa de infraestructuras, inicialmente representadas por polígonos, que al ser rasterizados al tamaño de píxel de 10 x 10 metros da lugar a que muchas de las infraestructuras de carácter lineal no muestren continuidad. Esto es debido a que al tener muchas de ellas una anchura inferior a 10 metros, el sistema de rasterización no las considera. Para evitar este problema, se ha decidido utilizar un mapa de segmentos que incluye las líneas centrales de las diferentes infraestructuras, y rasterizarlo a un tamaño de píxel de 10 x 10, lográndose así que todos los elementos estén incluidos al ser rasterizados y evitándose la pérdida de información. Esta solución considera que todas las infraestructuras tienen la misma dimensión, lo que implica un sobredimensionamiento de las vías de comunicación de menor anchura (por ejemplo, el ferrocarril de vía estrecha o Euskotren) y una cierta infravaloración de las grandes estructuras como la autopista (para la cual se considera una anchura de dos píxeles, uno para cada sentido); sin embargo, esta solución se plantea como la más adecuada para llevar a cabo el análisis posterior.

- c) Con la rasterización de los edificios sucede algo similar. Los polígonos con superficies inferiores a 100 m<sup>2</sup>, no aparecen representados. En este caso, y dado que son muy pocos los elementos de esas dimensiones, se ha prescindido de ellos en el análisis.

Las demás variables no presentan problemas para la rasterización, al tratarse de capas continuas de información.

Estos problemas se verían parcialmente solucionados si se utilizase un píxel de 1 x 1 metro, pero ese tamaño no es aplicable al conjunto de la zona, dado el gran aumento que representaría el volumen de datos a tratar, lo que haría el proceso enormemente lento. Aún así, este tipo de tratamiento detallado se ha aplicado a una zona reducida (Bonachea et al., 2004, Remondo et al., 2004).

## **6.5 Análisis de los datos**

En este apartado se describe el método para la obtención de modelos de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, así como de los procedimientos aplicados para evaluar los mismos.

### **6.5.1 Estimación de la susceptibilidad y de la peligrosidad**

El proceso seguido para la estimación y modelización de la susceptibilidad y peligrosidad se representa en el esquema metodológico de la Figura 6.14. El desarrollo de este esquema requiere, en primer lugar, la confección del modelo de susceptibilidad (o de probabilidad espacial) para un determinado tipo de deslizamiento (de acuerdo con la hipótesis de rotura formulada), mediante la utilización de herramientas estadísticas que permiten correlacionar los deslizamientos ocurridos con los factores que se considera determinan su aparición. Posteriormente, a partir del análisis de la distribución de frecuencias de los deslizamientos producidos en el periodo considerado (1954 a 2001) se formulan escenarios de frecuencia futura, los cuales permiten transformar los modelos de susceptibilidad en modelos de probabilidad espacio-temporal, en los que para cada píxel se representa la probabilidad de ocurrencia de nuevos deslizamientos en un periodo dado.

Para obtener modelos de peligrosidad hay que tener en cuenta, además, la magnitud. Dada la complejidad para elaborar modelos de amenaza a partir de modelos de probabilidad espacio-temporal, se ha seguido un proceso más simplificado, de manera que en el análisis de susceptibilidad se ha considerado la magnitud media de los deslizamientos. Para ello se han formulado escenarios de magnitud basados en el comportamiento de los deslizamientos en el pasado. De esta forma, los modelos de susceptibilidad expresan la propensión del terreno a sufrir un determinado tipo de deslizamiento de una determinada magnitud y, por consiguiente, el modelo de probabilidad espacio-temporal es equivalente a un modelo de amenaza o peligrosidad.

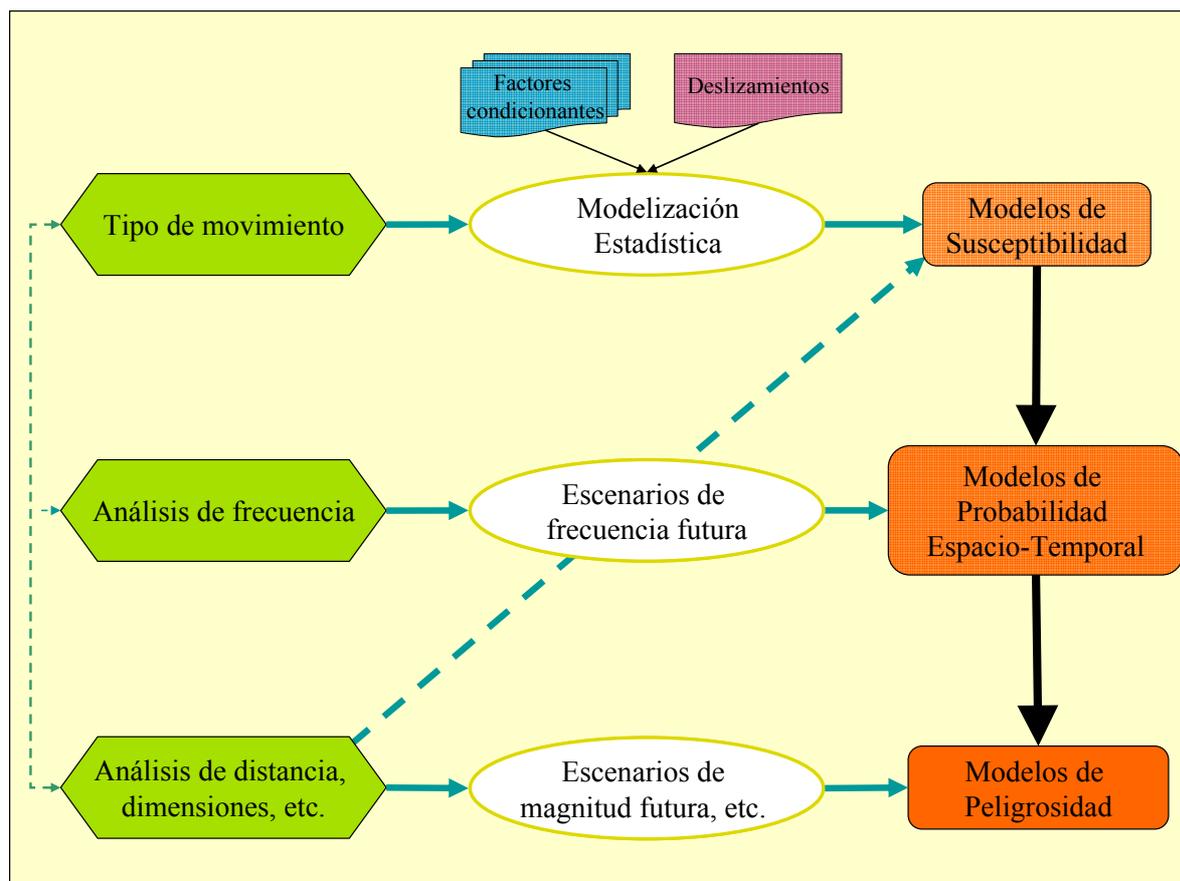
#### **6.5.1.1 Elaboración de los modelos de susceptibilidad**

Un modelo o un mapa de susceptibilidad expresa la “propensión a” experimentar un determinado proceso (en este caso, deslizamientos) de los distintos puntos del territorio. Dichos modelos de susceptibilidad pueden elaborarse mediante el uso de Funciones de Favorabilidad (FF), cuya aplicación requiere que se cumplan las siguientes suposiciones (Chung & Fabbri, 1993; 1999; 2003a):

- a) Todos los factores condicionantes del proceso son bien conocidos y han sido incluidos en el análisis.
- b) Todos los deslizamientos ocurridos en el pasado han sido identificados e incluidos en el análisis (o bien una muestra aleatoria y representativa del conjunto).
- c) Los deslizamientos futuros ocurrirán bajo condiciones similares a las que han producido los movimientos en el pasado (principio de uniformismo revisado aplicado a los procesos).
- d) Además, el tratamiento matemático requiere que se cumplan una serie de suposiciones, como por ejemplo la independencia de las variables.

Dichas suposiciones en las que se basan los modelos no son del todo cierto, lo que redundará en una peor capacidad de predicción de los mismos.

Como no se conocen los deslizamientos que ocurrirán en el futuro, para la elaboración de un modelo predictivo, como es el de susceptibilidad, se requiere el análisis de los datos del pasado para poder extrapolar y predecir su comportamiento en el futuro (ver Figura 6.1).



**Figura 6.14.** Diagrama metodológico que muestra las etapas seguidas en la elaboración de modelos de probabilidad espacial (modelos de susceptibilidad) y de probabilidad espacio-temporal (modelos de peligrosidad).

La correlación que se establece por medio de las FF entre los deslizamientos superficiales ocurridos en el pasado en la zona de estudio y una serie de parámetros espaciales

relacionados con la inestabilidad, denominados en general “factores condicionantes”, tales como la geometría del terreno (altitud, pendientes, orientaciones, etc.), la cobertura vegetal (vegetación o usos del suelo), la geología (litología y estructura), el espesor de regolito y las condiciones hidrológicas (distancias a cauces), proporcionan criterios que permiten predecir el comportamiento futuro del proceso.

Este mismo tipo de herramienta matemática puede aplicarse en otros ámbitos de las Ciencias de la Tierra, para distintos tipos de predicciones, como la localización de yacimientos minerales (Chung & Keating, 2002), la detección de posibles zonas de avalanchas de nieve (Ghinoi & Chung, 2005) o la distribución de dolinas (Galve et al., 2006).

#### 6.5.1.1.1 Funciones de Favorabilidad (FF)

Las FF se pueden interpretar mediante diferentes funciones matemáticas que permiten elaborar modelos predictivos a partir de datos espaciales. Mediante esta técnica, la información de carácter espacial se transforma en valores de favorabilidad. Esta “favorabilidad” se puede expresar en términos relativos (en forma de rangos) como la probabilidad de que algo se encuentre u ocurra en cada punto del territorio analizado. Esto es, permite ordenar en términos de probabilidad todos los puntos (píxeles) analizados, pero no expresar dicha probabilidad de forma cuantitativa.

Las FF, a partir de la relación entre variables condicionantes y deslizamientos, permiten determinar la susceptibilidad de un terreno a los deslizamientos, dado que existe una probabilidad condicionada de que un área sea afectada por deslizamientos futuros, en función de las características que cada área presente. Así, la probabilidad de encontrar un deslizamiento en la zona de estudio vendrá dada por la relación:

$$\text{Área deslizada} / \text{Área total}$$

y la probabilidad de encontrar una determinada unidad o clase definida en el mapa de factores condicionantes, será:

$$\text{Área de la clase} / \text{Área total}$$

y la probabilidad de encontrar un deslizamiento en una determinada clase de una determinada variable, se define por Chung & Fabbri (1993) como:

$$1 - [1 - (1/\text{área de la clase})]^{\text{Área deslizada en la clase}}$$

Desde el punto de vista matemático el procedimiento que se sigue para generar este tipo de funciones (FF) es el siguiente:

Supongamos una función  $g$  para cada unidad o píxel  $p$  donde existe una combinación de factores condicionantes  $m$  ( $c_1, c_2, \dots, c_m$ ), entonces:

$g_p = 1$ , si en el píxel  $p$  existen deslizamientos, así como los factores condicionantes ( $c_1, c_2, \dots, c_m$ )

$g_p = 0$ , si en el píxel  $p$  no existen deslizamientos, así como los factores condicionantes ( $c_1, c_2, \dots, c_m$ )

Por tanto, la función  $g_p(c_1, c_2, \dots, c_m)$  representará un nivel relativo de susceptibilidad del píxel  $p$  dados los  $m$  valores  $(c_1, c_2, \dots, c_m)$  en el píxel.

Si los  $m$  valores  $(c_1, c_2, \dots, c_m)$  del píxel  $p$  presentan unas condiciones más “propensas” o “susceptibles” a los deslizamientos que las del píxel  $q$   $(d_1, d_2, \dots, d_m)$ , entonces como es lógico:

$$g_p(c_1, c_2, \dots, c_m) > g_q(d_1, d_2, \dots, d_m)$$

A partir de los  $m$  factores condicionantes y de los deslizamientos existentes debería ser posible estimar la función de favorabilidad  $g_e(e_1, e_2, \dots, e_m)$  para cualquier unidad o píxel  $e$  existente en el área de estudio.

Existen distintas funciones matemáticas para generar estas funciones de favorabilidad (Bayes, Factor de Certidumbre, etc.) cuya utilidad ya ha sido puesta de manifiesto en trabajos anteriores (Chung & Fabbri, 1998; Chung & Keating, 2002; Clerici et al., 2002; Remondo et al., 2003a; Santacana et al., 2003). Existen otras funciones matemáticas, como la “*likelihood ratio*” o “función de relación de probabilidades”, que pueden mejorar las necesidades de modelización de estos procesos y cuya utilidad merece ser mejor explorada (C-J Chung, comunicación personal). Esta última función es la que se ha aplicado en el presente análisis, como se describe más adelante.

#### 6.5.1.1.1 FF interpretada como una relación de probabilidades

La base teórica de esta función es que si se tiene un píxel  $p$  con unas determinadas características, por ejemplo de pendiente ( $p_{pendiente}$ ), en un área de estudio que está dividida en dos subzonas ( $X$ , con deslizamientos, y  $\bar{X}$ , sin deslizamientos), la función empírica de distribución de frecuencias en  $X$  será diferente a la función de distribución en  $\bar{X}$  (Figura 6.15a).

La función de relación de probabilidades ( $\lambda_p$ ) o “*likelihood ratio*”, cociente o relación entre esas dos funciones, y muestra la distribución de la frecuencia en relación con las pendientes (Figura 6.15b).

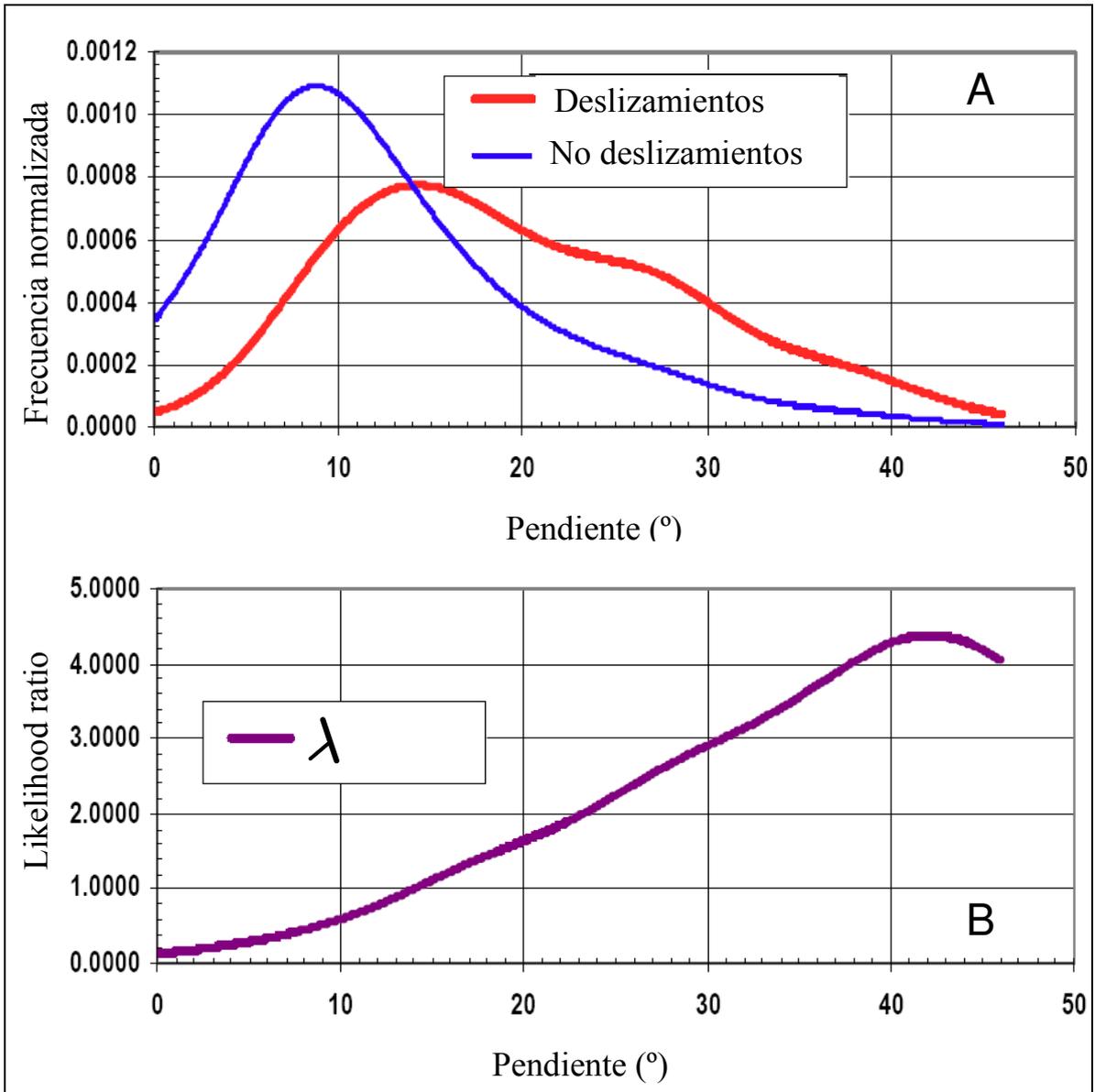
$$\lambda_{p(pendiente)} = \frac{g\{pendiente|X\}}{g\{pendiente|\bar{X}\}}$$

donde:

$g\{pendiente|X\}$  es la función de distribución empírica normalizada del área (o píxeles) afectada por deslizamientos para los distintos valores de pendiente.

$g\{pendiente|\bar{X}\}$  es la función de distribución empírica normalizada del área (o píxeles) no afectada por deslizamientos para los distintos valores de pendiente.

A partir de una serie de capas que representan los  $m$  factores condicionantes, e integradas las respectivas funciones de relación de probabilidades, será posible obtener un modelo de susceptibilidad que muestre las áreas que pueden verse afectadas por deslizamientos en el futuro.



**Figura 6.15.** Ejemplo de: A) funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable pendiente, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos; B) función de relación de probabilidad empírica de la variable pendiente.

Generalmente, los factores condicionantes que existen en un píxel  $p$ , son una combinación de variables continuas y categóricas ( $c_1, c_2, \dots, c_m$ ). Por tanto, la forma de estimar la función de relación de probabilidades será la siguiente:

$$\lambda_p(c_1, c_2, \dots, c_m) = \frac{g\{c_1, c_2, \dots, c_m | X_p\}}{g\{c_1, c_2, \dots, c_m | \bar{X}\}}$$

Suponiendo que las variables continuas ( $c_1, c_2, \dots, c_k$ ) y categóricas ( $c_{k+1}, \dots, c_m$ ) son independientes, entonces:

$$\lambda_p(c_1, \dots, c_m) = \lambda_p(c_1, \dots, c_k) * \lambda_p(c_{k+1}, \dots, c_m) = \frac{g\{c_1, \dots, c_k | X_p\}}{g\{c_1, \dots, c_k | \bar{X}_p\}} \frac{g\{c_{k+1}, \dots, c_m | X_p\}}{g\{c_{k+1}, \dots, c_m | \bar{X}_p\}}$$

Por ejemplo, si existe un píxel  $p$  con información referente a litología (*calizas*), uso del suelo (*prados*) y pendiente ( $20^\circ$ ), la formulación de la función de relación de probabilidad será:

$$\lambda p(\text{calizas, prados, } 20^\circ) = \frac{g\{\text{calizas, prados, } 20^\circ\} | X\}}{g\{\text{calizas, prados, } 20^\circ\} | \bar{X}\}} = \frac{g\{20^\circ\} | X\}}{g\{20^\circ\} | \bar{X}\}} * \frac{g\{\text{calizas, prados}\} | X\}}{g\{\text{calizas, prados}\} | \bar{X}\}}$$

Para las distintas combinaciones de unidades existentes en toda el área de estudio se estimarán las correspondientes funciones de relación de probabilidades como a continuación se indica:

$$\lambda \text{área}(c_1, \dots, c_m) = \lambda p(c_1, \dots, c_k) * \lambda p(c_{k+1}, \dots, c_m) * \dots$$

Mediante la anterior formulación, desarrollada por Chung & Fabbri (2005), se puede obtener el modelo de susceptibilidad a los deslizamientos, teniendo en cuenta los diferentes factores condicionantes considerados.

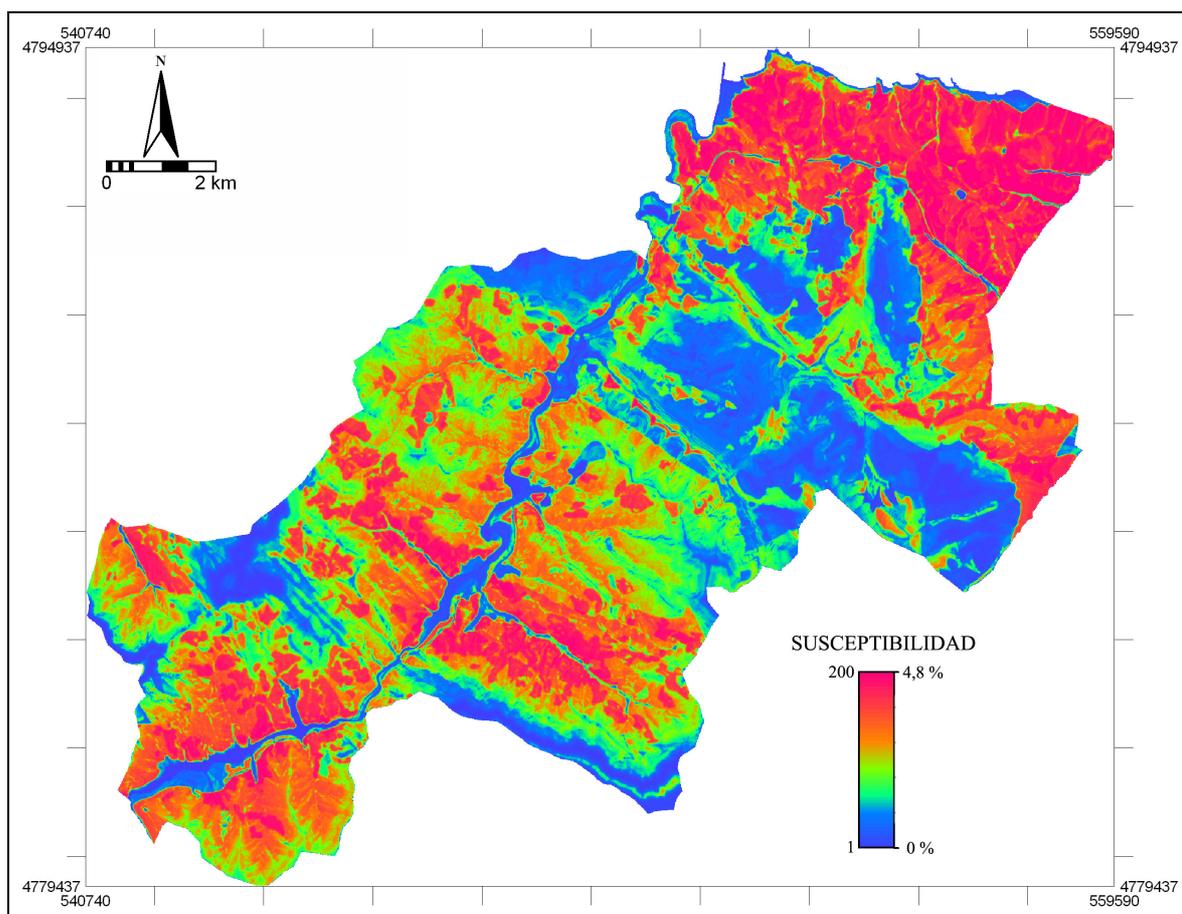
La ventaja de este procedimiento seguido para modelizar la susceptibilidad, con respecto a las FF anteriormente utilizadas, se plasma en que:

- No se produce la simplificación de datos. En anteriores modelos, las variables continuas se dividían en clases o rangos, con lo que se perdía información (Chung & Fabbri, 1999; Remondo, 2001; Clerici et al., 2002; Remondo et al., 2003a). La necesidad de categorizar variables se debía principalmente a las limitaciones de los programas informáticos y de los ordenadores, los cuales no tenían capacidad para procesar la enorme cantidad de operaciones que deben realizarse.
- Se permite el tratamiento simultáneo, pero diferenciado, de las variables categóricas y de las variables continuas.
- Se pueden incorporar los límites de las unidades categóricas, lo cual permite dar más peso a los valores del centro de las unidades, donde hay más certidumbre, en relación con los límites, donde la incertidumbre puede ser mayor, sobre todo cuando se trabaja con variables de poca resolución.

Por otro lado, los resultados obtenidos con estos procedimientos pueden compararse con los resultados obtenidos mediante otros métodos estadísticos. Así, por ejemplo, Melchiorre et al. (2005) han aplicado dos procedimientos diferentes, las Redes Neuronales Artificiales (*Artificial Neural Networks, ANN's*) y la Regresión Logística a dos zonas de estudio, una en Italia y otra en España. Los autores concluyen que ambos métodos permiten obtener resultados similares.

### 6.5.1.1.2 Obtención del modelo de susceptibilidad

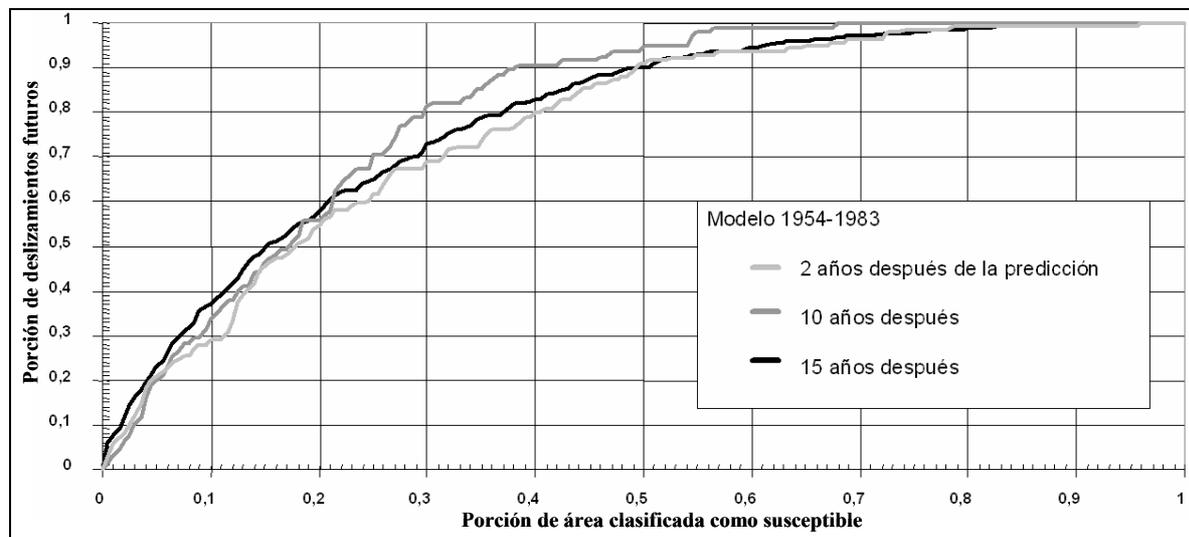
Mediante la aplicación de las técnicas comentadas anteriormente, se genera un modelo de susceptibilidad para todo el área de estudio, reclasificado en valores que van de 1 (mínima susceptibilidad, color azul) a 200 (máxima susceptibilidad, color rojo), con el fin de facilitar su visualización (Figura 6.16). El método para la obtención de estos modelos ha sido descrito de manera detallada por Chung & Fabbri (1993). Estos valores también pueden ser expresados en %. Cada una de estas clases representa el 0,5% del área de estudio, de forma que el valor 200 representa el 0,5% del área más susceptible y la clase 1, el 0,5% del área menos susceptible. Las zonas existentes fuera del área de estudio toman el valor 0.



**Figura 6.16.** Ejemplo de modelo de susceptibilidad obtenido para el Bajo Deva utilizando como variables elevaciones, pendientes, orientaciones, litología y vegetación.

Otra forma de expresar la susceptibilidad, de forma cuantitativa, consiste en transformar esos valores numéricos, de 1 a 200, en valores de probabilidad a la susceptibilidad, es decir, en valores que reflejen la proporción de los deslizamientos inventariados que se encuentra en cada una de las clases establecidas. Teniendo en cuenta el principio del uniformitarismo “revisado” y de acuerdo con la información que proporcionan las curvas de validación que se muestran en la figura 6.17 (Bonachea et al., 2004; Remondo et al., 2004), que indican una conservación del proceso en los diferentes periodos analizados, la transformación es sencilla. Consecuentemente, a partir de la intersección del modelo de susceptibilidad con el mapa de deslizamientos se obtiene una tabla donde se representan las posibles combinaciones de clases (desde la clase 1 a la clase 200) con la presencia o ausencia de deslizamientos, así como el correspondiente número de píxeles o área de cada combinación

(Tabla 6.7). Esta superposición sirve de base para transformar la probabilidad espacial en probabilidad espacio-temporal.



**Figura 6.17.** Curvas de validación del modelo de susceptibilidad de deslizamientos elaborado a partir de los movimientos 1954-1983 (Figura 6.16), usando las siguientes variables: pendiente, elevaciones, orientaciones, litología y vegetación. La validación se llevó a cabo con los deslizamientos ocurridos durante 1983-85, 1983-91 y 1983-97 (Remondo, 2001).

**Tabla 6.7.** Combinación de las clases de susceptibilidad con la presencia (2) o ausencia (1) de deslizamientos, número de píxeles de cada combinación y porción de píxeles deslizados respecto al total. (Nº total de píxeles deslizados: 906).

Clase de combinación	Clase de susceptibilidad	Presencia/ausencia	Nº de píxeles	Porción deslizamientos (Nº píxeles deslizados en la clase/Nº total de píxeles deslizados)
200 * 2	200	deslizamiento	44	0,04857
200 * 1	200	no deslizamiento	8.228	
---	---	---	---	---
190 * 2	190	deslizamiento	12	0,01325
190 * 1	190	no deslizamiento	7.031	
---	---	---	---	---
150 * 2	150	deslizamiento	4	0,00442
150 * 1	150	no deslizamiento	6.930	
---	---	---	---	---
100 * 2	100	deslizamiento	2	0,00221
100 * 1	100	no deslizamiento	6.731	
---	---	---	---	---
50 * 2	50	deslizamiento	2	0,00221
50 * 1	50	no deslizamiento	7.016	
---	---	---	---	---
1 * 2	1	deslizamiento	---	---
1 * 1	1	no deslizamiento	---	---

La relación entre el número de píxeles deslizados dentro de cada clase y el total de píxeles deslizados en el área, muestra la porción de píxeles con deslizamientos que contiene cada una de las 200 clases. La representación de la proporción de píxeles deslizados en cada clase o número de deslizamientos frente a la clase de susceptibilidad, permite generar una gráfica (Figura 6.18) a la cual se puede ajustar una línea de tendencia que permite obtener, además, una expresión que muestra la correspondencia entre valores de susceptibilidad y porción de deslizamientos. Esta expresión (Figura 6.19) facilita la posterior transformación de la representación de clases de 1 a 200, en valores de probabilidad espacial (Figura 6.16).

### 6.5.1.1.3 Estrategias de validación/evaluación de resultados

La mayoría de los modelos de susceptibilidad, peligrosidad o riesgo elaborados hasta hace unos años no presentan validaciones independientes. Los modelos no validados tienen el significado de “hipótesis razonables” de comportamiento futuro, pero no permiten conocer el grado de fiabilidad de las predicciones que implícita o explícitamente contienen. La validación es una etapa importante y fundamental en todo el proceso de construcción de modelos predictivos, ya que ésta permitirá determinar la fiabilidad de la predicción (Chung & Fabbri, 2003b; Fabbri et al., 2003; Remondo et al., 2003b). Sin la validación, el modelo predictivo es poco útil. La validación consiste en comparar los resultados obtenidos mediante un modelo predictivo con las áreas afectadas por futuros deslizamientos. Dicha comparación puede ser cualitativa (consiste en la comparación visual de distintos modelos) o cuantitativa mediante el uso de índices tales como *área de la clase con deslizamientos/área de la clase*, o mediante el empleo de las curvas acumuladas o de validación, etc.

La validación se puede llevar a cabo utilizando varias estrategias:

- a) Si se dispone de varias series temporales de deslizamientos, primero se generan los modelos predictivos para un determinado periodo y después se validan con las series temporales posteriores, de forma que los movimientos más antiguos sirvan para predecir la aparición de los posteriores. Este procedimiento parece el más adecuado a la hora de hacer validaciones de modelos predictivos (Remondo et al., 2003b). Cuando no es posible disponer de distintas series temporales de deslizamientos, se recurre a otros métodos, como por ejemplo:
- b) Dividir el área de estudio en 2 subzonas: de esta forma se genera un modelo con los deslizamientos de una de ellas y se valida con los existentes en la otra y viceversa (Ballabio et al., 2005).
- c) Agrupar de forma aleatoria los deslizamientos en 2 conjuntos, de forma que se genere un modelo predictivo con los deslizamientos del primero y se valide con los del segundo y viceversa.
- d) Seleccionando de forma secuencial un número de deslizamientos que permitan predecir el resto de los existentes. Si se cuenta, por ejemplo, con 10 deslizamientos, los 2 primeros se utilizan para predecir los 8 restantes, los 2 segundos para predecir los otros 8 y así sucesivamente hasta el final. O bien al revés, con 8 deslizamientos, predecir los 2 restantes, también en pasos sucesivos.

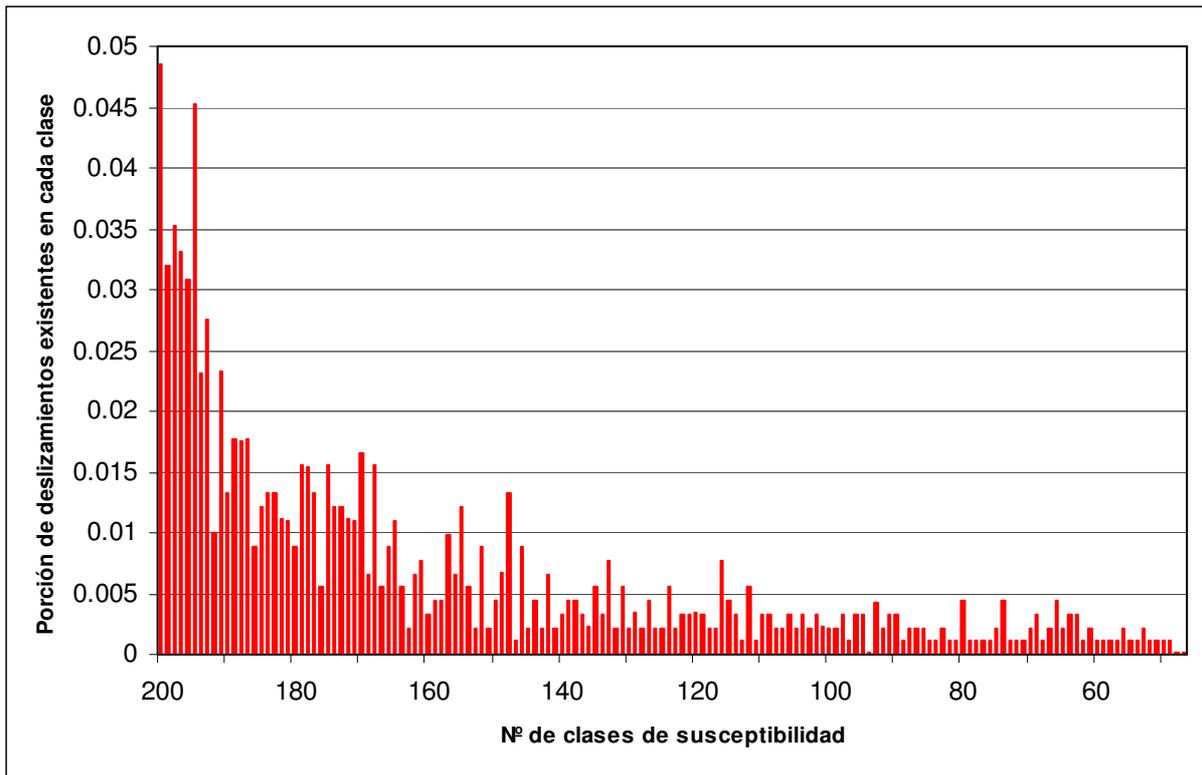


Figura 6.18. Distribución de frecuencias de deslizamientos en cada clase de susceptibilidad.

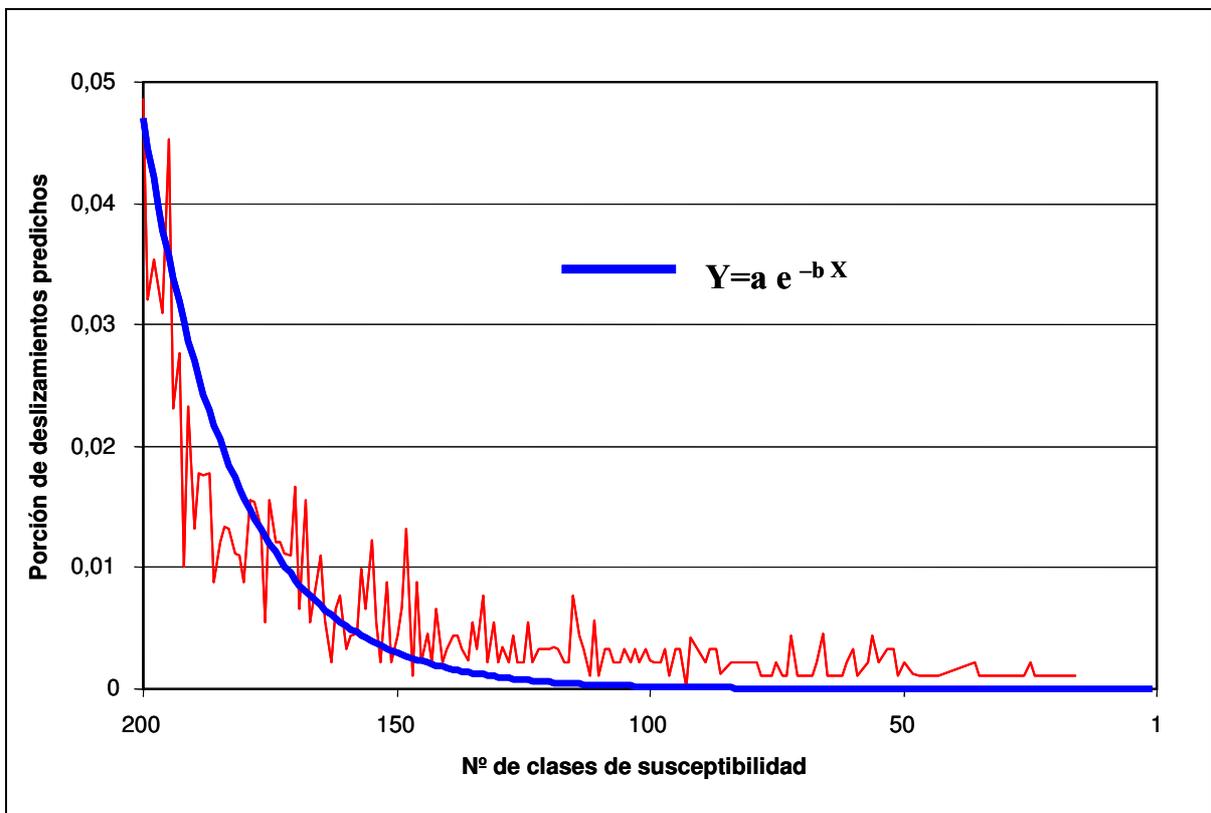
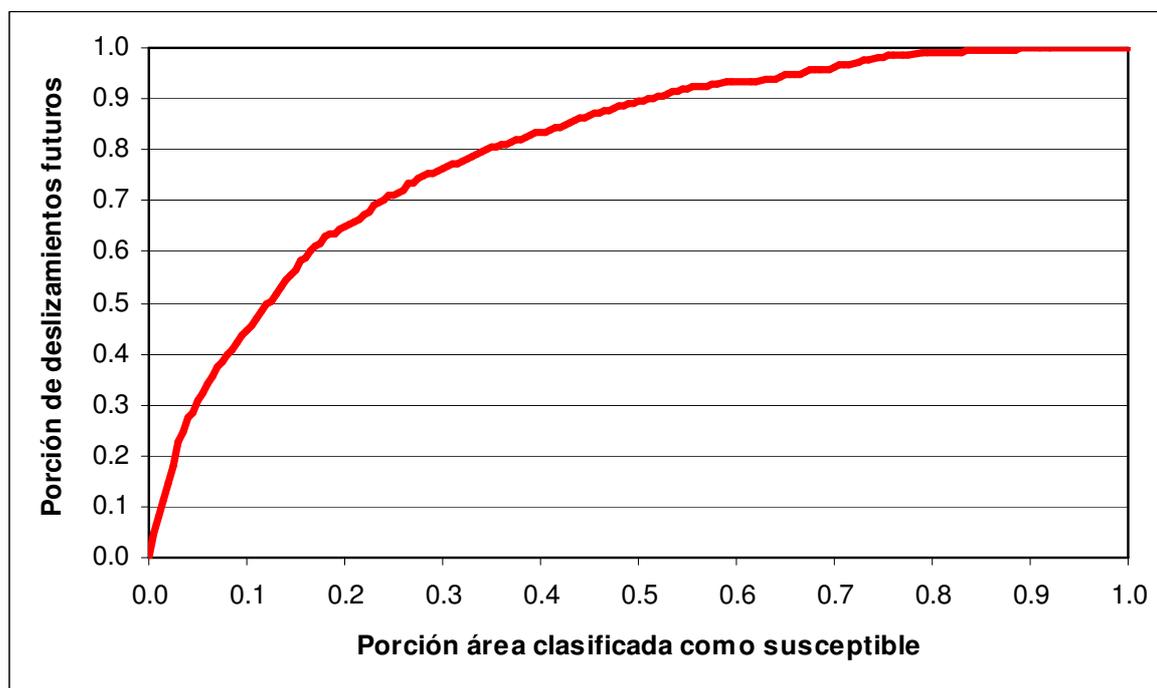


Figura 6.19. Función monótona decreciente y expresión de ajuste de la distribución mostrada en la Figura 6.18. X: Clase de susceptibilidad; Y: Porción de deslizamientos; a y b: valores de ajuste.

### 6.5.1.1.3.1 Curvas de validación

Para obtener las curvas de validación se cruza, o se superpone, el modelo de susceptibilidad generado (reclasificado en 200 clases) con un mapa de deslizamientos o eventos, diferente al que ha servido para generar el modelo con el que se desee comparar y utilizando cualquiera de las estrategias de validación/contrastación descritas en el punto anterior. De esta forma se obtiene una tabla de validación cruzada que incluye las combinaciones resultantes y el número de píxeles 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 una curva acumulada de predicción-validación. En abscisas se representa la porción de área clasificada como susceptible, mientras que en ordenadas se representa la porción acumulada de deslizamientos explicados o predichos dentro de cada una de las clases de susceptibilidad (Figura 6.20). Cuanto más asintótica y próxima al eje de ordenadas, en su tramo inicial, sea esta gráfica, tanto mejor será la capacidad de predicción del modelo. En el ejemplo de la Figura 6.20, la predicción es razonablemente buena, ya que con el 20% de la superficie susceptible se predice el 65% de los futuros deslizamientos.



**Figura 6.20.** Ejemplo de curva de validación. Con un 10% del área de estudio, se explica el 40% de los futuros deslizamientos; con el 20% el 65%, etc.

### 6.5.1.2 Procedimiento semiautomático para elaborar modelos de susceptibilidad

La colaboración mantenida en los últimos años por algunos miembros del Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada de la Universidad de Cantabria con el profesor Chung, del *Geological Survey of Canada*, ha dado lugar a varias contribuciones científicas relacionadas con la elaboración de modelos de susceptibilidad (Fabbri et al., 2003; Remondo et al., 2003a, b; Ballabio et al., 2005; Olague et al., 2005; Remondo et al., 2005b). Esa cooperación ha ayudado a que el profesor Chung desarrollase el *Spatial Prediction Modelling* (SPM, 2004), un software que permite elaborar una gran cantidad de modelos predictivos en cortos intervalos de tiempo. Dicho programa consta de tres módulos, cuyas características principales se describen brevemente:

#### 1.- Módulo de preparación de datos:

Los módulos de creación de modelos y de validación requieren un formato de imagen, propia de este software, cuya extensión es *.spg*. Por tanto, es necesario transformar los datos de partida a este nuevo formato. Para ficheros de ArcGis, existe un programa especial de conversión; sin embargo, los ficheros de Ilwis se deben exportar a formato *.img* de Idrisi (se ha comprobado que esta es la mejor transformación, a pesar de que la exportación de ficheros en formato Ilwis es también posible). Para evitar errores posteriores, conviene señalar que los mapas de 1 byte se deben exportar, con el método vía geogateway de Ilwis, al formato *Idrisi rasters (.img)*, mientras que los de mayor tamaño (2 y 4 bytes) se exportan directamente al formato *Idrisi (.img)*.

Es condición indispensable que todos los mapas, en formato raster, tengan el mismo tamaño. Debido a limitaciones del propio software, ese tamaño no puede exceder de los 2.000 x 2.000 píxeles. Por otro lado, las variables a analizar (límite de área de estudio, variables temáticas y continuas y, por supuesto, los deslizamientos) han de cumplir una serie de requisitos:

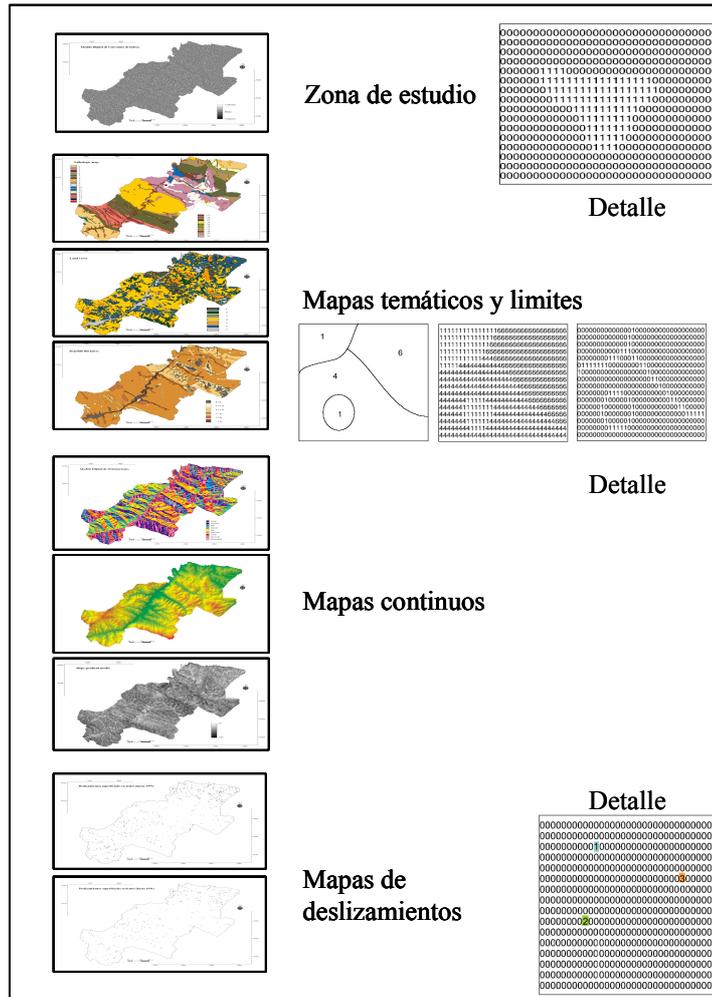
- **Límite del área de estudio:** ha de ser un fichero de 8-bit (1 byte), clasificado en valores de 1 (zona de estudio) y 0 (fuera de la zona de estudio).

- **Variables temáticas:** los mapas de litología, usos del suelo, etc., deben ser reclasificados en valores, es decir, a cada unidad dentro del mapa se le asigna un valor numérico que puede ir desde 1 hasta un máximo de 250. Además, se deben generar los ficheros correspondientes a los límites de las diferentes unidades existentes, los cuales se clasifican en 1 (límites) y 0 (resto del mapa). Estos ficheros han de tener un tamaño de 8-bit.

- **Variables continuas:** su tamaño puede ser de 8-bit, 16-bit, o 32-bit (1-Byte, 2-Byte, o 4-Byte) en función de los valores que se tengan. Dentro de este grupo se consideran: pendientes, orientaciones, concavidades, etc.

- **Mapas de ocurrencias o deslizamientos:** han de ser ficheros de 16-bit (2-Bytes), ya que los deslizamientos se han tenido que clasificar en valores desde 1 hasta n; mientras que a la zona de estudio que no tiene deslizamientos se le asigna valor 0.

La Figura 6.21 muestra un ejemplo de las características de las imágenes utilizadas para realizar el análisis de susceptibilidad a partir de este programa.



**Figure 6.21.** Ejemplo de variables utilizadas por el software SPM y su representación.

El SPM genera una serie de ficheros con formato *.spg* (uno para cada fichero que se ha introducido en el análisis, salvo en el caso de los deslizamientos, donde se generan dos: uno indexado de 16-bit (muestra los distintos deslizamientos clasificados de 1 a n); y otro binario de 8-bit, que indica la presencia-ausencia de movimientos (1: deslizamientos, 0: no deslizamientos). Mientras que el segundo se utiliza para generar los modelos predictivos, el primero se emplea para la validación.

Las imágenes generadas en este apartado serán utilizadas para generar los modelos de predicción.

*2.- Módulo de generación de modelos predictivos de susceptibilidad*

Con este módulo se pueden generar, mediante las Funciones de Favorabilidad (que engloban diferentes funciones como: *Fuzzy set*, *Empirical Likelihood ratio*, *Logistic and Linear ratio* y *Bayes*; Chung & Fabbri, 1993; 1998; 1999), los modelos predictivos de susceptibilidad a los deslizamientos.

Las diferentes funciones se pueden aplicar de forma multivariable o bivariable. Se trata, por tanto, de explicar el comportamiento de una variable (deslizamientos) a partir de la combinación de una o varias de las variables (los factores condicionantes).

Una vez generados los modelos se pasa a evaluar su capacidad de predicción.

### 3.- Módulo de validación

Este módulo permite contrastar la capacidad de predicción del modelo generado con cualquiera de las funciones utilizadas, de acuerdo con diferentes estrategias de validación.

La principal ventaja de este programa es que permite generar gran cantidad de modelos en muy poco tiempo, además de generar una serie de ficheros con las estadísticas realizadas en cada proceso. El principal inconveniente es la ya citada limitación del programa, de no admitir ficheros con tamaños superiores a 2.000 x 2.000 píxeles, aunque esto no es un grave problema, ya que la zona de estudio puede dividirse en subzonas.

#### 6.5.1.3 Elaboración de modelos de peligrosidad o de probabilidad espacio-temporal

Dado que las características relacionadas con la magnitud de los deslizamientos ya se han tenido en cuenta en la elaboración de los modelos de susceptibilidad, para transformar éstos modelos en modelos de peligrosidad (probabilidad espacio-temporal), sólo es analizar los datos existentes sobre la distribución temporal de deslizamientos con el fin de establecer posibles tendencias futuras.

A partir de los modelos de susceptibilidad generados anteriormente, y puesto que se conoce el número o porción de deslizamientos en cada clase de susceptibilidad (1 a 200) y el lapso temporal en el que se han producido, se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en el futuro, en cada una de las citadas clases (frecuencia futura).

La extrapolación más inmediata y más razonable a primera vista, es suponer que la frecuencia futura en cada clase va a ser similar a la frecuencia pasada, obteniendo a partir de ella la probabilidad de ocurrencia de nuevos movimientos en cada píxel analizado. No obstante, los datos obtenidos previamente en la zona de estudio, así como datos similares para áreas más amplias, como el conjunto de Italia (Guzzetti & Tonelli, 2004) o incluso a nivel global (EM-DAT, 2005), ponen de manifiesto que hay una marcada tendencia al aumento en la frecuencia de dichos procesos en las últimas décadas (Cendrero et al., 2006). Dicha tendencia se ha interpretado por parte de estos autores como consecuencia de la creciente transformación de la superficie terrestre por la acción humana, dentro de lo que representa un “cambio geomorfológico global” no relacionado con el cambio climático. Si esta interpretación es correcta, cabe esperar que dicha tendencia continúe y que las frecuencias futuras sean mayores que las pasadas. En otras palabras, la transformación de los modelos de susceptibilidad en modelos de peligrosidad, posiblemente no deba hacerse de acuerdo con la consideración de un escenario tipo “*business as usual*”, con frecuencia similar a la pasada, sino teniendo en cuenta otros escenarios que contemplen la probable intensificación futura del proceso en respuesta a una creciente modificación de la capa superficial del terreno por acción humana.

##### 6.5.1.3.1 Escenarios propuestos en la evolución temporal de deslizamientos

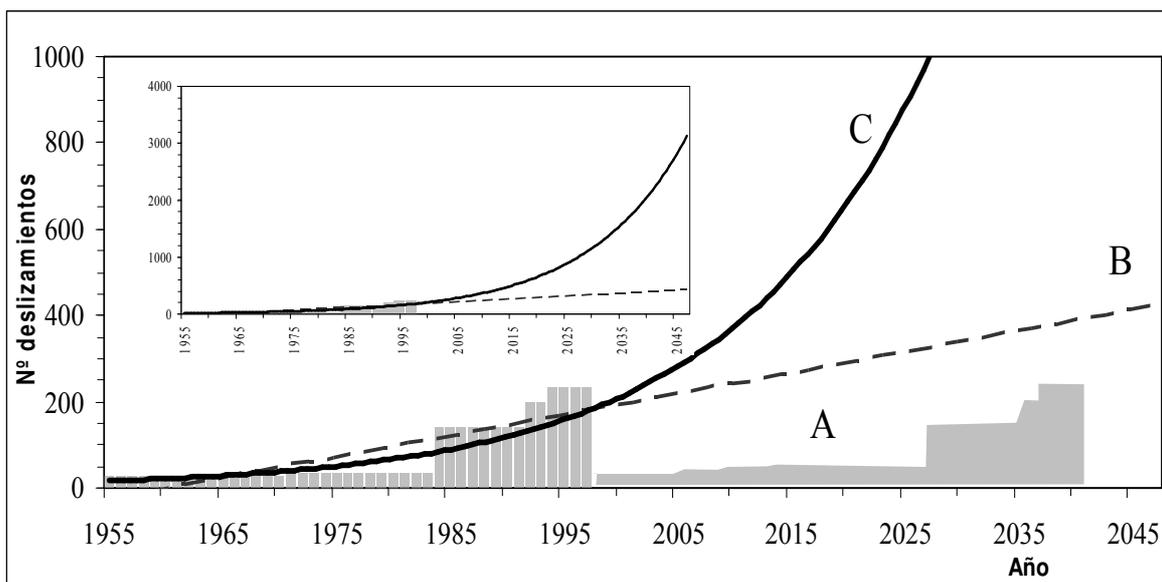
Para formular escenarios de frecuencia futura de los deslizamientos se ha acudido a analizar la frecuencia pasada. El análisis se ha realizado a través de inventarios de los deslizamientos ocurridos en la zona de estudio en diferentes intervalos temporales

(Remondo et al., 2005a, b). Tal como se muestra en la Figura 6.22, la frecuencia de los deslizamientos ha aumentado de forma notable a lo largo del periodo analizado por los autores. Sin embargo, el último inventario realizado muestra una pauta de cambio que permite definir tres tendencias posibles, que sirven de base para formular otros tantos escenarios.

1. el primero de los escenarios propuesto (Escenario A) supone que el número de eventos en el futuro será similar al promedio de la tendencia mostrada en el pasado, es decir, la superficie deslizada en los próximos años será la media de la superficie deslizada en el pasado. Este escenario parece bastante conservador teniendo en cuenta las tendencias generales existentes a nivel mundial, las cuales muestran un claro incremento en el número de procesos naturales (capítulo 1).

Más acordes con las tendencias observadas, son los otros dos escenarios propuestos:

2. uno que implica un aumento lineal del número de deslizamientos o, lo que es lo mismo, de superficie deslizada (Escenario B), de acuerdo con la tendencia observada en los últimos años;
3. otro que muestra un incremento exponencial de superficie deslizada, resultado del mejor ajuste de la curva de frecuencias pasadas (Escenario C). Este escenario es el más pesimista de los tres y contempla un gran aumento de la superficie deslizada en el futuro. Obviamente, esa curva de aumento tendrá un límite.



**Figura 6.22.** Escenarios considerados para la frecuencia futura de deslizamientos. A) N° total de deslizamientos en los próximos 45 años equivalente al de los últimos 45 años. B) N° de deslizamientos por año extrapolado a partir del mejor ajuste de la tendencia de los últimos años. C) N° de deslizamientos por año extrapolado a partir del mejor ajuste de la tendencia de los últimos 45 años. (Remondo et al., 2005a).

Dichos escenarios no deben considerarse, evidentemente, como predicciones perfectas del futuro. Simplemente tratan de establecer posibles situaciones futuras, caso de que determinadas tendencias se mantengan. La toma de datos adicionales de frecuencias deslizamientos, para periodos posteriores al último analizado, ayudará a determinar con mayor precisión los escenarios que se proponen para el futuro. Además, conviene resaltar

que dichas predicciones (escenarios futuros) presentan una incertidumbre tanto mayor, cuanto más largo sea el periodo para el cual se hacen, ya que algunos de los factores que influyen en el proceso pueden variar con el tiempo (especialmente los relacionados con la gestión del territorio). Por ello, en el presente análisis se han hecho extrapolaciones a corto (10 años) y largo (50 años) plazo.

A partir de la superficie total que puede deslizar en el futuro, teniendo en cuenta el escenario correspondiente, y del porcentaje del total de los deslizamientos existentes en cada clase de susceptibilidad, se puede estimar el área propensa a deslizar (en m<sup>2</sup>), dentro de cada clase o valor de susceptibilidad y para cada uno de los escenarios propuestos, mediante la expresión siguiente:

$$\text{Área deslizada en la clase } i \text{ (Escenario } X) = \text{Superficie total deslizada (escenario } X) * \text{fracción de los deslizamientos predichos o futuros en la clase } i$$

siendo  $X = A, B$  o  $C$ .

Para transformar la susceptibilidad en probabilidad espacio-temporal se aplica la siguiente expresión:

$$\text{Probabilidad} = \text{Área deslizada en la clase } i \text{ (Escenario } X) / \text{Área de la clase } i$$

O bien, mediante esta otra expresión (Chung & Fabbri, 2005) para evitar que aparezcan probabilidades iguales a 0 o al 100%:

$$\text{Probabilidad (Escenario } X) = 1 - \{1 - (1/\text{área de la clase } i)\}^{\text{Área deslizada en la clase } i \text{ (Escenario } X)}$$

Mediante estas expresiones, y teniendo en cuenta la superficie que deslizará en el futuro dadas las características medias de los deslizamientos (superficie media en la zona de la corona de 160 m<sup>2</sup>; afectando a una superficie total afectada de 500 m<sup>2</sup>, volumen de material que rara vez supera los 250 m<sup>3</sup>, y distancia media recorrida de 30 metros) existentes en la zona de estudio, se transforma cada una de las clases de susceptibilidad en valores de peligrosidad o de probabilidad espacio-temporal. Esas mismas características de los deslizamientos permitirán, también, hacer una serie de suposiciones sobre los daños que dichos movimientos pueden ocasionar sobre los elementos expuestos, cuando no existan datos registrados sobre daños a elementos en el pasado.

## 6.5.2 Estimación de la vulnerabilidad

Una vez que la peligrosidad ha sido estimada, se pasa a evaluar la vulnerabilidad. En este trabajo se ha considerado necesario diferenciar entre vulnerabilidad directa y pérdidas indirectas. Por tanto, la forma de estimarlas es diferente en ambos casos.

La hipótesis de trabajo está basada en el análisis de los efectos producidos por los deslizamientos en el pasado teniendo en cuenta las características del propio elemento expuesto y el escenario de magnitud considerado. El esquema del proceso de estimación de la vulnerabilidad se ha mostrado en la Figura 6.3.

### 6.5.2.1 Estimación de la vulnerabilidad directa

El método para estimar la vulnerabilidad directa que se adopta en el presente trabajo se basa en la relación existente entre el valor de los daños medios producidos en el pasado por el tipo de deslizamiento estudiado (o valor de los daños que se supone producen los movimientos en masa sobre algunos elementos a los que afectan) y el valor de reemplazar ese elemento o el coste de uno nuevo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V = \frac{\text{Pérdidas debidas a un deslizamiento de determinado tipo y magnitud en el elemento}}{\text{Valor del elemento}}$$

De esta forma, la vulnerabilidad queda expresada como el grado de pérdidas monetarias, de 0 a 1, en un determinado elemento como consecuencia de un evento peligroso de unas determinadas características. Ambos términos de la expresión se han estimado teniendo en cuenta los valores actuales, es decir, tanto las pérdidas como el valor de construcción del elemento se han transformado a precios actuales. La vulnerabilidad de cada elemento se puede representar en un mapa (tamaño de píxel 10 x 10 metros), el cual muestra el grado de pérdidas de ese elemento cuando es afectado por un deslizamiento de las características analizadas.

El valor del elemento o de reposición del mismo, como ya se comentó anteriormente, se ha obtenido a partir de distintas fuentes, fundamentalmente proyectos de obras, organismos públicos y empresas constructoras. A partir de la información citada se ha podido obtener el valor unitario de diferentes tipos de elementos (km. de autopista, de carretera nacional, etc., viviendas unifamiliares, naves industriales, edificios de pisos, etc., zonas de prados, de bosque, de cultivos, etc.). Esos costes unitarios representan, lógicamente, valores promedio aproximados.

Entre las fuentes de información utilizadas para obtener datos sobre daños cabe destacar las entrevistas con técnicos de diferentes servicios de la DFG (en muchos casos los costes de reparaciones se engloban en partidas de presupuestos más importantes y no se encuentran desglosadas), así como con habitantes locales en lugares afectados por deslizamientos. Con la información citada, se han podido determinar los costos de reparación de algunos tipos de infraestructuras (sobre todo de carreteras provinciales y locales) y de edificios de dimensiones reducidas, así como los daños sufridos por el terreno como tal. Para estimar los posibles daños directos en elementos, en relación con los cuales no se ha podido obtener información, es preciso hacer determinadas suposiciones, sobre costes o daños que pueden generar los deslizamientos considerados (teniendo en cuenta los distintos escenarios de magnitud de los movimientos).

Los daños a personas se pueden estimar siguiendo un procedimiento, a grandes rasgos, similar, si bien se tiene alguna dificultad específica, como la relativa a la asignación de un valor económico a la vida de una persona, o el hecho de que se trata de “elementos móviles”. Aunque se pueden utilizar distintos métodos para calcular la vulnerabilidad de la población, el más sencillo y directo es considerar a todas las personas por igual (sexo, edad, capacidad productiva, etc.) y, consiguientemente, la expresión de la vulnerabilidad podría ser la siguiente:

$$V_{personas} = \frac{N^{\circ} \text{ afectados o fallecidos debidos a deslizamientos (durante el periodo analizado)}}{Población \text{ total}}$$

Por ejemplo, si en los pasados 50 años hubieran muerto cinco personas en la zona de estudio, todas ellas a causa de deslizamientos de una determinada magnitud, el valor de la vulnerabilidad para movimientos de esa magnitud sería:

$$V = N^{\circ} \text{ de víctimas} / N^{\circ} \text{ Habitantes} = 5 / 45.288 = 1,1 \times 10^{-4}$$

En esta aproximación no se considera que las personas se mueven, por ejemplo, para ir a trabajar, que pasan gran cantidad de horas en sus centros de trabajo, etc., por lo que su vulnerabilidad podría variar, así como también la población.

En cualquier caso, no existe constancia de daños a personas por causa de los deslizamientos en la zona de estudio, por lo que este tipo de vulnerabilidad no se ha considerado por ser nula.

### 6.5.2.2 Estimación de las pérdidas indirectas

La estimación de pérdidas indirectas es aún más complicada que la de las pérdidas directas debido a la escasa experiencia existente en este ámbito. Para estimar las pérdidas indirectas se debe recurrir a la propuesta de escenarios que puedan representar situaciones más probables de acuerdo con el criterio de experto. Existen ejemplos de escenarios propuestos para casos concretos de grandes deslizamientos (P. Giacomelli, comunicación personal).

Como ya se comentó anteriormente, el área de estudio es una importante zona industrial que además constituye un epicentro económico con respecto a las tres capitales vascas, las cuales se comunican a su vez con Europa y el resto de España a través de la red de infraestructuras. Teniendo en cuenta la actividad económica de la zona y de acuerdo con datos empíricos de efectos producidos por deslizamientos en el pasado, el escenario que se propone considera que el principal efecto indirecto producido por deslizamientos en esta zona está causado por la interrupción temporal de esas líneas de comunicación. Eso implica, por un lado, la pérdida de productividad económica, es decir, pérdidas de horas de trabajo de los trabajadores, de manera que las principales pérdidas económicas indirectas debidas a daños en infraestructuras pueden representarse a través de la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas debidas a la pérdida de tiempo laborable} = [N^{\circ} \text{ de trabajadores afectados por hora} * \text{Coste de un trabajador por hora (€/h)} * \text{duración de la interrupción (h)}]$$

Por otro lado, también se deben considerar las pérdidas debidas a incrementos en la distancia a recorrer como consecuencia de que los vehículos deben tomar un camino

alternativo para llegar a su punto de destino (Figura 6.23). En este caso, a las anteriores pérdidas habría que sumar estas otras:

*Pérdidas debidas al aumento de la distancia = [longitud adicional del camino alternativo \* N° de vehículos afectados por hora \* coste por km. adicional] + retraso por incremento de tiempo debido al aumento de distancia (tiempo éste distinto de, y añadido al anterior)*

A partir del mapa de infraestructuras, dividido en sectores que muestran la intensidad media diaria de vehículos (Figura 6.24), se puede obtener el número de vehículos por hora que pasan por el sector (salvo en el caso del tren). Evidentemente, no sería lo mismo si la interrupción se produjese durante la noche que si se produjera en las horas de mayor intensidad de tráfico. En este trabajo se ha considerado un promedio diario.

El número de personas afectadas como consecuencia de la interrupción en las vías de comunicación, se estima a partir de la relación siguiente:

$$N^{\circ} \text{ de personas afectadas} = N^{\circ} \text{ de vehículos por hora} * N^{\circ} \text{ de personas por vehículo}$$

Sin embargo, todas esas personas afectadas no son trabajadores activos, los cuales pueden generar una productividad económica, por lo que la expresión anterior se convierte en:

$$N^{\circ} \text{ de trabajadores afectados por hora} = N^{\circ} \text{ de vehículos por hora} * N^{\circ} \text{ de personas por vehículo} * \text{Tasa de actividad en la zona}$$

La tasa de actividad representa el porcentaje de población que trabaja o busca trabajo sobre la población total (mayores de 16 años).

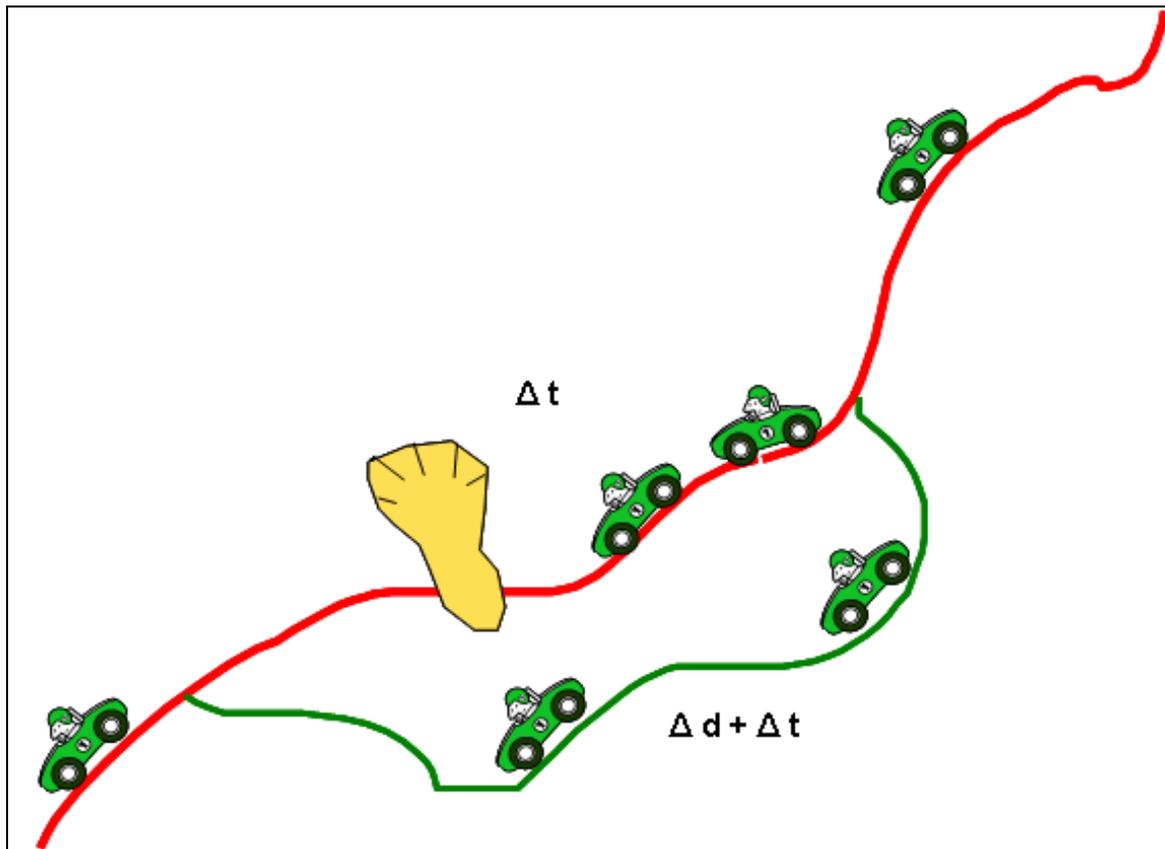
$$\text{Tasa de actividad en la zona} = \frac{\text{Población activa mayor de 16 años}}{\text{Población total mayor de 16 años}} * 100$$

Por otro lado, cada trabajador supone un coste diario para el empresario y si el trabajador sufre un retraso, teóricamente genera unas pérdidas a la empresa. Así, el coste medio por hora no trabajada será:

$$\text{Coste de un trabajador por hora} = \frac{\text{Salario medio mensual de un trabajador}}{N^{\circ} \text{ de horas mensuales trabajadas}}$$

El incremento de distancia, debido a que se deben tomar caminos alternativos, se ha estimado considerando una distancia media de recorrido; mientras que el coste por kilómetro recorrido se ha recogido de diversas estadísticas. Mediante un análisis de redes, se podría estimar automáticamente la distancia real alternativa recorrida desde cada sector de vía afectado por un deslizamiento hasta el punto de destino.

Finalmente, para estimar las pérdidas indirectas por retrasos e interrupciones en la vía del tren se aplica una expresión similar a las anteriores, pero además se debe incluir el coste debido a que, en general, cuando un deslizamiento interrumpe la vía, se contratan autobuses para trasladar a las personas de una estación de tren a otra. Cuando se produce un evento de este tipo, lo habitual es que los trenes sigan circulando hasta las estaciones entre las que se ha producido el deslizamiento y desde allí se transporta a los viajeros en autobús a la estación siguiente.



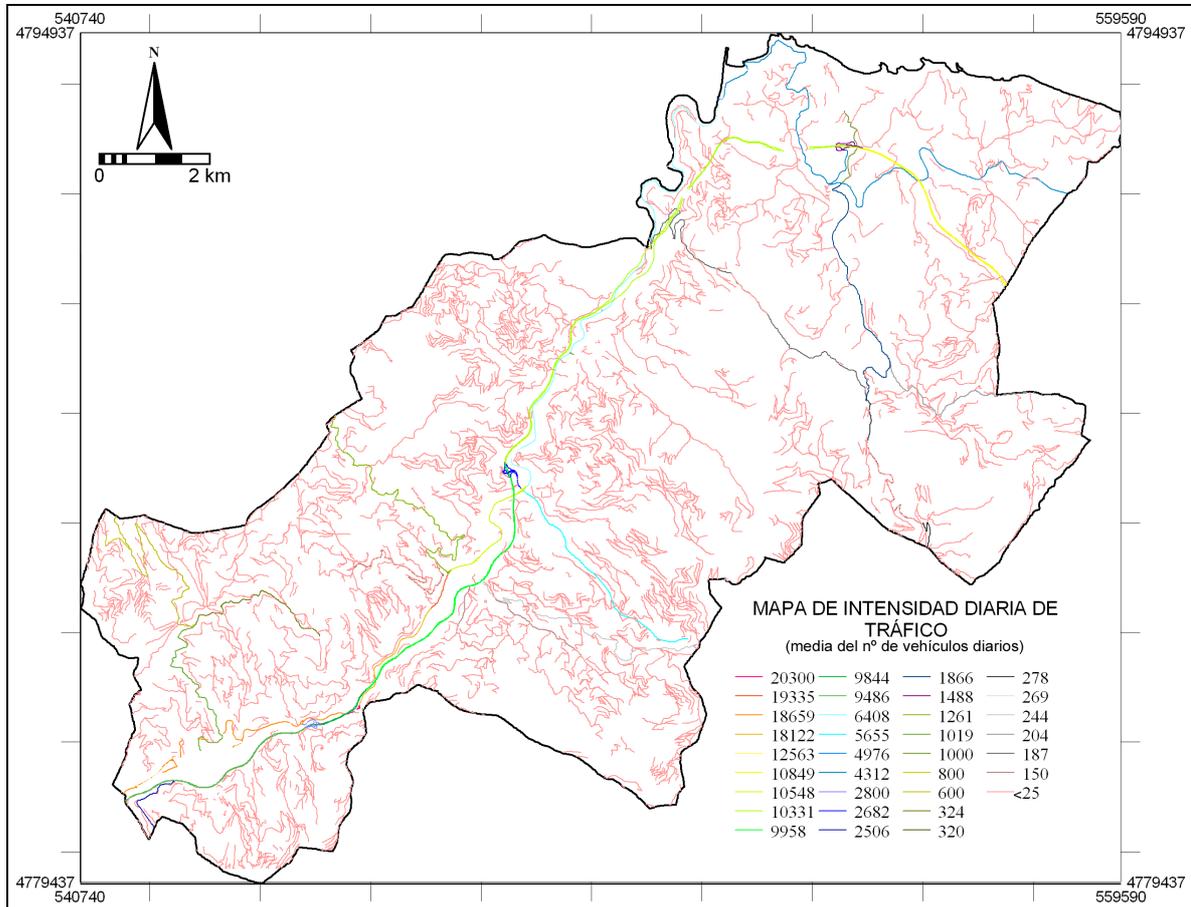
**Figura 6.23.** Ejemplo de interrupción de una carretera por causa de un deslizamiento. En unos casos los vehículos quedan bloqueados durante un tiempo hasta que la vía se abra al tráfico, mientras que otros deben tomar un camino alternativo. Estas dos posibilidades dependerán del tipo de vía, de la disponibilidad de vías alternativas, de la magnitud del evento y del tiempo de interrupción.

A partir de los datos obtenidos de eventos pasados se puede estimar el periodo de tiempo que las distintas infraestructuras podrían quedar bloqueadas. La interrupción del tráfico en la autopista suele ser pequeña, ya que lo más habitual es que se habilite uno de los carriles del otro sentido. En carreteras nacionales y regionales la interrupción suele ser mayor puesto que es necesario retirar el material que obstaculiza la vía o bien acondicionar vías alternativas. En las carreteras locales cuando se produce un deslizamiento suelen quedar interrumpidas, dependiendo del lugar, durante periodos de tiempo superiores como consecuencia de las labores de restauración y, dado que el tráfico es escaso en éstas, tampoco existe una rapidez extrema para ponerla otra vez en funcionamiento. El mayor retraso lo sufre el ferrocarril, debido a que el acceso a la zona es más difícil y, hasta que no se retira el material o se realizan labores de reparación la línea no vuelve a entrar en servicio.

De esta forma, para cada tipo y sector de infraestructura se pueden estimar las pérdidas potenciales como consecuencia de que en cualquier punto de estos sectores se produzca un deslizamiento y permanezca bloqueada la vía durante un periodo de tiempo determinado, ocasionando el consiguiente retraso en los trabajadores.

Dentro de este tipo de efectos indirectos no se han considerado las pérdidas por retrasos en mercancías (p. ej. productos perecederos), ni tampoco el efecto sobre personas que supuestamente no trabajan, pero que producen riqueza ya que gastan sus ahorros en servicios de distinto tipo, o que sufren pérdidas económicas por retrasos. Tampoco se

consideran los efectos indirectos que se producen incluso a grandes distancias de donde se produce el evento, que en algunos casos pueden ser muy superiores a todos los anteriores (p. ej. industrias que deben parar su producción porque no les ha llegado un determinado material). La incorporación de estos factores al análisis requiere profundizar en algunos aspectos que no se han abordado en el presente trabajo.



**Figura 6.24.** Mapa de intensidad media diaria de tráfico a lo largo de las vías de comunicación existentes en la zona de estudio. Elaboración propia a partir de los datos facilitados por el Departamento de Transportes de la DFG.

### 6.5.3 Estimación del riesgo por deslizamientos

Una vez estimadas la peligrosidad y la vulnerabilidad se pasa a estimar el riesgo. Dentro del riesgo por deslizamientos se ha estimado por un lado, el riesgo directo, y por otro, el riesgo indirecto. En el esquema de la figura 6.25 se muestra el método general de evaluación del riesgo.

#### 6.5.3.1 Estimación del riesgo directo

Utilizando la expresión propuesta por Varnes (1984),  $R = H * E * V$  se integran los modelos presentados anteriormente (peligrosidad, valor de elementos y vulnerabilidad). Esta integración es simple y rápida dado que los diferentes elementos de la expresión están representados en unidades de píxel de 10 x 10 metros, cada uno de los cuales tiene un valor. Así, la *peligrosidad* o amenaza (H) se expresa en valores de 0 a 1 (o de 0-100%), para el lapso de tiempo estudiado; los *elementos expuestos* (E) vienen expresados por su valor económico en €; la *vulnerabilidad* (V) se expresa en valores de 0 a 1. De esta forma el Riesgo (R) se expresa directamente en términos monetarios (€/píxel) para el periodo de tiempo estudiado (50 ó 10 años), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo}_{(\text{€/píxel/tiempo})} = \text{Peligrosidad}_{(0-1/\text{tiempo})} * \text{Valor del Elemento}_{(\text{€})} * \text{Vulnerabilidad}_{(0-1)}$$

Si en la anterior expresión se sustituye la vulnerabilidad por la expresión de la que procede (Pérdidas/Valor del elemento), el valor de riesgo así obtenido es equivalente a multiplicar las pérdidas por la peligrosidad y, por tanto, no sería necesario utilizar el mapa de vulnerabilidad, ya que sólo se necesitaría un mapa de “pérdidas específicas”.

Para cada tipo de elemento considerado, se obtienen diferentes modelos de riesgo, tantos como escenarios de peligrosidad propuestos. Así se obtienen modelos de riesgo específico para infraestructuras ( $R_{\text{infra}}$ ), usos del suelo ( $R_{\text{usos}}$ ) y edificios ( $R_{\text{edificios}}$ ). La suma de estos modelos constituye lo que se denomina modelo de riesgo directo (**RD**), que representará las pérdidas esperables en los próximos años como consecuencia de la afectación de esos elementos por los deslizamientos. El modelo de riesgo directo que se obtiene mostrará las pérdidas por píxel para los distintos elementos.

De forma adicional, y dado que la evaluación de riesgos por deslizamientos incluye diferentes tipos de movimientos, con distintas magnitudes y frecuencias, para la obtención del riesgo global sobre un elemento, se deberían integrar diferentes escenarios de peligrosidad con sus correspondientes vulnerabilidades. La expresión que muestra ese riesgo (Chung & Fabbri, 2005) quedaría representada por:

$$\text{Riesgo} = E * (1 - (1 - V_1 H_1)(1 - V_2 H_2) * \dots * (1 - V_m H_m))$$

donde:

E es la probabilidad de que el valor económico se pierda en el futuro,

$H_{1,2,\dots,m}$  es la probabilidad de que se produzca un deslizamiento m de características determinadas en cuanto a tipo, magnitud y frecuencia,

$V_{1,2,\dots,m}$  son los correspondientes valores de vulnerabilidad para cada tipo de elemento y magnitud de deslizamiento.

Esta misma expresión podría aplicarse en el caso de que se evaluaran distintos tipos de riesgo (inundaciones, subsidencia, deslizamientos, etc.)

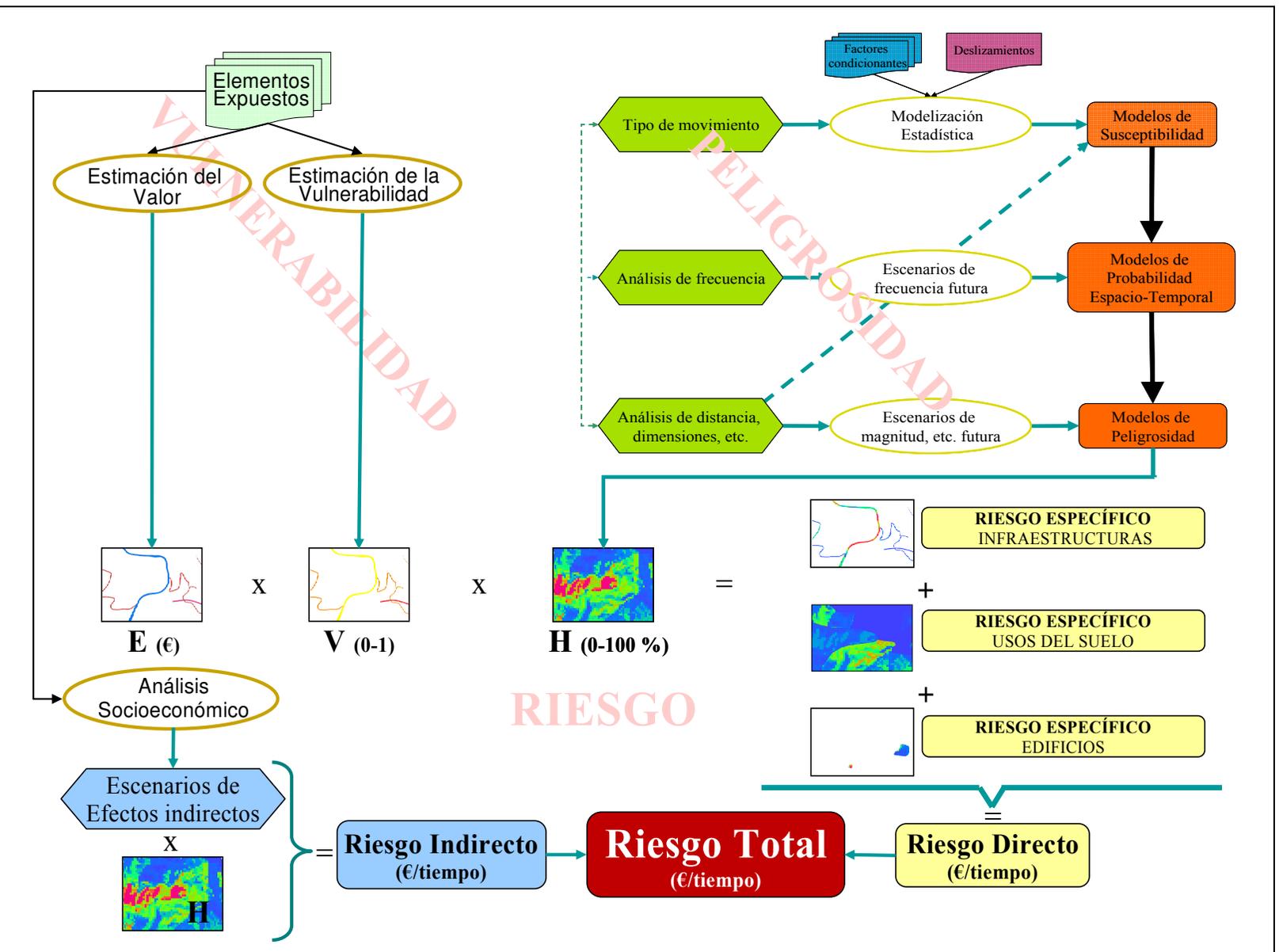


Figura 6.25. Esquema metodológico que muestra el procedimiento de evaluación del riesgo.

### 6.5.3.2 Estimación del riesgo indirecto

Por otro lado y, tal como se ha explicado con anterioridad, con un significado diferente, se genera un modelo de riesgo indirecto (**RI**) que, para los escenarios planteados, tiene en cuenta las pérdidas indirectas ocasionadas por los deslizamientos sobre las actividades económicas al producir interrupciones en el tráfico. En función del escenario de peligrosidad considerado, cada sector de vía presenta un riesgo para los próximos años representado por la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo indirecto} = \text{Peligrosidad} * \text{Pérdidas potenciales indirectas}$$

El modelo de riesgo indirecto, por tanto, será el producto de esas pérdidas indirectas por el modelo de peligrosidad obtenido para cada escenario.

La representación gráfica de este modelo no tiene el mismo significado que el modelo de riesgo directo, donde cada píxel tiene unas determinadas pérdidas, ya que las pérdidas indirectas se originan, pero no se localizan, dentro del píxel afectado, porque los efectos económicos tienen lugar en otros puntos, distribuidos de manera difusa por un territorio que puede ser muy amplio.

### 6.5.3.3 Estimación del riesgo total

Finalmente, se obtiene un modelo de riesgo total (**RT**), que será la suma del modelo de riesgo directo y del modelo de riesgo indirecto. Para cada escenario de peligrosidad se tendrá:

$$\text{RT} = \text{RD} + \text{RI} = (\text{R}_{\text{infra}} + \text{R}_{\text{usos}} + \text{R}_{\text{edificios}}) + \text{RI}$$

El modelo generado dará información de las pérdidas totales esperables en el futuro como consecuencia de un determinado tipo de movimiento, así como la distribución de éstas por píxel.

Los valores de riesgo que se obtienen con este procedimiento deberían considerarse como aproximaciones a lo que podría pasar en el futuro y no como una predicción exacta, puesto que se supone que el comportamiento del proceso será similar al que tuvo lugar en el pasado, lo cual puede que no sea exactamente así. Las pérdidas obtenidas a través de la aplicación de los modelos tienen el carácter de ser estimaciones conservadoras o “a la baja” ya que, como se ha indicado anteriormente, hay ciertos tipos de daños indirectos (potencialmente importantes) que no se han considerado en el análisis. Por otro lado, tampoco se considera el más que probable incremento del número de elementos en riesgo en el futuro. Sin embargo, el método propuesto proporciona una idea del orden de magnitud de las pérdidas y permite identificar las áreas hacia las que dirigir, de manera prioritaria, los esfuerzos de prevención, así como planificar estrategias de ordenación del territorio para evitar situar elementos en zonas peligrosas, o bien desarrollar medidas que ayuden a reducir el riesgo.