

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 7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el capítulo precedente se han descrito la metodología, procedimientos y técnicas destinados al cálculo de la susceptibilidad, peligrosidad, elementos expuestos, vulnerabilidad y riesgo relacionados con los deslizamientos. En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos a través de la aplicación del procedimiento en la zona de estudio.

Por lo que respecta a la susceptibilidad, a partir de la información sobre los factores condicionantes, de los inventarios de deslizamientos superficiales existentes (pre-1991 y 1991-1997), y del inventario realizado para este trabajo (1997-2001), se ha generado aproximadamente una veintena de modelos de susceptibilidad. Del conjunto de los modelos generados se ha seleccionado el que mejor capacidad de predicción muestra, como base para elaborar los modelos de peligrosidad. Los intervalos cronológicos citados están condicionados por la disponibilidad de fotografías aéreas, correspondientes a las fechas señaladas.

Para evaluar la peligrosidad, se han utilizado los datos de frecuencia de los movimientos ocurridos en el municipio de Deva durante el periodo 1954-2001, lo que ha permitido realizar extrapolaciones sobre el comportamiento futuro de los movimientos en toda la zona de estudio, así como generar diferentes modelos de peligrosidad.

La vulnerabilidad de los distintos elementos expuestos se ha estimado a partir del análisis de los daños producidos sobre estos elementos por el tipo de movimiento estudiado, en función de una serie de situaciones consideradas como más probables a partir del análisis retrospectivo.

El modelo de “riesgo específico” para cada elemento considerado se ha generado a través de la integración de los modelos de peligrosidad, valor del elemento expuesto y vulnerabilidad. La suma de estos modelos de riesgo específico ha permitido obtener modelos de riesgo directo. Por último, se presentan los resultados de la estimación de pérdidas indirectas debidas a deslizamientos, que ayudan a generar un modelo de riesgo total para los próximos años en el área del Bajo Deva.

7.1 Resultados en relación con la susceptibilidad

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en relación con la susceptibilidad o propensión del terreno a experimentar deslizamientos. En primer lugar, se han estudiado los deslizamientos y su posible relación con los factores desencadenantes y condicionantes. Posteriormente se han elaborado diversos modelos de susceptibilidad, utilizando varios procedimientos y funciones, a fin de seleccionar el más adecuado para evaluar la peligrosidad.

7.1.1 Relación de los deslizamientos con los factores desencadenantes

La cartografía de deslizamientos ocurridos en el pasado es indispensable para determinar qué zonas pueden sufrir deslizamientos en el futuro. El inventario de deslizamientos realizado para toda la zona (es decir, para los cuatro municipios considerados: Deva, Mendaró, Elgoibar y Eibar) por Remondo (2001) permitió identificar 532 movimientos superficiales en el periodo anterior a 1991 y 906 deslizamientos en el periodo 1991-1997. Posteriormente, en este trabajo se han cartografiado 131 deslizamientos, los cuales han ocurrido durante el periodo 1997-2001. La calidad y fiabilidad de estos inventarios es determinante para la obtención de modelos probabilísticos de susceptibilidad y peligrosidad de deslizamiento con cierta capacidad de predicción, y para la evaluación ulterior de la vulnerabilidad y del riesgo.

A pesar de que en trabajos anteriores (Remondo, 2001; Remondo et al., 2005c), el análisis de la ocurrencia temporal mostraba la existencia de un claro incremento en la frecuencia de deslizamientos, de aproximadamente un orden de magnitud, en el periodo 1954-1997, se ha observado que esta frecuencia ha disminuido durante el último periodo estudiado (1997-2001) tanto en el municipio de Deva, donde se dispone de un inventario temporal detallado (Tabla 7.1), como en el resto de los municipios del área de estudio. La disminución del número de movimientos observada en esos cuatro años es similar a la que ya se produjo en el periodo 1985-1991 en el municipio de Deva (Tabla 7.1), por lo que con la información hasta ahora disponible es difícil establecer tendencias de comportamiento futuro.

Tabla 7.1. Número y frecuencia de deslizamientos en el municipio de Deva en el periodo estudiado (modificado de Remondo, 2001).

Intervalo de tiempo	Nº de deslizamientos	Nº deslizamientos/año
1954-1970	109	6,8
1970-1983	104	8
1983-1985	141	70,5
1985-1991	133	22,2
1991-1993	95	47,5
1993-1997	223	55,8
1997-2001	57	14,3
Total	862	18,3

Algunas de las causas que podrían explicar la disminución del número de eventos en el último inventario podrían explicarse, en parte, a que el método de cartografía utilizado para el último inventario difiere respecto al utilizado para realizar los inventarios anteriores, por lo que se han podido cometer errores en la identificación de determinados movimientos, tanto por sobreestimar como por infravalorar el número de deslizamientos. Mientras que en los dos primeros inventarios los deslizamientos se cartografiaron mediante la interpretación de pares estereoscópicos y se comprobaron posteriormente en el campo, el último inventario se realizó mediante la interpretación de la ortofoto de 2001 y posterior comprobación de la presencia o ausencia de cada deslizamiento en la foto aérea de 1997. El uso de métodos diferentes de identificación de movimientos y la utilización de imágenes con muy distinta resolución (por ejemplo la ortofoto tiene una gran resolución, con píxeles de 22,5 centímetros), podrían explicar, en parte, esa disminución en el número de eventos identificados.

Otra posible causa podría ser la tendencia decreciente de las precipitaciones y/o del número de tormentas con intensidades diarias superiores a 50 milímetros que se muestra en la Figura 7.1. Dicha figura presenta los datos de precipitación de la estación de Aixola, situada

en el Alto Deva (muy próxima a la zona de estudio) y con registro continuo de datos desde 1990 hasta la actualidad. Se observa que entre 1990 y 1996 se produce un incremento de las precipitaciones, mientras que a partir de esa fecha hay una clara tendencia a la disminución de las mismas, sobre todo de aquellas con precipitaciones superiores a los 50 mm. Además, como también puede apreciarse en la citada figura, las mayores precipitaciones coinciden con la máxima frecuencia de deslizamientos. Aunque esto no es concluyente, puede dar una idea del efecto de la lluvia sobre este proceso en la zona. Según algunos autores (Duque et al., 1991; Remondo et al., 2005c), la mayoría de los deslizamientos de la zona han ocurrido u ocurren durante, o inmediatamente después de intensas lluvias, como sucedió durante las tormentas de agosto de 1983, las cuales desencadenaron un gran número de movimientos.

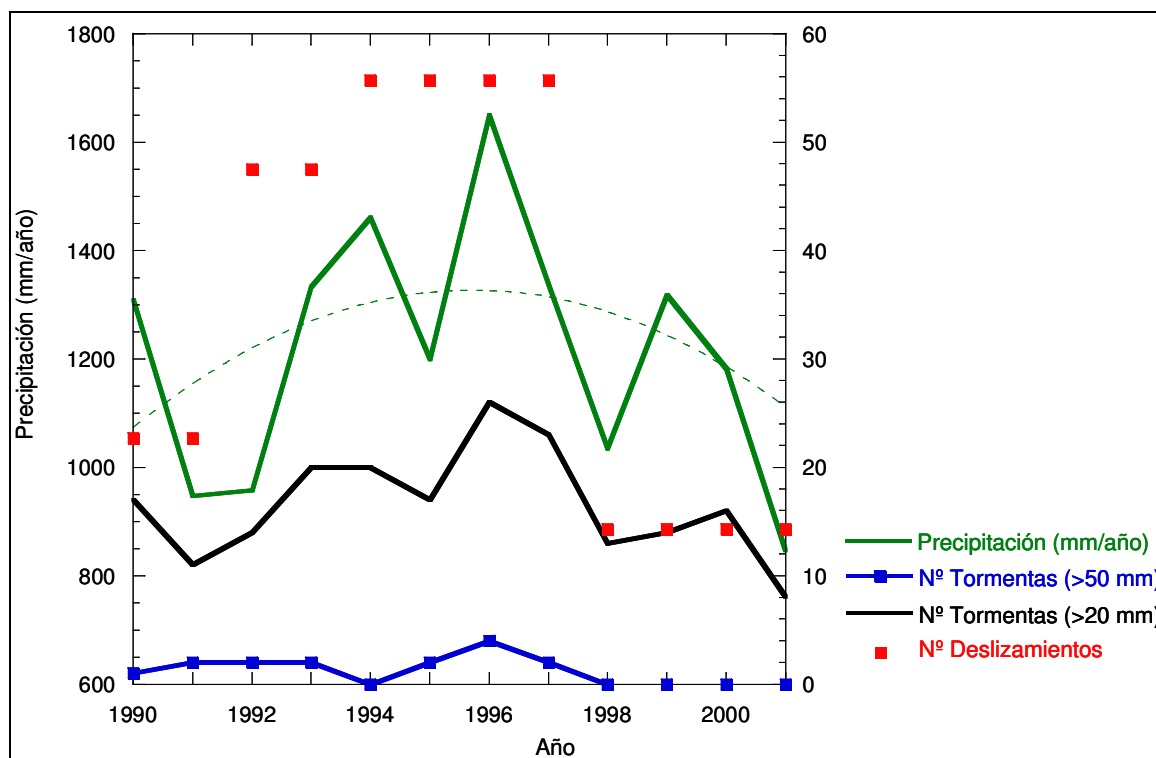


Figura 7.1. Datos de precipitación y tormentas de la estación de Aixola (Alto Deva) durante el periodo 1990-2001, frente a número de deslizamientos producidos en el Bajo Deva. En el caso de los deslizamientos no hay datos anuales, por lo que se ha representado la media anual para los diferentes periodos (de duración desigual) comprendidos en el intervalo analizado.

En la Figura 7.2 se observan tres deslizamientos producidos en una pequeña cuenca del municipio de Deva, en diciembre de 2002 después de una semana con precipitaciones acumuladas de 200 milímetros e intensidades máximas diarias entre 20 y 50 milímetros (Departamento para el Desarrollo Sostenible, 2005).

También conviene tener en cuenta que los lapsos de tiempo que se han considerado son diferentes. En el primer inventario realizado, el lapso de tiempo abarcado es de 37 años (desde 1954 a 1991); en el segundo inventario el intervalo temporal analizado es de 6 años (desde 1991 a 1997), mientras que en el tercer inventario sólo se engloban 4 años (desde 1997 a 2001). Si, por cualquier circunstancia, posteriormente al 2001 (como sucedió en 2002) se produjesen precipitaciones intensas, ese número de deslizamientos podría incrementarse. Sería, por tanto, interesante estudiar posteriores intervalos de tiempo con el fin de obtener una muestra estadística más completa.

En la Tabla 7.2 se muestra el número de deslizamientos inventariados en los cuatro municipios de la zona de estudio, en los tres intervalos temporales, así como los porcentajes de movimientos existentes por municipio. Se observa que casi la mitad de los deslizamientos existentes en el Bajo Deva, ocurren en el municipio de Deva, mientras que el municipio menos afectado es el de Mendaro.

En la variación de la frecuencia temporal de los deslizamientos han podido también influir causas antrópicas como los cambios experimentados en el tiempo por los usos del terreno.

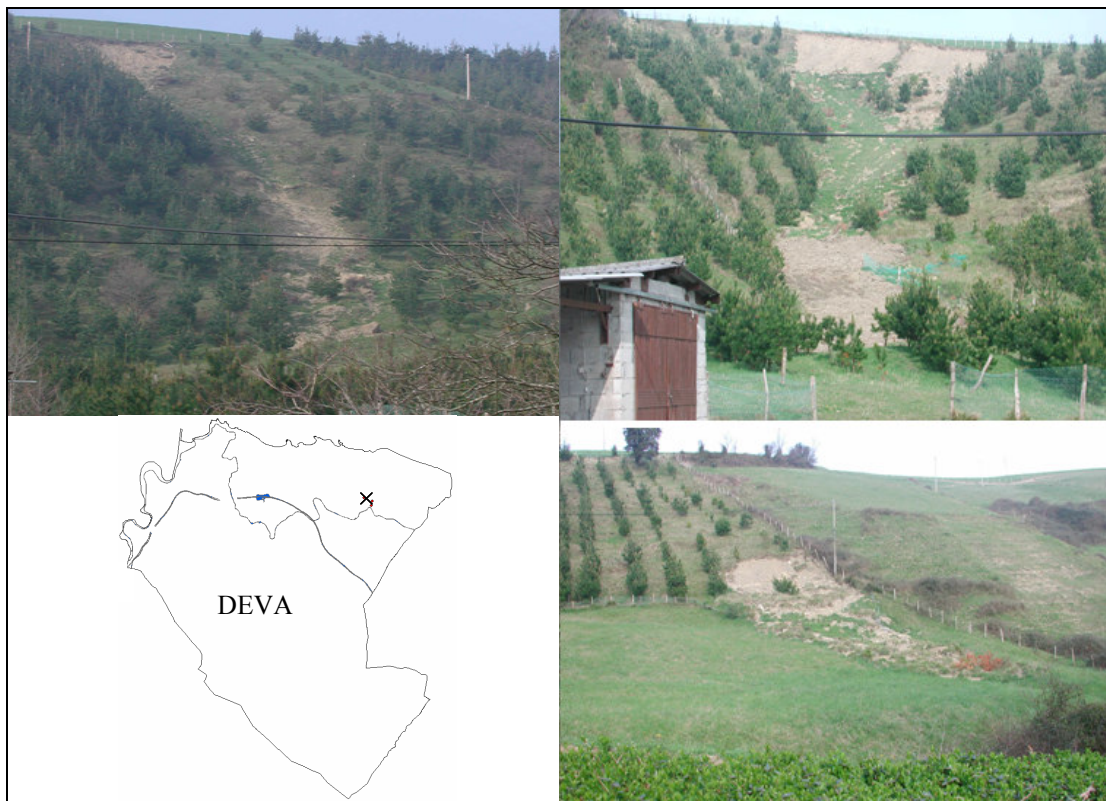


Figura 7.2. Ejemplo de deslizamientos originados tras unas intensas precipitaciones en una pequeña cuenca del municipio de Deva.

Remondo et al. (2005c), han presentado datos sobre las relaciones, tanto directas como indirectas, entre deslizamientos y actividad humana en la zona e indican que un aumento de los deslizamientos es, probablemente, un reflejo del incremento y presión de la actividad humana sobre el territorio, más que una intensificación de los factores desencadenantes naturales. Este hecho, a mayor escala (nacional y mundial) ha sido puesto de manifiesto por Cendrero et al. (2006), observándose una cierta relación entre incremento del Producto Interior Bruto (PIB) y el aumento de deslizamientos y/o de otros procesos naturales. Sin embargo, esta relación no se cumple en el último periodo analizado en la zona de estudio, ya que se ha identificado un menor número de movimientos y, no obstante, el PIB de la zona ha seguido aumentando. Una posible explicación a esta aparente contradicción, podría ser achacable al cambio de usos del suelo que se está produciendo en los últimos años en la zona de estudio; las zonas de prados, muy propensas a sufrir deslizamientos, están siendo abandonadas y las repoblaciones forestales están ocupando su lugar. Los datos del último inventario forestal realizado por el Gobierno Vasco en 2005, muestran una disminución de la superficie dedicada a prados del 13%, respecto al inventario de 1996; mientras que la superficie forestal y las zonas de pastizales se han visto incrementadas en un 7% y en un 3,5%, respectivamente. También porque en las zonas de bosque el número de

deslizamientos es menor, bien porque las raíces sujetan la cobertera superficial impidiendo que ésta deslice, o bien porque la identificación de movimientos es mucho más difícil, dado el tamaño medio de éstos, que ronda los 500 m².

Tabla 7.2. Deslizamientos superficiales inventariados en el Bajo Deva por municipio para los distintos periodos estudiados y porcentajes respecto al total, y porcentaje medio de deslizamientos por municipio para todo el periodo.

Municipio	Nº movimientos (1954-1991)	Nº movimientos (1991-1997)	Nº movimientos (1997-2001)	% medio de deslizamientos por municipio
Deva	258 (48,5%)	478 (52,7%)	57 (43,5%)	48,2
Mendaro	46 (8,6%)	67 (7,4%)	16 (12,2%)	9,4
Elgoibar	134 (25,2%)	184 (20,4%)	26 (19,8%)	21,8
Eibar	94 (17,7%)	177(19,5%)	32 (24,5%)	20,6
Total	532	906	131	100

En resumen, los datos presentados refuerzan la idea de la importancia de las lluvias intensas como principal agente desencadenante inmediato de los deslizamientos superficiales en la zona de estudio. Sin embargo, no confirman la tendencia al aumento de la frecuencia de los deslizamientos en respuesta al crecimiento del PIB. Esto puede deberse simplemente a que el nuevo periodo analizado es demasiado corto, o bien porque el aumento del PIB ha venido acompañado de una tendencia a la extensión de las zonas cubiertas por arbolado, así como una mayor aplicación de medidas de mitigación (pedraplenes en zonas sensibles). Esto sugiere que la posible relación entre actividad económica e intensidad de los procesos geomorfológicos sugerido en trabajos anteriores (Remondo et al., 2005c; Cendrero et al., 2006) podría “desacoplarse” a través de medidas preventivas adecuadas, o bien que la acción humana indirecta pudiera no ser un factor preparatorio tan decisivo como los datos anteriores indicaban.

7.1.2 Relación de los deslizamientos con los factores condicionantes

Los factores condicionantes utilizados para el análisis se han comentado en el capítulo anterior pero se enumeran, a modo de recordatorio, aquí. Las variables ensayadas han sido: litología, usos del suelo, espesor de regolito, elevación, pendiente, orientación, insolación, distancia a fallas y distancia a cauces de agua.

Remondo (2001), comprobó que algunas de las variables utilizadas en la generación de modelos introducían pocas mejoras en los modelos de susceptibilidad obtenidos y que con un grupo reducido de variables (por ejemplo: altitud, pendiente, orientación, litología, usos del suelo y espesor de regolito) se obtenían prácticamente los mismos resultados que si se incorporaban otras más. Por eso, antes de realizar ensayos predictivos con todas las variables propuestas se ha procedido a realizar un estudio sistemático de las variables mediante un análisis bivariable entre cada serie de deslizamientos y cada una de las posibles variables a tener en cuenta. Dicho análisis ha puesto de manifiesto las relaciones existentes entre los deslizamientos ya ocurridos y cada una de las variables que se supone condicionó su aparición. De esta forma se han obtenido las funciones de distribución de frecuencia normalizada de cada una de las variables, o factores condicionantes considerados en el análisis, con respecto a la presencia-ausencia de deslizamientos (zona deslizada/zona no deslizada). La “likelihood ratio” o relación de frecuencias de distribución, expresa la propensión a la aparición de deslizamientos, en relación con la variable considerada. La Figura 7.3 presenta tanto las funciones de distribución de frecuencia como las funciones de relación entre ambas frecuencias, de acuerdo con el inventario de deslizamientos 1991-

1997. Como regla general, cuanto mayor asimetría haya entre ambas curvas, mayor será la relación de la variable con los deslizamientos y, evidentemente, cuanto mayor diferencia muestre el valor de la “likelihood ratio” para una variable, mayor será la capacidad discriminante de los distintos valores de la variable. En dicha figura se aprecia que:

- Por lo que respecta a la variable elevación (altitud), hay una mayor frecuencia de deslizamientos entre los 30 y los 250 metros de altitud, aproximadamente (Figura 7.3a). Esa diferencia se observa de forma más marcada en la función de relación de frecuencias. Dicha mayor frecuencia de eventos podría deberse a que es en estas altitudes donde se sitúan la mayor parte de praderas, con mayor propensión a deslizarse. A partir de esa altitud el número o frecuencia de deslizamientos disminuye drásticamente, dado que a niveles superiores predominan zonas de macizos calcáreos o zonas de bosque.
- Las orientaciones (Figura 7.3b) no parecen ser un factor muy significativo. Se aprecia una tendencia a mayor número de deslizamientos en las orientaciones de componente Sur, lo cual podría deberse a que son zonas que sufren mayores oscilaciones en la humedad de la capa superficial, por estar más expuestas a ciclos humectación-desecación.
- También se puede observar que existe un fuerte incremento de los deslizamientos en pendientes de entre 15 y 38°, siendo mucho menos abundantes a partir de estos valores (Figura 7.3c). La escasez de deslizamientos en pendientes más acusadas puede deberse, por un lado, a la ausencia de regolito y, por otro lado, a que en dichas pendientes la cobertera arbórea es mucho más frecuente que las praderas.
- Tampoco la insolación (Figura 7.3d) parece ser un factor importante, aunque hay una leve diferencia a favor de las zonas con menor insolación; esto es, más húmedas. Sin embargo, esto estaría en aparente contradicción con lo comentado para las orientaciones, aunque ambas variables no son equiparables.
- La distancia a fallas no resulta discriminante ya que las curvas son similares, sobre todo en las zonas más próximas a las fracturas (Figura 7.3e). Se aprecia en la “likelihood ratio” unos picos para valores superiores a 800 metros, que probablemente son artefactos derivados del pequeño número de píxeles a esas distancias, ya que no tienen ninguna explicación coherente en relación con esta variable. Estos datos concuerdan con el hecho de que la actividad sísmica no ha sido un factor desencadenante significativo en la zona durante el periodo cubierto por este análisis.
- Por otro lado, cabría esperar que en las proximidades de los cauces de los ríos los deslizamientos fuesen más numerosos, bien por socavamiento o bien porque las oscilaciones del nivel freático afecten a la discontinuidad regolito-substrato. Sin embargo, los datos de la figura 7.3f muestran que a muy cortas distancias (menos de 50 metros) esto no parece producirse, a pesar que en estas zonas los valles son muy cerrados y presentan fuertes pendientes. En cambio, se observa una mayor frecuencia de movimientos en distancias entre los 50 y 550 metros. Esto no parece que pueda estar relacionado con la proximidad a los cauces, sino con algún otro factor.

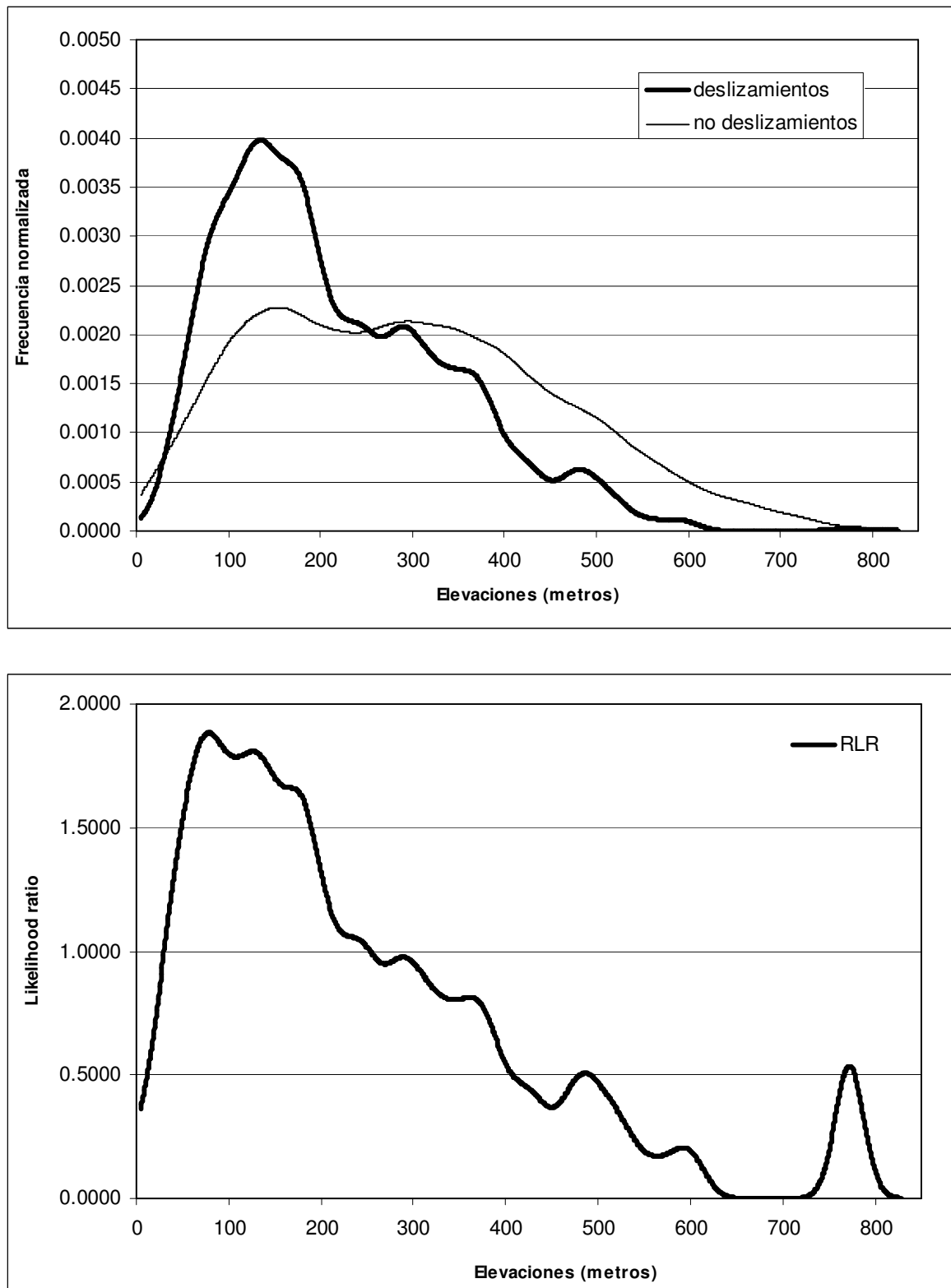


Figura 7.3a. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable elevaciones, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable elevaciones (abajo).

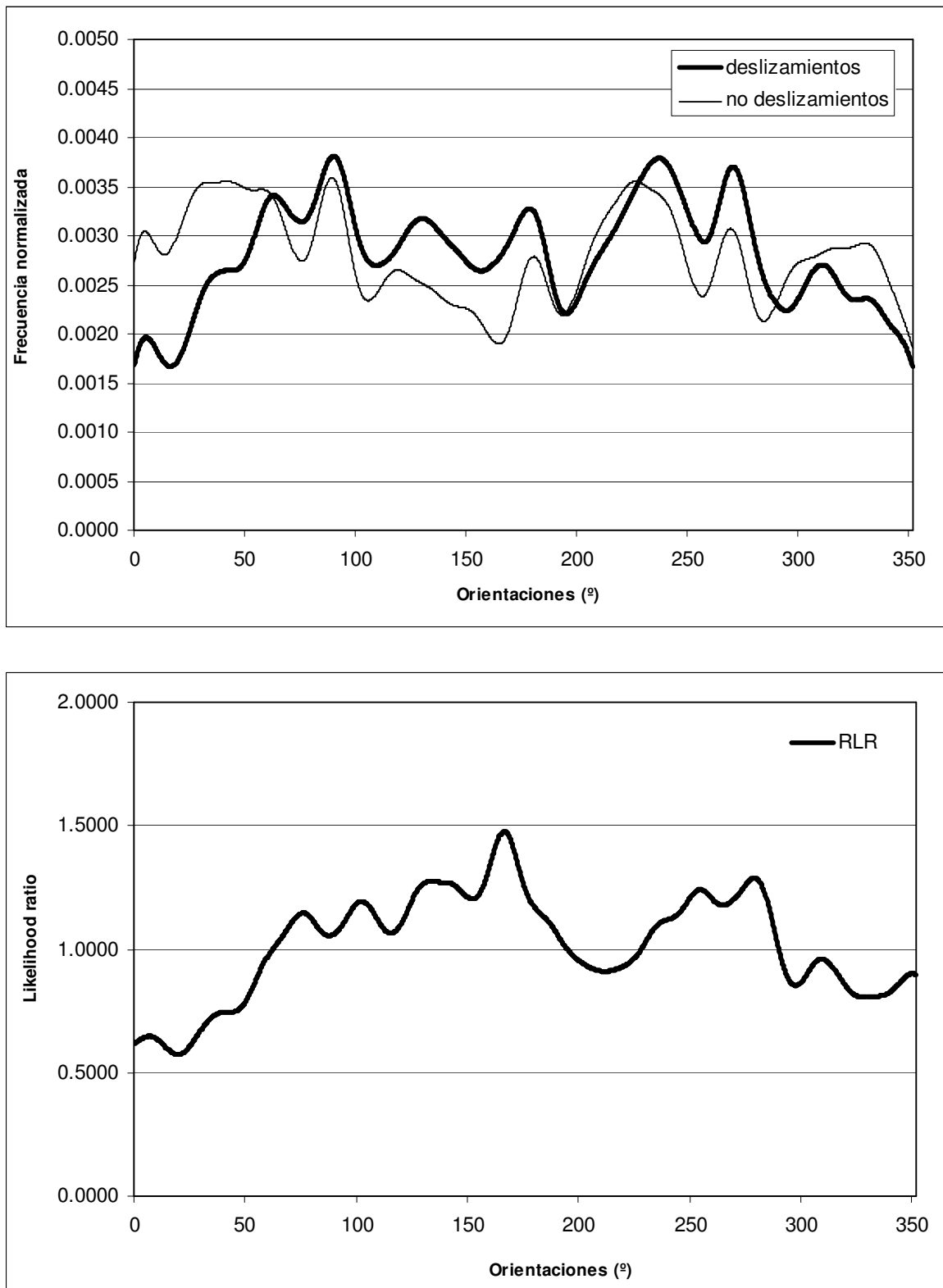


Figura 7.3b. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable orientaciones, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable orientaciones (abajo).

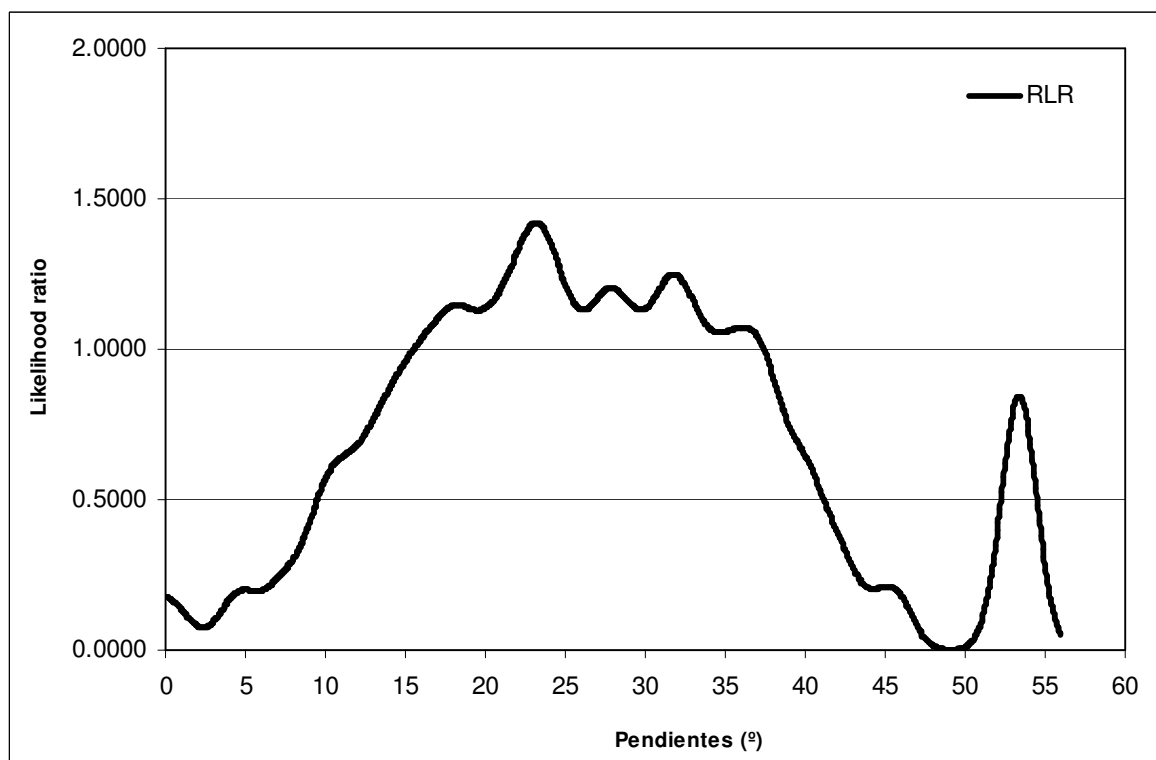
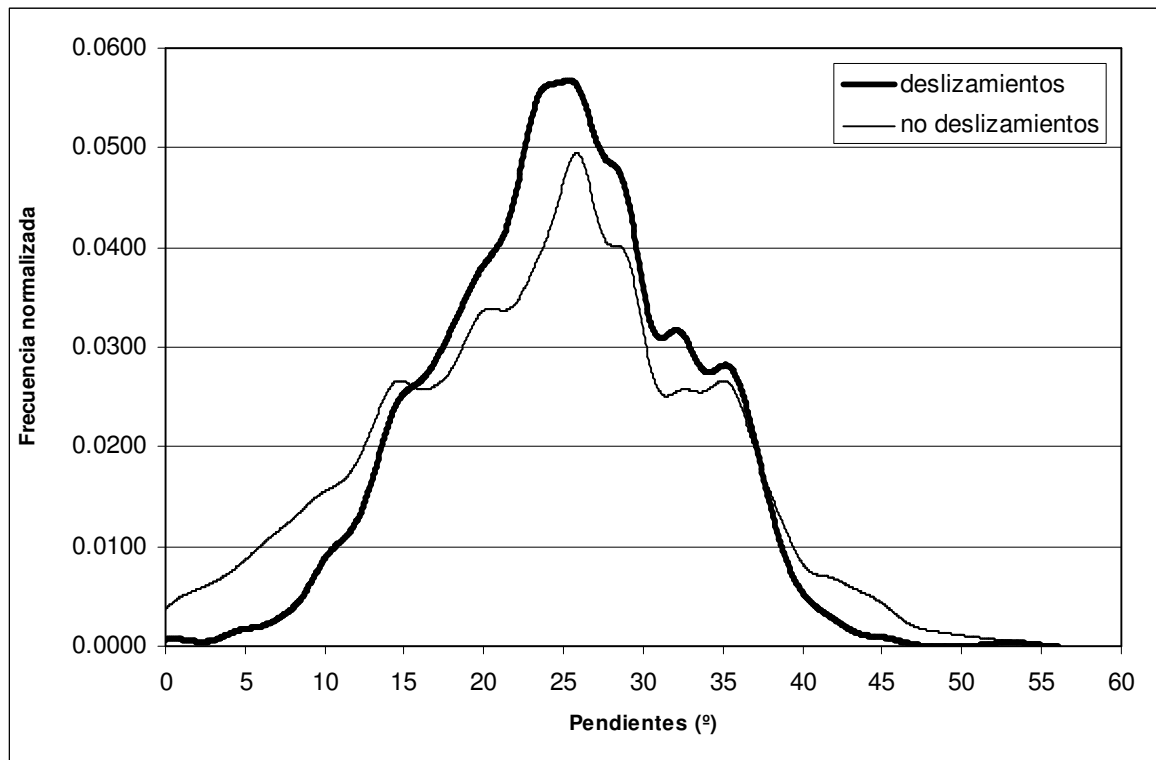


Figura 7.3c. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable pendientes, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable pendientes (abajo).

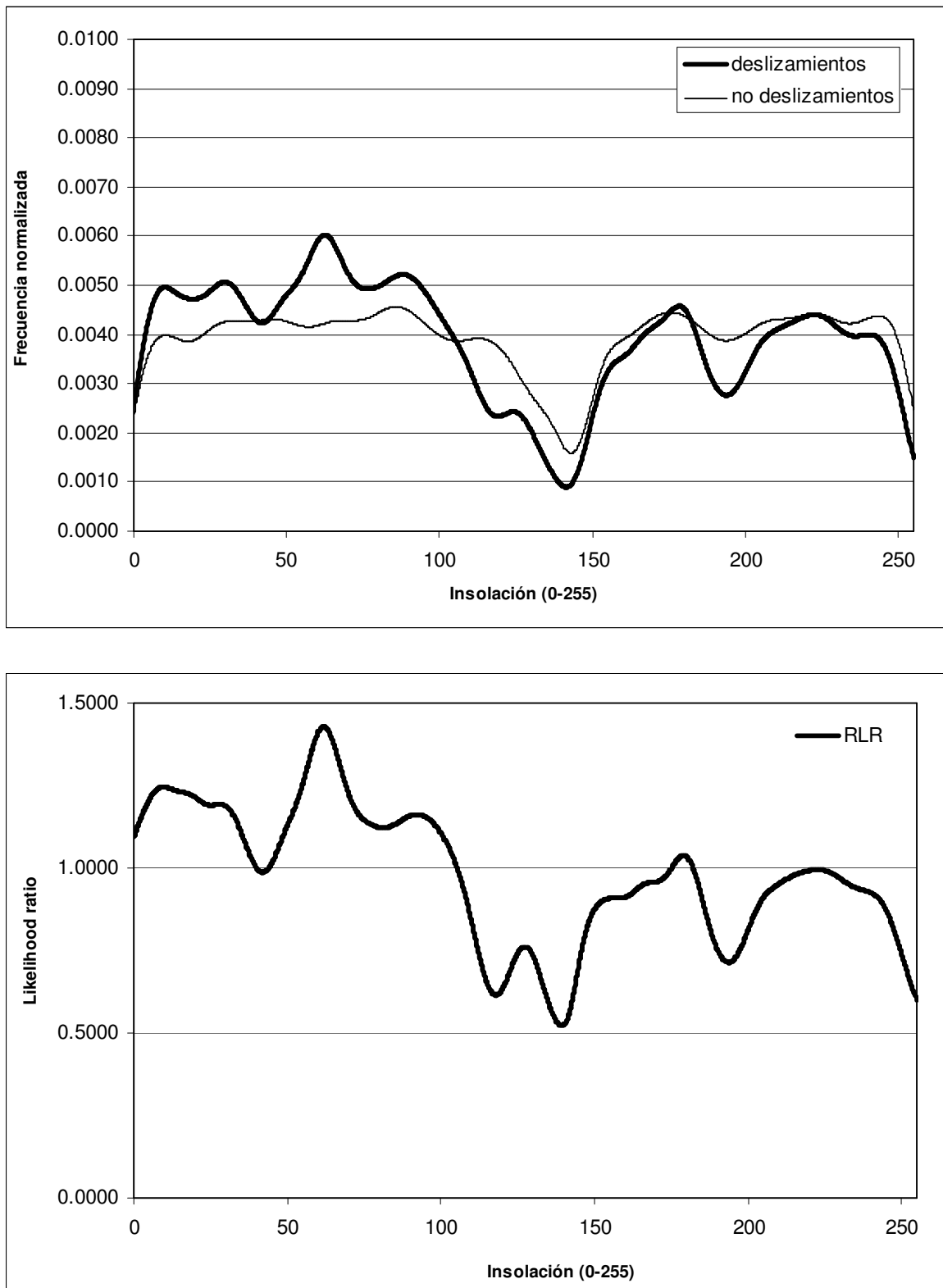


Figura 7.3d. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable insolación, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable insolación (abajo).

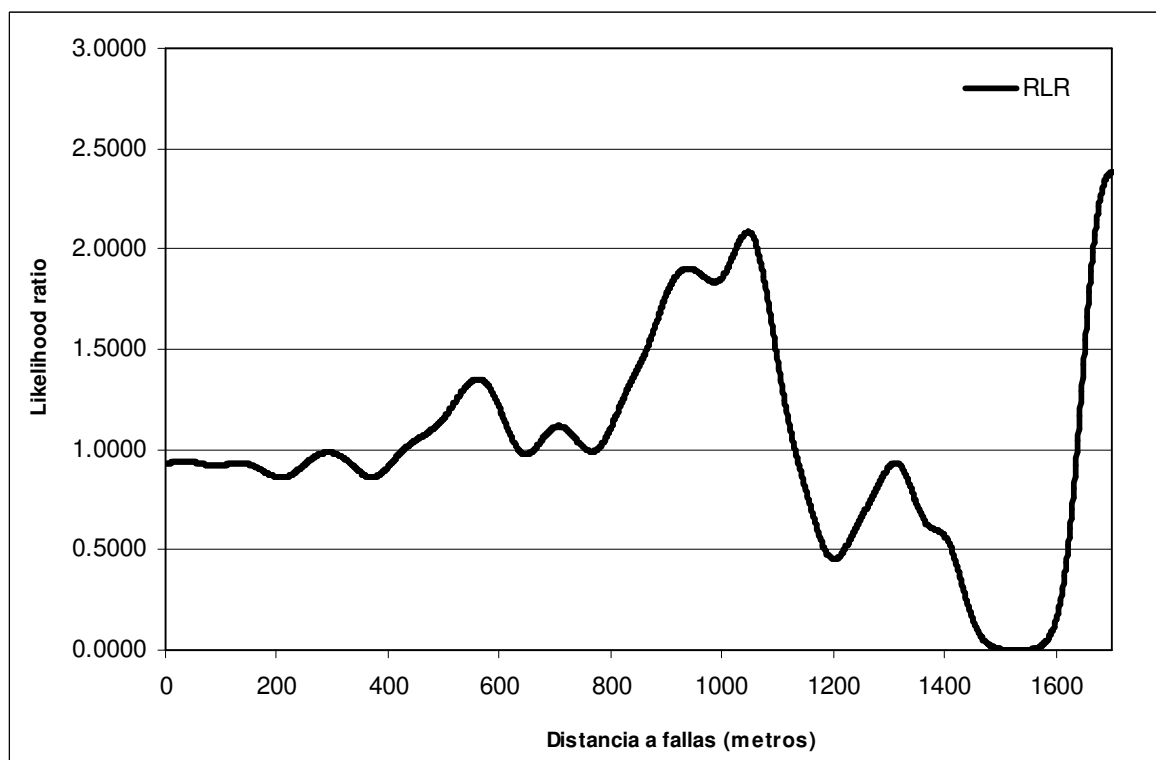
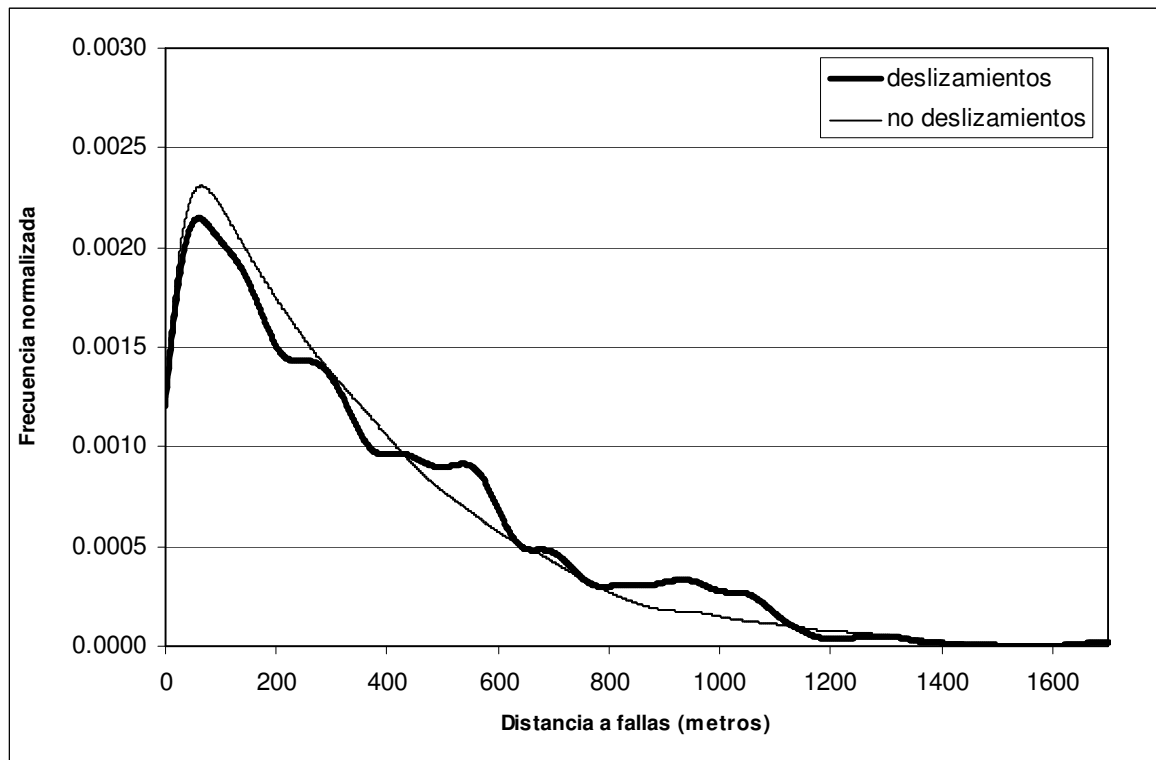


Figura 7.3e. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable distancia a fallas, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable distancia a fallas (abajo).

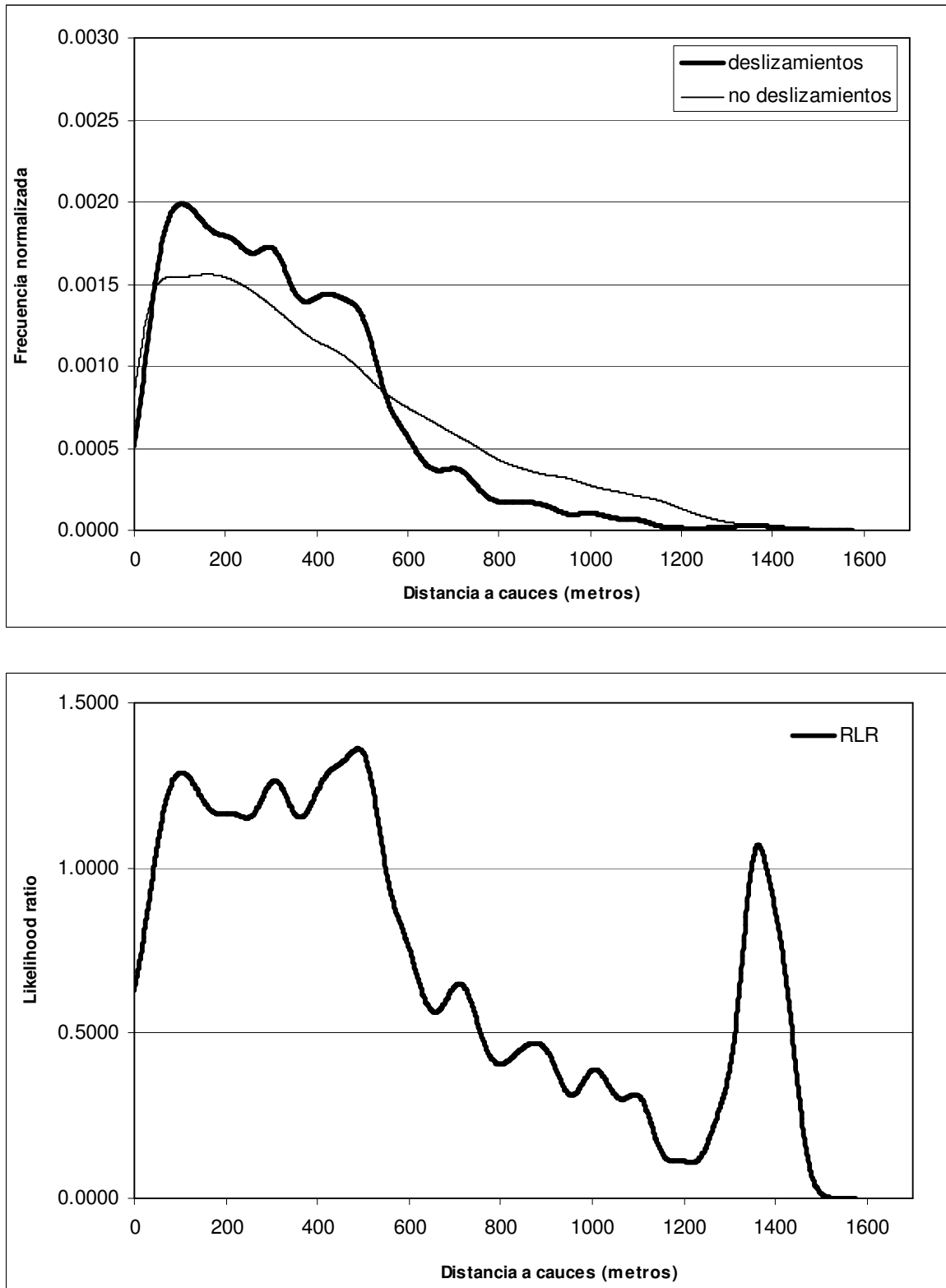


Figura 7.3f. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable distancia a cauces, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable distancia a cauces (abajo).

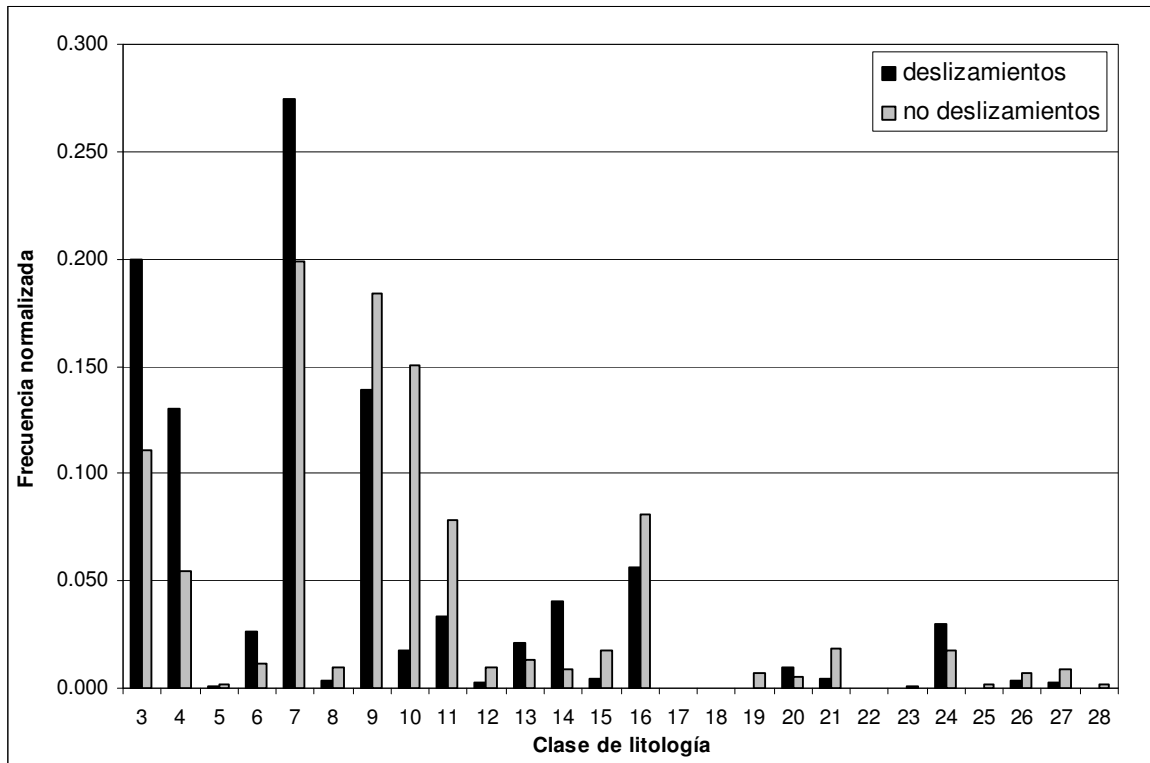
- En el caso de las variables categóricas el significado de la función es, evidentemente, distinto que para las variables continuas. En aquéllas se han representado las frecuencias de píxeles con y sin deslizamientos por medio de diagramas de barras (Figura 7.3g, h, i).

En el caso de la litología, parece claro que hay cinco tipos litológicos (Flysch calcáreo, Flysch lutítico, Margocalizas, Gravas mal gradadas y Arenas limosas) claramente más propensos a experimentar deslizamientos (Figura 7.3g).

La pradería y los frutales y viñedos son los usos del suelo que muestran mayor propensión al deslizamiento. Sin embargo, en el caso de los segundos el valor de la función es poco significativo, dada su escasa extensión (Figura 7.3h).

El espesor de regolito (Figura 7.3i) proporciona valores de “likelihood ratio” que tienen una clara explicación. La propensión es muy baja cuando el espesor es menor de 0,5 metros (no hay material deslizable) ó superior a 4 metros (correspondiente en la gran mayoría de los casos a depósitos fluviales, horizontales), siendo más elevada para espesores intermedios, que favorecen la acumulación de agua intersticial y, además, se sitúan, en general, sobre laderas con una cierta pendiente.

De acuerdo con lo anterior, en principio, cabría esperar que el conjunto de las variables mencionadas (elevaciones, pendientes, litología, uso del suelo, espesor de regolito y, en menor medida, orientaciones) resulten de utilidad para elaborar modelos de susceptibilidad. Sin embargo, para determinar con mayor fiabilidad su importancia en la obtención de modelos de susceptibilidad se ha realizado un análisis de la contribución de cada variable a esta susceptibilidad, combinando todas ellas con los deslizamientos incluidos en cada una de las tres series temporales consideradas, tal y como se describe a continuación.



Unidades litológicas: 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.

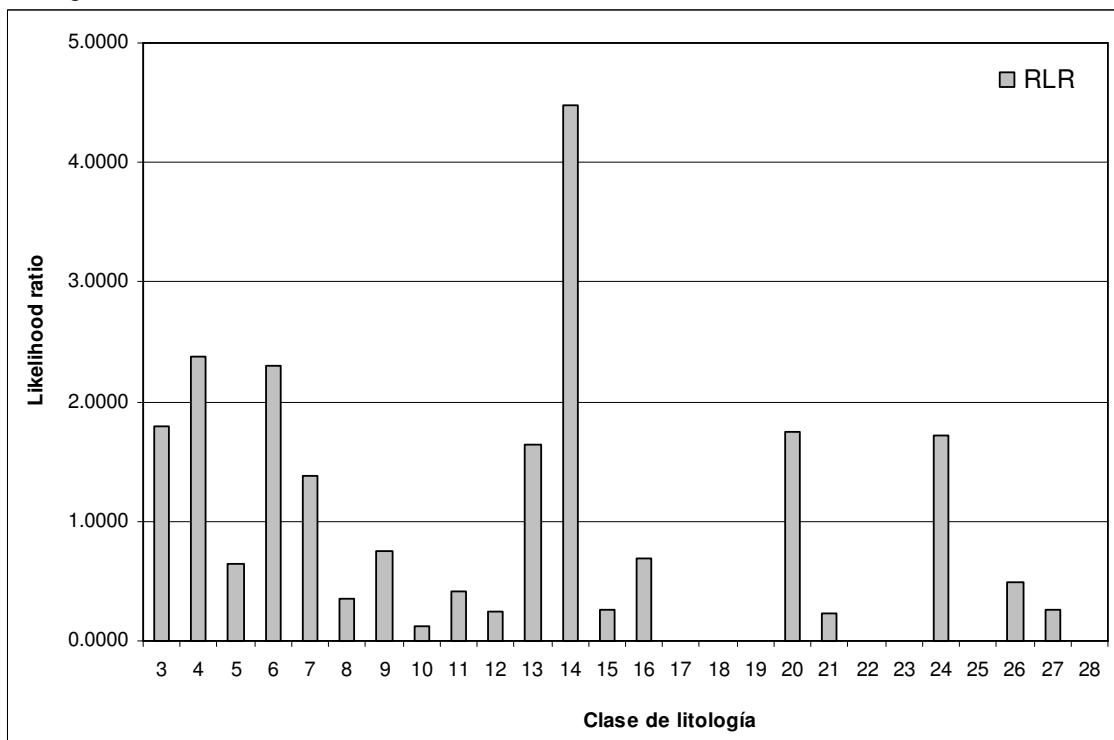
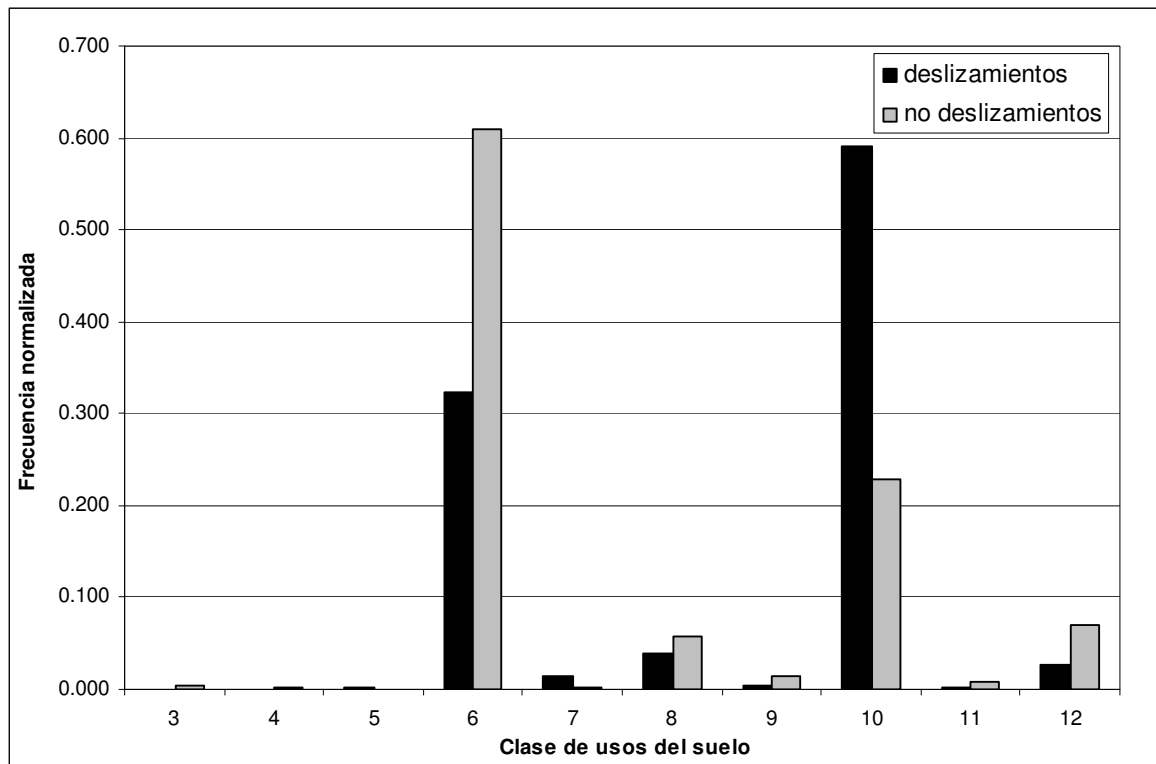


Figura 7.3g. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable litología, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable litología (abajo).



Unidades de usos del suelo: **3:** Agua; **4:** Cantera; **5:** Espinos; **6:** Forestal Arbolado; **7:** Frutales y Viñedos; **8:** Matorral; **9:** Pastizal; **10:** Prado; **11:** Roquedo; **12:** Urbano.

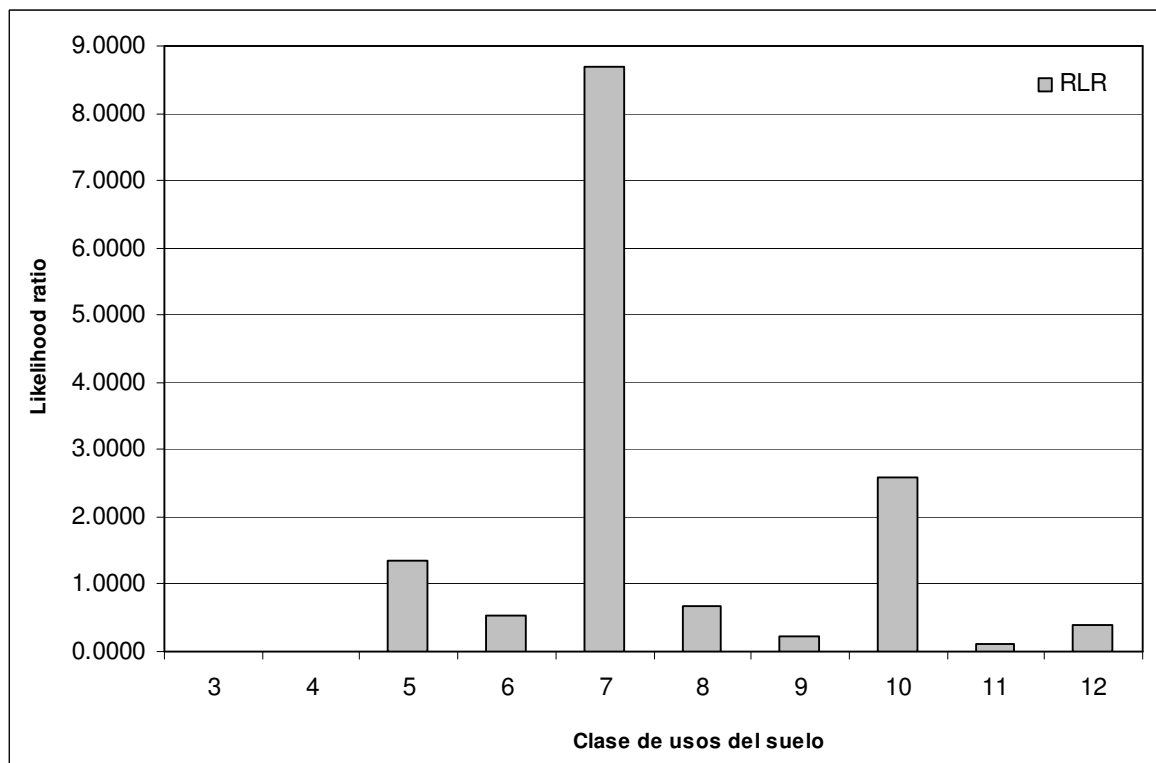
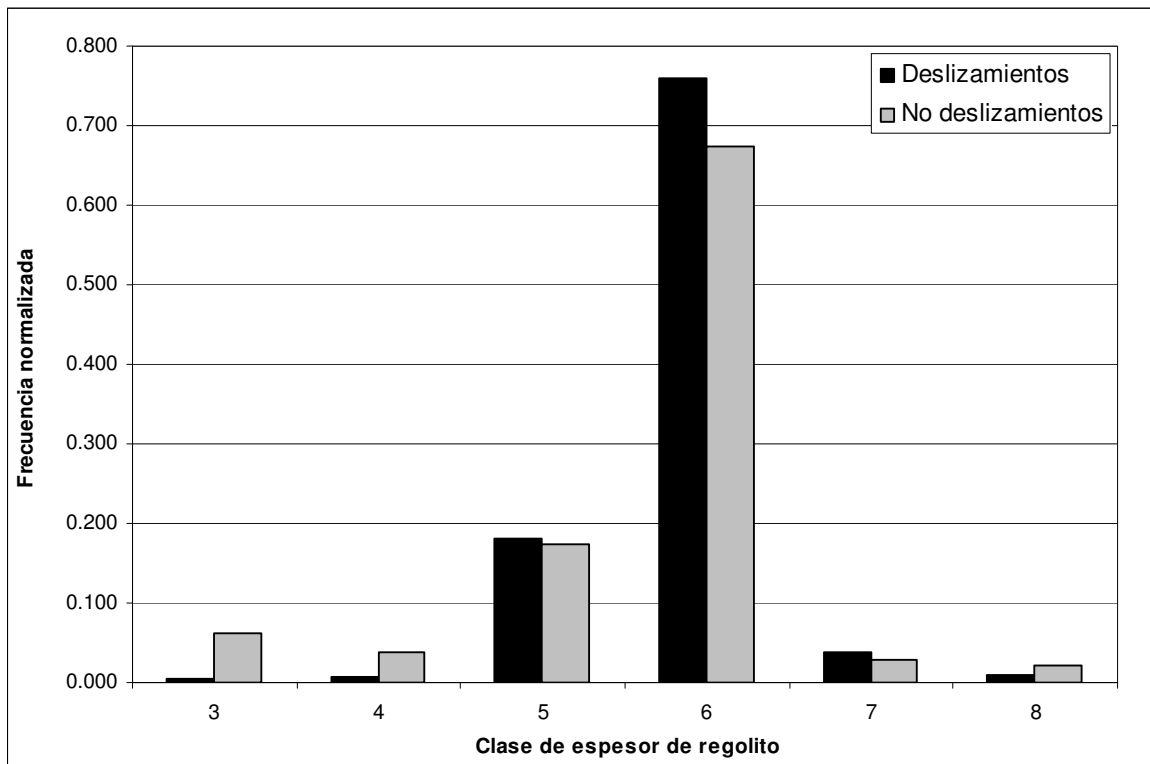


Figura 7.3h. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable usos del suelo, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable usos del suelo (abajo).



Unidades de espesor de regolito: **3:** Roca; **4:** 0-0,5 metros; **5:** 0,5-1 metros; **6:** 1-2 metros; **7:** 2-4 metros; **8:** >4 metros.

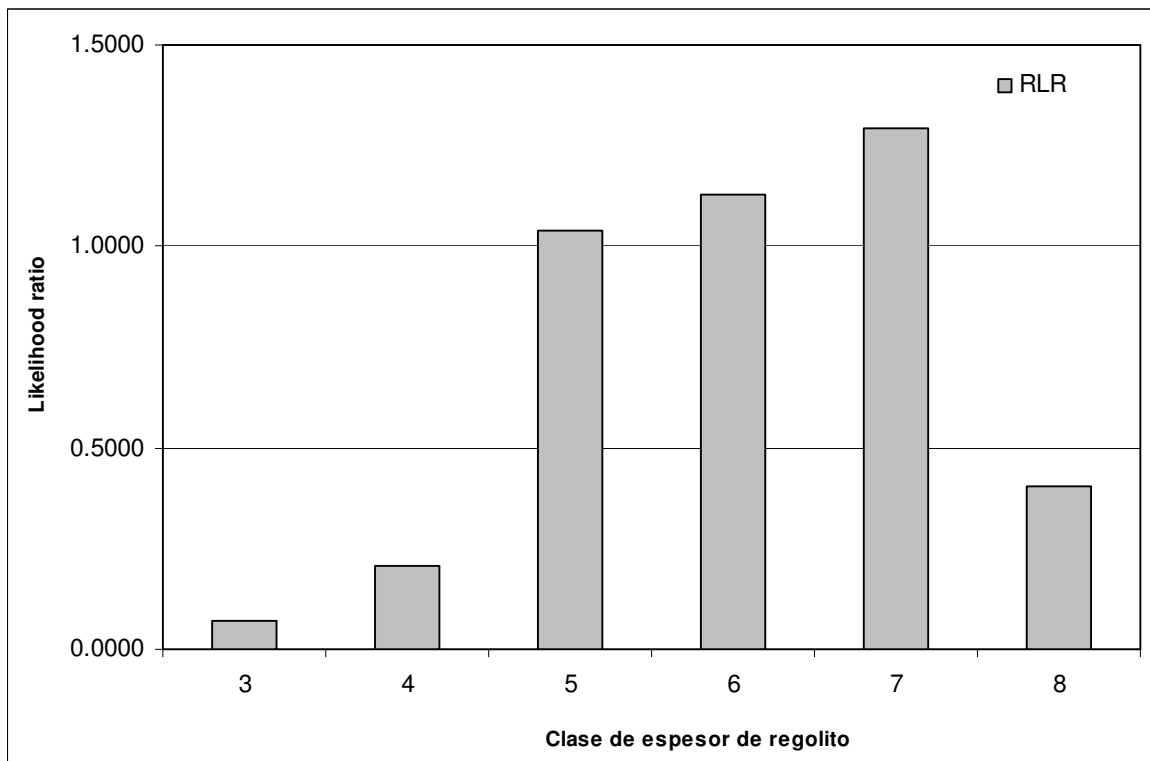


Figura 7.3i. Funciones de distribución empíricas normalizadas, de la variable espesor de regolito, en el área con deslizamientos y sin deslizamientos (arriba); función de relación de probabilidad empírica de la variable espesor de regolito (abajo).

7.1.3 Modelos de susceptibilidad obtenidos: técnicas estadísticas y variables utilizadas

Uno de los objetivos específicos planteados en este trabajo era el de mejorar los modelos de susceptibilidad mediante el uso de nuevos procedimientos estadísticos. En función de ese objetivo y con el fin de explorar la mejora obtenida en la calidad de los modelos, por medio de la aplicación de técnicas estadísticas, se han generado distintos modelos. Estos modelos se han obtenido utilizando las mismas variables categóricas y continuas y una población de deslizamientos correspondientes al periodo pre-1991, aplicando distintas técnicas (Bayes, Regresión Logística, Función de relación de probabilidades [*Likelihood ratio*], Función de pertenencia difusa [*Fuzzy set*] y Redes Neuronales Artificiales [*Artificial Neural Networks, ANN's*]). Las curvas de evaluación de dichos modelos (Figura 7.4) son muy similares, lo que permite señalar que la fiabilidad de las predicciones es muy parecida en todos ellos. Esto es, por ejemplo, con el 20% del área más susceptible se predicen en torno al 60% de los futuros deslizamientos.

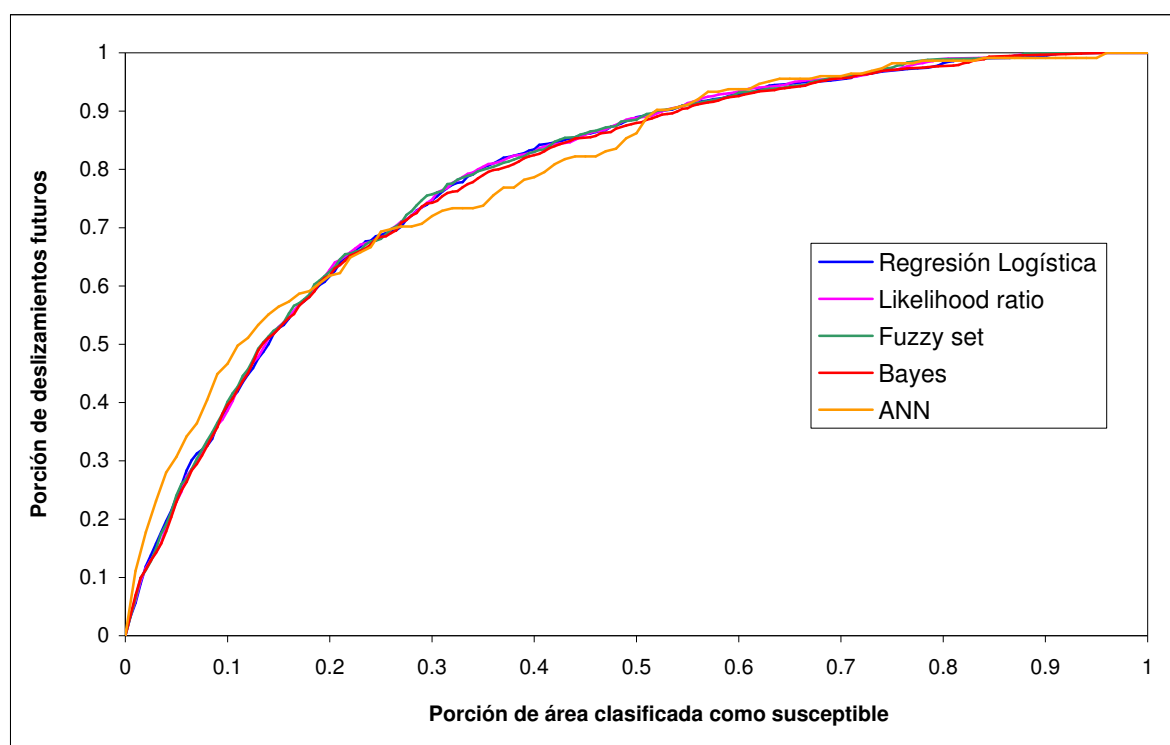


Figura 7.4. Curvas de evaluación/validación de los modelos de susceptibilidad generados a partir de la serie de deslizamientos pre-1991 con distintas funciones matemáticas.

De acuerdo con los resultados precedentes, se podría concluir que las nuevas funciones utilizadas (*likelihood ratio* y *ANN's*) no introducen mejoras significativas en comparación con las empleadas por Remondo (2001). Esto sugiere que la mejora en la calidad de los modelos probablemente se pueda lograr, más que con nuevas funciones, con la utilización de variables de mejor calidad y precisión (al menos en lo que se refiere a la zona de estudio).

La función de relación de probabilidades o “*likelihood ratio*” representa una herramienta sólida y muy intuitiva (Chung & Fabbri, 2005). Este tipo de análisis ha sido utilizado en el presente trabajo, en colaboración directa con los autores nombrados.

Tal y como se ha comentado anteriormente, con el fin de seleccionar el conjunto de variables que permite obtener los mejores modelos (mejor capacidad de predicción) se han generado una serie de modelos de susceptibilidad para los deslizamientos ocurridos en los periodos pre-1991 (532 deslizamientos), 1991-1997 (906 deslizamientos) y 1997-2001 (131 deslizamientos). Basándose en el análisis bivariable previamente descrito, en la obtención de estos modelos se han utilizado siempre las mismas variables temáticas o categóricas: litología (L), usos del suelo (US) y espesor de regolito (ER), combinándolas con la presencia o ausencia de determinadas variables continuas. Los modelos se han obtenido para las siguientes combinaciones de variables:

- L-US-ER con altitud, pendiente, orientación, insolación, distancia a fallas, distancia a cauces.
- L-US-ER con altitud, pendiente, orientación, insolación, distancia a fallas.
- L-US-ER con altitud, pendiente, orientación, insolación, distancia a cauces.
- L-US-ER con altitud, pendiente, orientación, insolación.
- L-US-ER con altitud, pendiente, orientación.

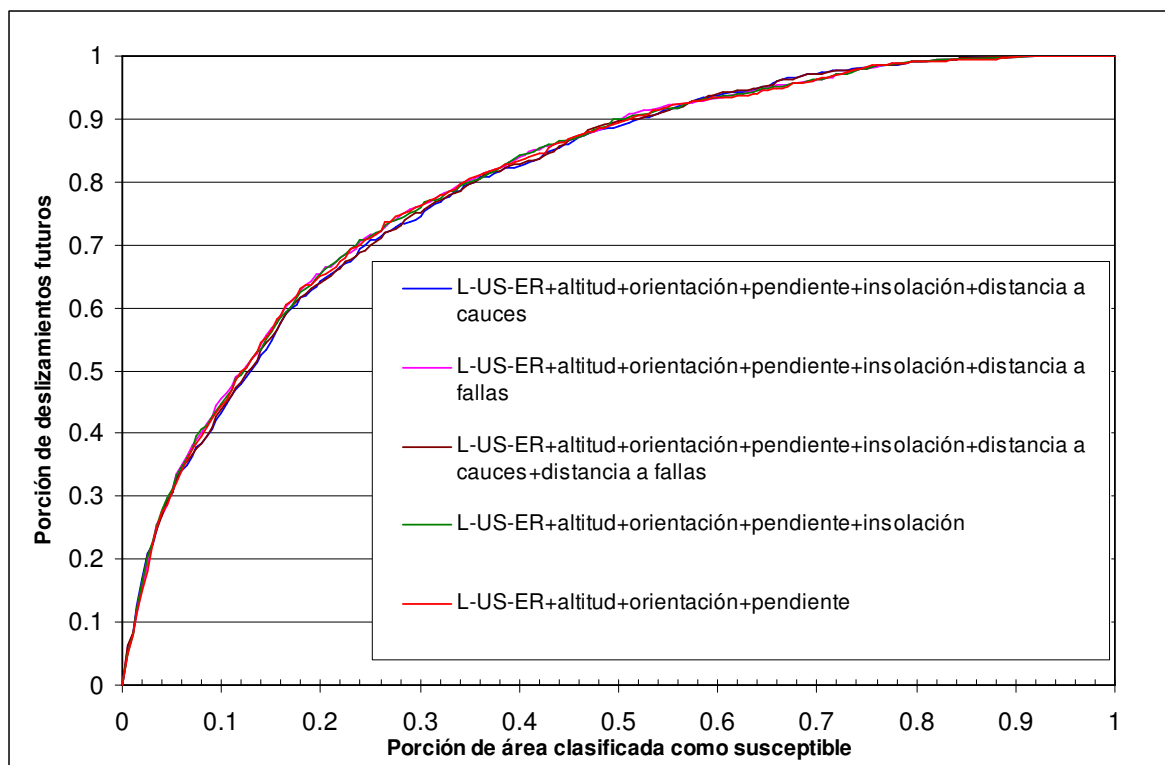


Figura 7.5. Curvas de evaluación de las distintas combinaciones de variables utilizadas en la elaboración del modelo de susceptibilidad de la serie de deslizamientos 1991-1997.

En la Figura 7.5, se han representado las diferentes curvas de evaluación de los modelos de susceptibilidad obtenidos a partir de la serie de deslizamientos de 1991-1997. En dicha figura se puede observar como las distintas curvas aparecen prácticamente superpuestas, lo cual indica que los modelos son muy similares. Esto significa que para generar un modelo de susceptibilidad de la zona de estudio no es necesario incorporar al análisis todas las

variables propuestas y que la combinación de variables tales como altitud, pendiente, orientación, litología, usos del suelo y espesor de regolito, genera modelos con una capacidad de predicción similar a las obtenidas cuando se incluyen otras variables como son la distancia a fallas o a cauces y la insolación.

Esto, junto con lo comentado en relación con el análisis bivariable, sugiere que, ni la sismicidad ni el socavamiento por acción de los cursos de agua parecen ser factores desencadenantes relevantes de deslizamientos en la zona de estudio durante el periodo estudiado. En otras palabras, cualquier medida de mitigación encaminada a reducir la incidencia de este tipo de procesos debe actuar sobre los efectos de las lluvias y de la influencia humana directa e indirecta, que podrían ser los únicos agentes desencadenantes significativos o, sobre los posibles factores condicionantes.

La Figura 7.6 muestra los modelos de susceptibilidad generados con los deslizamientos pre-1991 (Figura 7.6a), 1991-1997 (Figura 7.6b) y 1997-2001 (Figura 7.6c). Se puede observar que la representación cartográfica es bastante similar para los dos primeros modelos, pero difiere en el caso del modelo generado con los deslizamientos del último periodo. Esto probablemente se debe al menor número de eventos incluidos en el último periodo analizado (131).

En la Figura 7.7, se presentan las curvas de ajuste de los tres modelos representados en la Figura 7.6. Dichas curvas sólo expresan el ajuste de cada modelo a sus propios datos, es decir, a los deslizamientos a partir de los cuales se han generado; posteriormente, será necesario validar los modelos con nuevos datos, obteniendo las curvas de acierto o de predicción. En la figura se observa que la mejor capacidad de predicción se obtiene para el modelo generado con los deslizamientos de 1991-1997. Por otro lado, cabe señalar que el peor pronóstico se obtiene con el modelo generado con los deslizamientos de 1997-2001, aunque las diferencias son pequeñas con respecto a los otros dos modelos. Esta peor calidad del modelo, con datos 1997-2001, podría explicarse por el menor tamaño de la muestra. Sin embargo, no se puede descartar que esté influyendo algún factor relacionado con el cambio de tendencia en cuanto a la frecuencia de movimientos que se observa en ese periodo reciente y que se ha comentado anteriormente. Lo más significativo de esta figura es que la forma de las tres gráficas es similar, lo que da una idea de la validez y fiabilidad del método. El mejor ajuste (deslizamientos 1991-1997) predice que el 68,4% de los deslizamientos futuros se situarán en el 20% del área clasificada como más susceptible. Esto representa una predicción ligeramente mejor respecto a los resultados presentados por Remondo (2001), ya que dicho autor obtenía una capacidad de predicción de aproximadamente el 60% en el 20% del área más susceptible.

La mejora obtenida puede ser debida al tratamiento de los límites de las unidades categóricas como líneas o franjas difusas de anchura variable, a que se ha utilizado un mapa de usos del suelo más detallado, a que se ha utilizado un modelo digital del terreno más preciso así como al uso de variables continuas no reclasificadas en clases. Con el fin de analizar las citadas posibilidades, se han llevado a cabo los análisis que a continuación se describen.

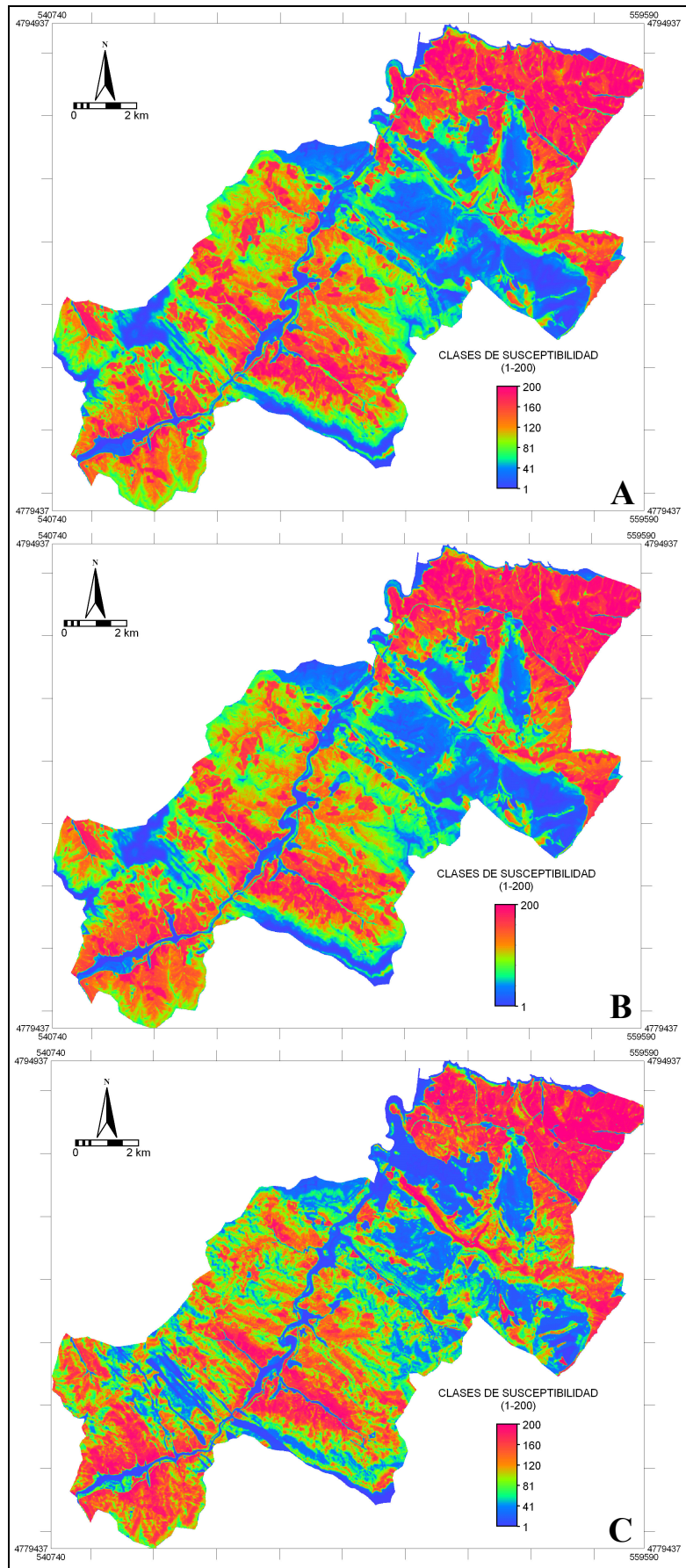


Figura 7.6. Modelos de susceptibilidad obtenidos para el Bajo Deva a partir de las series de deslizamientos pre-1991 (A), 1991-1997 (B) y 1997-2001 (C).

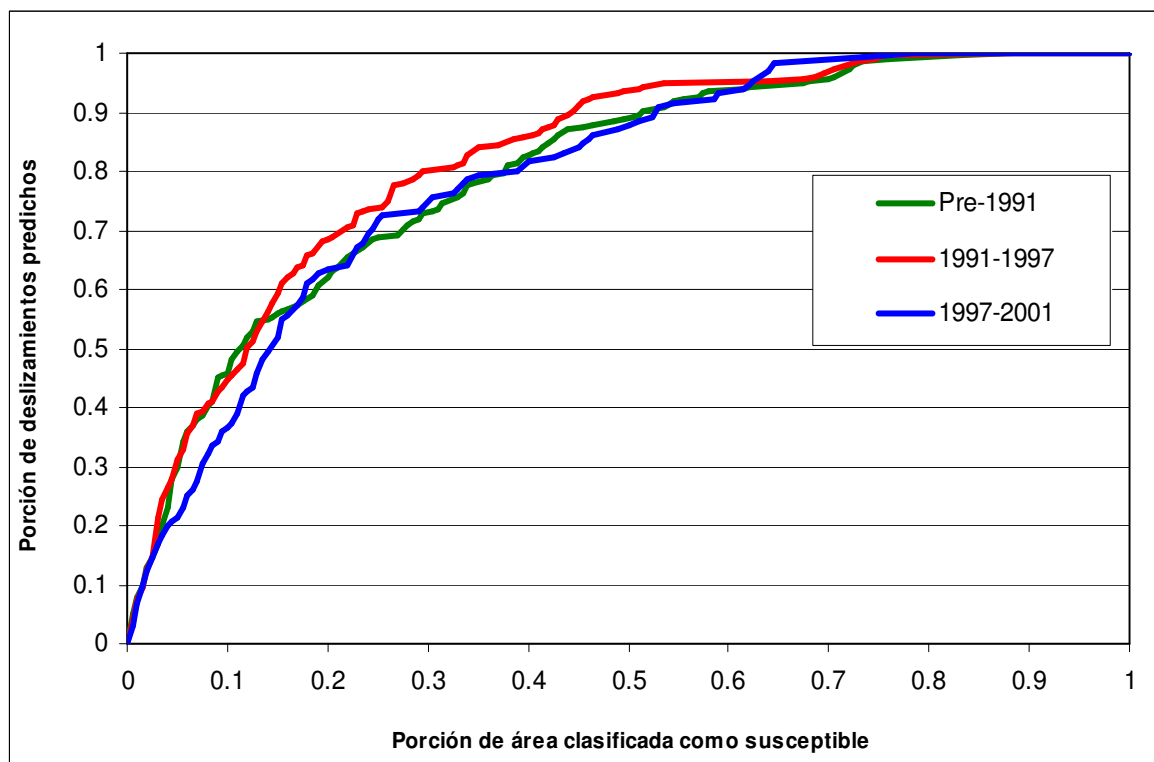


Figura 7.7. Curvas de ajuste de los modelos mostrados en la Figura 7.6.

1) Determinación de la influencia que tiene en las predicciones de los modelos el tratamiento de los límites de las variables temáticas como límites difusos, lo cual puede ser útil cuando se trabaja con variables en las cuales los límites entre clases no pueden determinarse con precisión (p. ej. contactos litológicos en el substrato). Para ello se ha generado un modelo utilizando las mismas variables que en los casos anteriores y con los deslizamientos de 1991-1997, pero dando diferentes tolerancias (1, 2, 6 y 10 píxeles, es decir, 10, 20, 60 y 100 metros respectivamente) a los límites de las variables temáticas. Las curvas de predicción obtenidas se presentan en la Figura 7.8. Se observa que la predicción varía muy poco al utilizar límites de 10 ó 20 metros de anchura (1 ó 2 píxeles); sin embargo, cuando se utiliza mayor anchura o número de píxeles, la calidad de la predicción disminuye ligeramente, prácticamente se mantiene igual. Esto indica que la incorporación de los límites difusos no mejora el resultado obtenido, lo cual se explica porque la cartografía temática utilizada es de bastante calidad. En otros casos, con cartografía temática de menor precisión, es posible que sí se obtengan mejores resultados.

2) Determinación de la influencia de la incorporación de mapas de usos del suelo que reflejen todos los elementos construidos. Se han elaborado dos modelos de susceptibilidad, uno utilizando el mapa de usos del suelo empleado por Remondo (2001) y otro que incorpora todas las carreteras y edificios individuales dispersos. En la Figura 7.9 se muestran las curvas de evaluación de ambos modelos. De esta figura se extrae que la ligera mejora de la variable usos del suelo utilizada aquí no añade calidad a la predicción; es más, en algunos puntos la capacidad de predicción empeora ligeramente. Es posible que si la mejora en el mapa de usos del suelo se centrara sobre todo en aumentar la precisión y en actualizar los datos relativos a la cobertura vegetal (especialmente arbolado y praderías) se ganara calidad en el modelo de susceptibilidad. El nuevo inventario forestal en curso de edición por parte del Gobierno Vasco, servirá para comprobar esto.

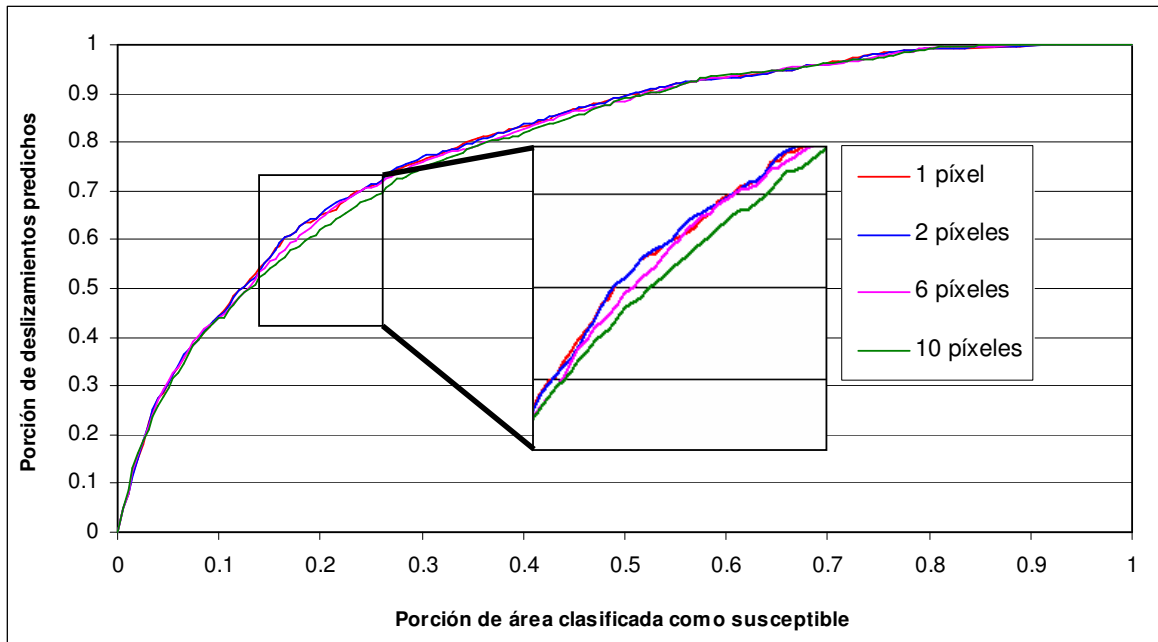


Figura 7.8. Efecto de los límites de las variables temáticas en la generación de modelos de susceptibilidad (1 píxel = 10 metros).

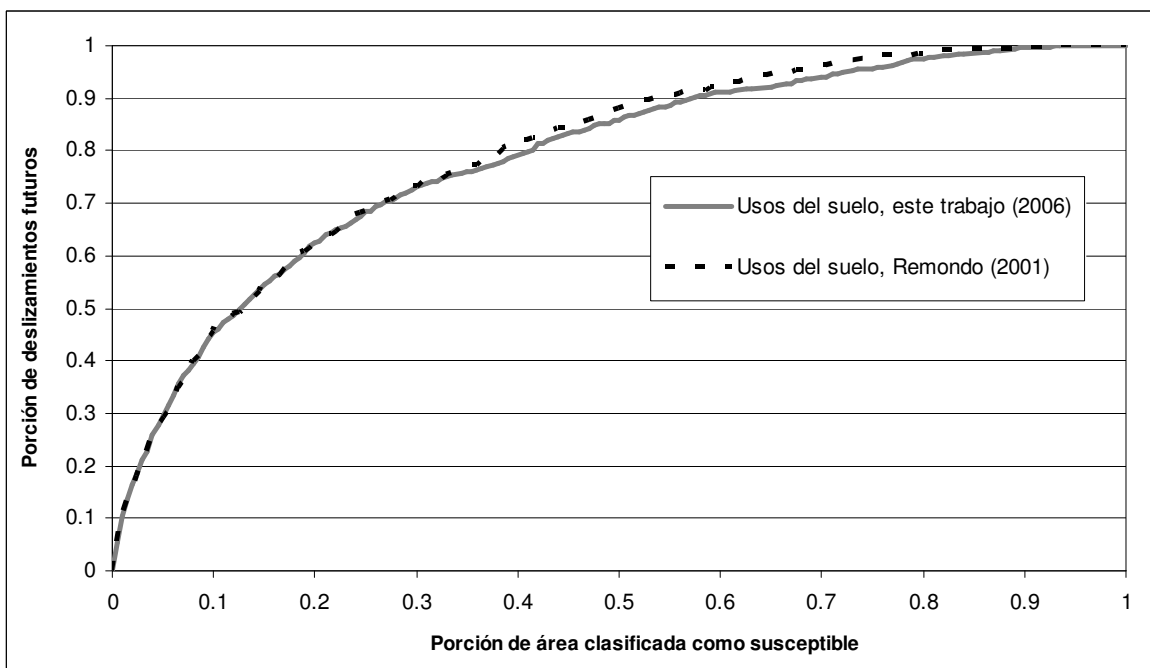


Figura 7.9. Efecto de la utilización de mapas de usos del suelo con distinta precisión en la generación de modelos de susceptibilidad.

3) Determinación del efecto de la resolución del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en las predicciones. El análisis de la influencia de esta variable se ha realizado en otra zona de estudio, en Cantabria, para la cual se han elaborado, utilizando técnicas fotogramétricas de gran resolución, distintos MDEs. Este trabajo es parte del proyecto FODISPIL (REN2002-00079/RIES) y sus resultados iniciales han sido presentados por Olague et al., (2005).

Como se muestra en la Figura 7.10, la resolución del MDE influye de forma importante en las predicciones de los modelos de susceptibilidad. La citada figura muestra las curvas de predicción obtenidas para 4 modelos predictivos, utilizando MDEs de distinta resolución: 1, 5, 10, 15 y 25 metros de tamaño de píxel. Se aprecia claramente en la figura que los resultados en las predicciones mejoran notablemente a medida que aumenta la resolución del MDE. Las mejores predicciones, con una diferencia perceptible, se obtienen en el modelo generado con resolución de 1 metro (casi el 90% de los deslizamientos ocurren en el 20% del área susceptible). En este sentido, se puede afirmar que, independientemente de las variables categóricas, cuanto mejor sea la resolución del MDE y, por tanto de las variables continuas derivadas del mismo, mejor será la predicción obtenida y más fiable el modelo de susceptibilidad generado.

El MDE que se ha utilizado en la zona del Bajo Deva se ha mejorado respecto al que utilizó Remondo (2001), aumentando la precisión y eliminando ciertos errores, por lo que parte del aumento en la capacidad de predicción obtenida se puede explicar por la mejora de esta variable.

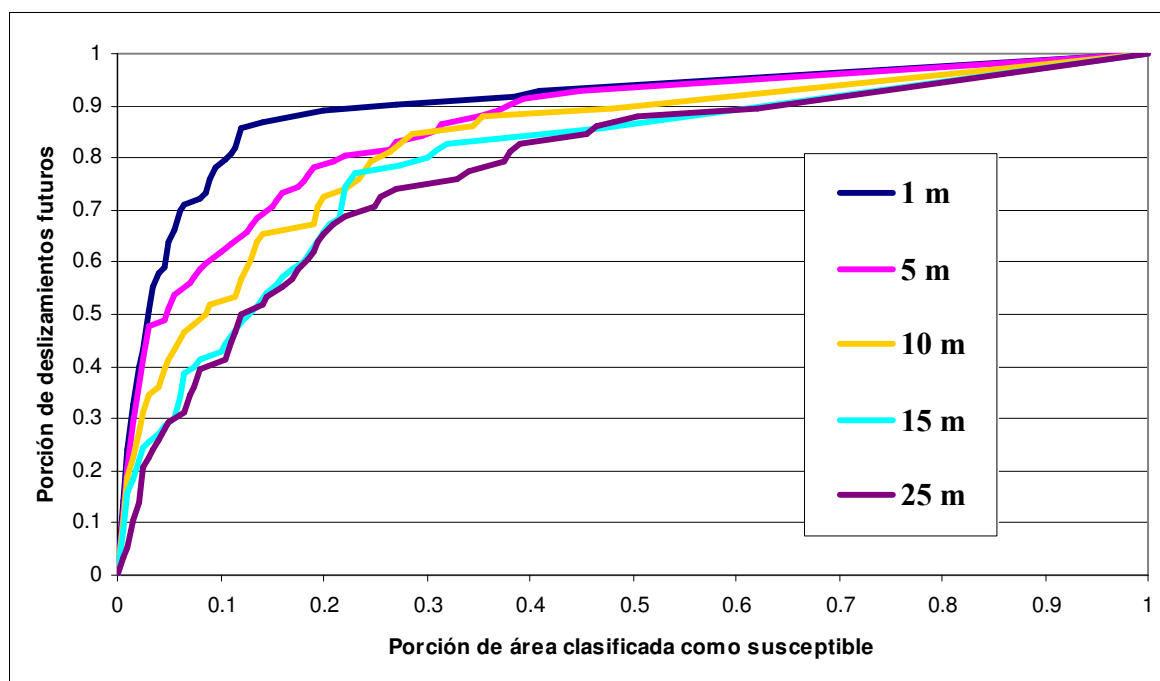


Figura 7.10. Efecto de la resolución del Modelo Digital de Elevaciones en la predicción mostrada por los modelos de susceptibilidad.

Los análisis descritos ponen de manifiesto que la mejor calidad del modelo que aquí se presenta, en comparación con los modelos obtenidos por Remondo (2001), se explica como consecuencia del uso de variables continuas y del aumento en la calidad y precisión del MDE, siendo limitada o nula la mejora achacable a las otras variables analizadas. Esto, a su vez, indica que los esfuerzos que se dirijan hacia la mejora de los MDEs serán probablemente los más útiles para aumentar la calidad de los modelos de susceptibilidad. Las posibilidades de obtención de MDEs de alta precisión y resolución son en la actualidad considerables (Olague et al., 2005), mientras que la mejoría en el caso de las variables categóricas implica una gran dedicación de tiempo que a lo mejor no se corresponde con los avances que se esperan.

En consecuencia, y en función de los distintos razonamientos anteriormente expuestos, en la elaboración de modelos de susceptibilidad, y posteriores análisis, se utilizarán las variables siguientes: litología, usos del suelo, espesor de regolito, altitud, pendiente y orientación.

7.1.3.1 Validación de los modelos de susceptibilidad: fiabilidad y capacidad de predicción

Una vez obtenidos los modelos anteriores, el paso siguiente es comprobar su capacidad de predicción; esto es, evaluar la fiabilidad (o validación) de las predicciones realizadas a partir de los mismos. Para ello se han seguido diferentes estrategias:

- *Temporal*: el modelo obtenido con los deslizamientos ocurridos en un determinado intervalo temporal se ha contrastado con una muestra de referencia constituida por los deslizamientos pertenecientes al resto de los intervalos temporales considerados. Así, el modelo de susceptibilidad generado con los deslizamientos pre-1991, ha sido validado con los deslizamientos ocurridos en 1991-1997 y en 1997-2001; de igual modo, el modelo de susceptibilidad generado con los deslizamientos de 1991-1997, ha sido validado con los deslizamientos pre-1991 y 1997-2001; también, el modelo de susceptibilidad generado con los deslizamientos de 1997-2001 se ha comparado con los deslizamientos pre-1991 y 1991-1997; y, por último, el modelo generado con los deslizamientos pre-1991 se ha comparado con los deslizamientos ocurridos con posterioridad a 1991.

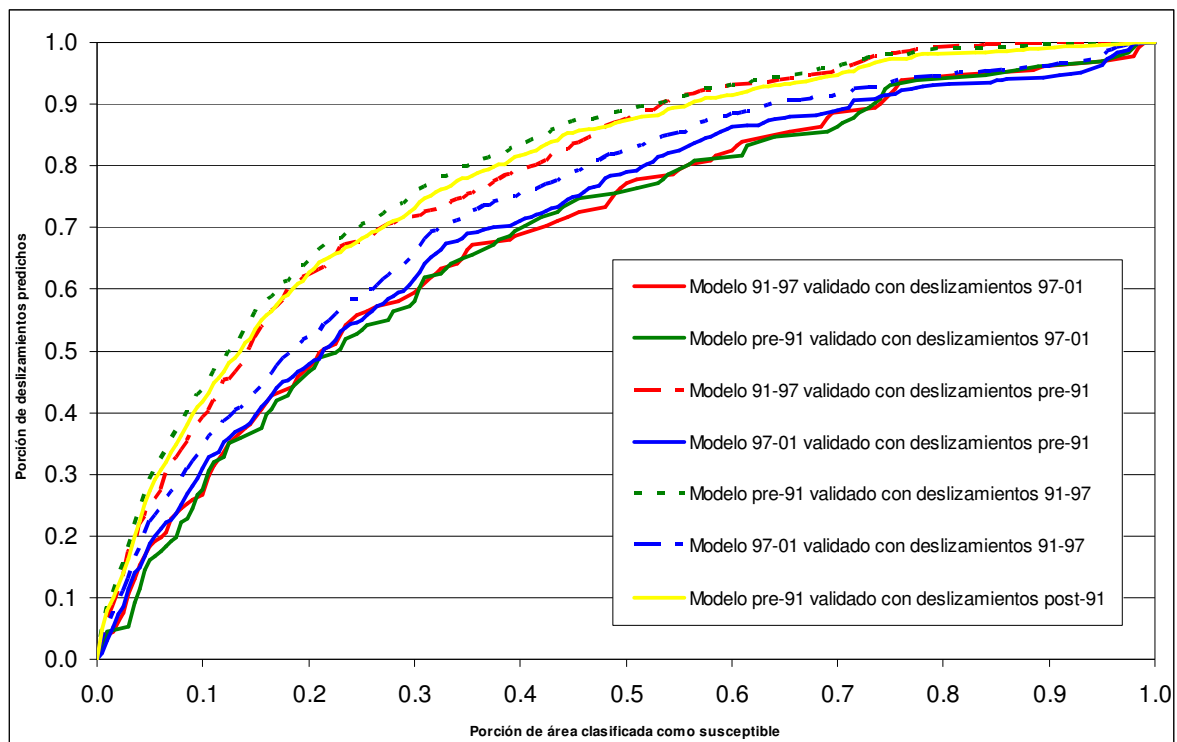


Figura 7.11. Curvas de validación de los modelos de susceptibilidad generados y validados con los modelos obtenidos en periodos anteriores y posteriores a los que sirvieron para generar el modelo.

Los resultados de las comparaciones citadas se muestran en la Figura 7.11. Las mejores predicciones se obtienen con los modelos pre-1991 y 1991-1997, cuando se validan con los deslizamientos del periodo 91-97 y post-91 y pre-91, respectivamente; en este caso, entre el 62% y el 64% de los deslizamientos de los inventarios pre-91 y 91-97, respectivamente,

se producen en el 20% del área clasificada como más susceptible. Estos mismos modelos dan peores resultados cuando se validan con los deslizamientos del último periodo 1997-2001 (en torno al 50% de los deslizamientos aparecen en el 20% de las zonas más susceptibles) posiblemente debido al menor número de eventos ocurridos en este periodo. En conjunto, los nuevos modelos obtenidos proporcionan una cierta mejora de la predicción en comparación con los empleados por Remondo (2001), que predecían aproximadamente un 58% de la muestra de control en el 20% de las zonas más susceptibles. Con lo cual, los nuevos modelos implican un incremento de la predicción en torno al 5%. Aún así, la banda que definen las distintas curvas de la figura refleja una incertidumbre en la capacidad de predicción de los modelos, de tal forma que con el 20% más susceptible se predice entre el 50 y el 65% de los deslizamientos, siendo necesario contemplar toda la zona de estudio para predecir el 100% de los futuros movimientos.

Los resultados descritos refuerzan algo que ya se ha comentado anteriormente. El periodo 1997-2001 muestra una disminución en la frecuencia de los deslizamientos con respecto a los periodos anteriores, lo que da lugar a que la población utilizada sea bastante menor. El menor tamaño de la muestra podría ser una causa que explique la menor capacidad de predicción. Otras posibles causas podrían achacarse a variaciones locales de los eventos que tienden a disiparse en periodos de tiempo más largos y, por supuesto, a la calidad de los propios inventarios. Sin embargo, en análisis anteriores (Remondo, 2001; Remondo et al., 2003b) se ha observado que, independientemente del tamaño de la muestra analizada, la capacidad de predicción de los modelos no variaba prácticamente para los diferentes periodos considerados. Una posible explicación de la “anomalía” que representa el periodo 1997-2001 es que los factores que hayan podido influir en la reducción de la frecuencia, podrían haber influido también en la distribución espacial de los deslizamientos. Esos factores, posiblemente, se relacionan con la actividad humana. Esa relación entre deslizamientos y actividad humana ha sido puesta de manifiesto por el proyecto EPOCH (Casale et al., 1994), así como por distintos autores (Evans, 1997, 1999; González-Díez et al., 1999; Viberg, 2000; Glade, 2003b; Baioni et al., 2005; Remondo et al., 2005c; Beguería, 2006; Cendrero et al., 2006).

Cuando no se dispone de datos sobre la distribución temporal de los deslizamientos en una zona, es posible utilizar otras estrategias o métodos para evaluar la capacidad de predicción de los modelos. Dichas estrategias también se han aplicado en este caso utilizando el modelo obtenido con los deslizamientos del periodo 1991-1997 (modelo que muestra los mejores resultados tras la evaluación, siendo además la muestra más representativa). De entre el conjunto de métodos posibles, se han aplicado dos a título de ejemplo:

- *Agrupación de la población total de deslizamientos en dos muestras aleatorias de igual número de individuos.* Consiste en dividir, de forma aleatoria, el número total de deslizamientos en dos grupos, por lo que los 906 movimientos existentes en la serie temporal 1991-1997, se han dividido en dos grupos de 453 deslizamientos cada uno. Con el grupo 1 se generó un modelo predictivo que se comparó con el grupo 2; y viceversa. En la Figura 7.12 se muestran las curvas de validación del modelo obtenido con los deslizamientos de 1991-1997 separados en dos grupos. Ambas curvas muestran resultados muy similares, lo que confirma la robustez del modelo y muestra una bastante buena capacidad de predicción. Las curvas de validación indican que, aproximadamente, el 62% de los “nuevos” deslizamientos aparecen en el 20% del área clasificada como más susceptible.

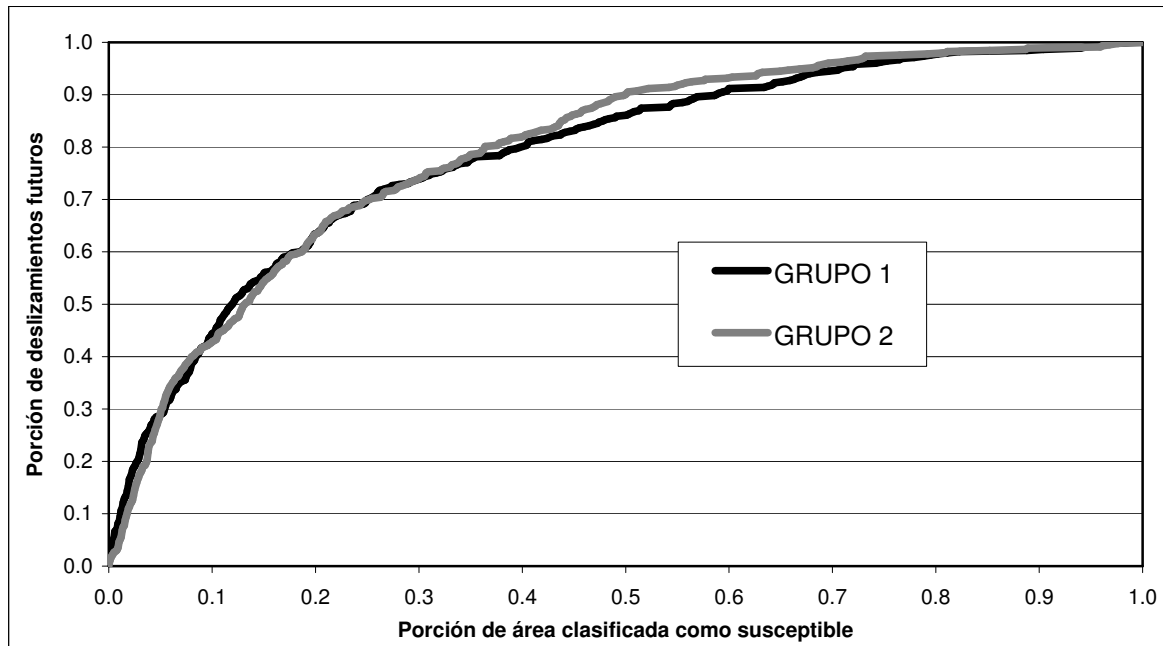


Figura 7.12. Curvas de validación del modelo generado con la serie 1991-1997. La validación se hizo dividiendo el número de deslizamientos en dos grupos de forma aleatoria; con el primer grupo se genera un modelo y se valida con los deslizamientos del segundo grupo, y viceversa.

- *Dividir la zona de estudio en subzonas (siempre que sean de características similares):* se divide en dos subzonas, de manera que se calcula una función con los deslizamientos de una de las áreas; se extrapola la función de favorabilidad a la otra zona para construir el modelo y se evalúa con los movimientos de esa zona. La Figura 7.13 muestra las curvas de evaluación/validación del modelo obtenido con los deslizamientos de 1991-1997, separando la zona de estudio en dos subáreas de igual tamaño (1.555 x 943 píxeles): Área 1 (oeste) y Área 2 (este). En esta figura se observa que el modelo obtenido para la zona oriental (modelo elaborado con los deslizamientos de la zona occidental; en este caso con el 20% se predice el 70% de los deslizamientos presentes en esa zona) predice mejor que el obtenido para la occidental (con el 20% del área se predice tan sólo un 50%). La predicción del modelo obtenido con los deslizamientos del Área 2, según se ve en la figura, es muy similar a la predicción obtenida para el conjunto de la zona, cuyos modelos fueron obtenidos dividiendo los deslizamientos, de forma aleatoria, en dos mitades.

La notable diferencia descrita en la capacidad de predicción de los modelos construidos a partir de las mitades oriental y occidental de la zona de estudio se podría explicar por la diferencia en el número de deslizamientos entre ambas áreas. Aún así, al igual que sucedía con la estrategia de evaluación temporal, ambas curvas definen una banda indicativa, tanto de la capacidad de predicción de los modelos, como de la incertidumbre existente. Esta banda es similar a la mostrada en la Figura 7.11 y 7.12. La zona oriental tiene una proporción mayor de píxeles de alta susceptibilidad y contiene el 58% del total de deslizamientos inventariados. Es por tanto lógico que sirva para predecir mejor el comportamiento del área occidental, y no al contrario.

La Figura 7.14 muestra el modelo predictivo de las dos subzonas; a simple vista la representación gráfica de ambas difiere bastante, como se observa en el contacto entre las dos zonas. Si se compara este modelo con el representado en la Figura 7.6b, que

corresponde al modelo de susceptibilidad obtenido para el intervalo 1991-1997, se puede observar que existen diferencias notables, sobre todo en la zona occidental. La aplicación de éste método requiere que las dos subáreas tengan características geológicas y topográficas muy similares; cuando esto no es así, los resultados obtenidos no son lo suficientemente fiables, como ocurre en el ejemplo propuesto.

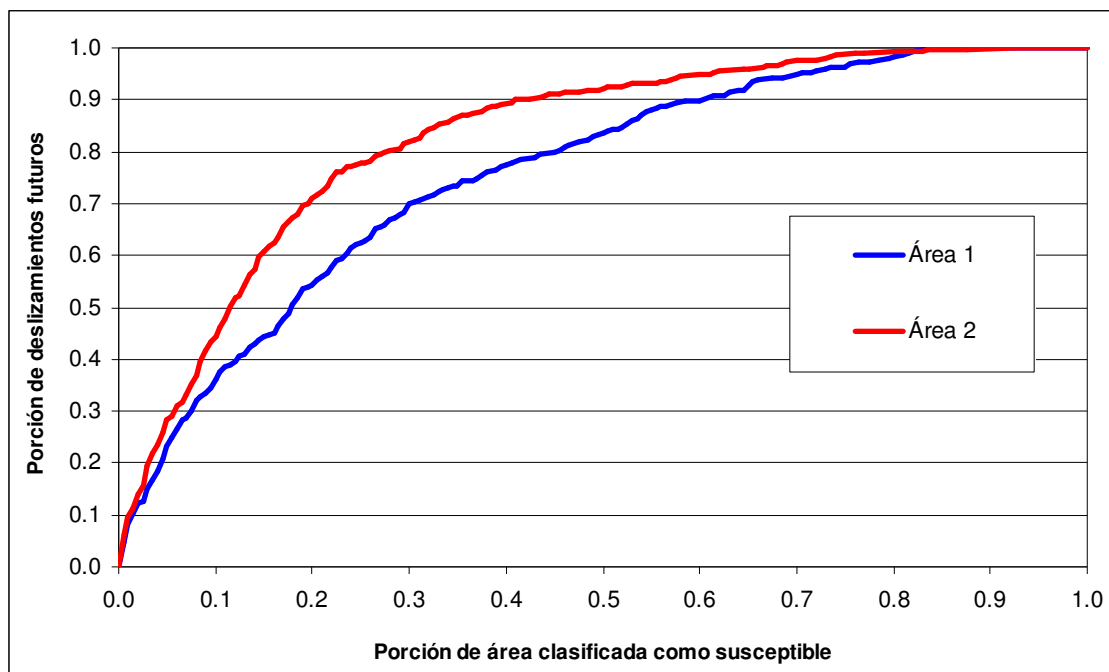


Figura 7.13. Curvas de validación del modelo generado con la serie 1991-1997. La validación se hizo dividiendo el área de estudio en dos subáreas; se genera un modelo con los deslizamientos de una subárea y se valida con los deslizamientos de la otra, y viceversa.

Independientemente de las diferencias existentes entre las curvas representadas, es evidente que todas ellas permiten definir dos tramos de predicción. Uno corresponde a la parte más susceptible del territorio (parte de la curva con pendiente más acusada); el otro tramo, de menor pendiente, delimita la “zona segura”, que abarca el extremo derecho y en el cual la probabilidad de nuevos deslizamientos es casi nula (Figuras 7.12 y 7.13).

En definitiva, las diferentes estrategias propuestas permiten contrastar y cuantificar la capacidad de predicción de los diferentes modelos y conocer la incertidumbre asociada. El proceso de evaluación requiere ensayar varias estrategias con el fin de tener un mejor conocimiento de los márgenes de predicción en los que se mueven los modelos. El modelo cuya evaluación, mediante diferentes estrategias, ha mostrado mejor capacidad de predicción (serie 1991-1997), ha sido utilizado para transformar la probabilidad espacial en probabilidad espacio-temporal o peligrosidad, y ha sido también la base para estimar el riesgo.

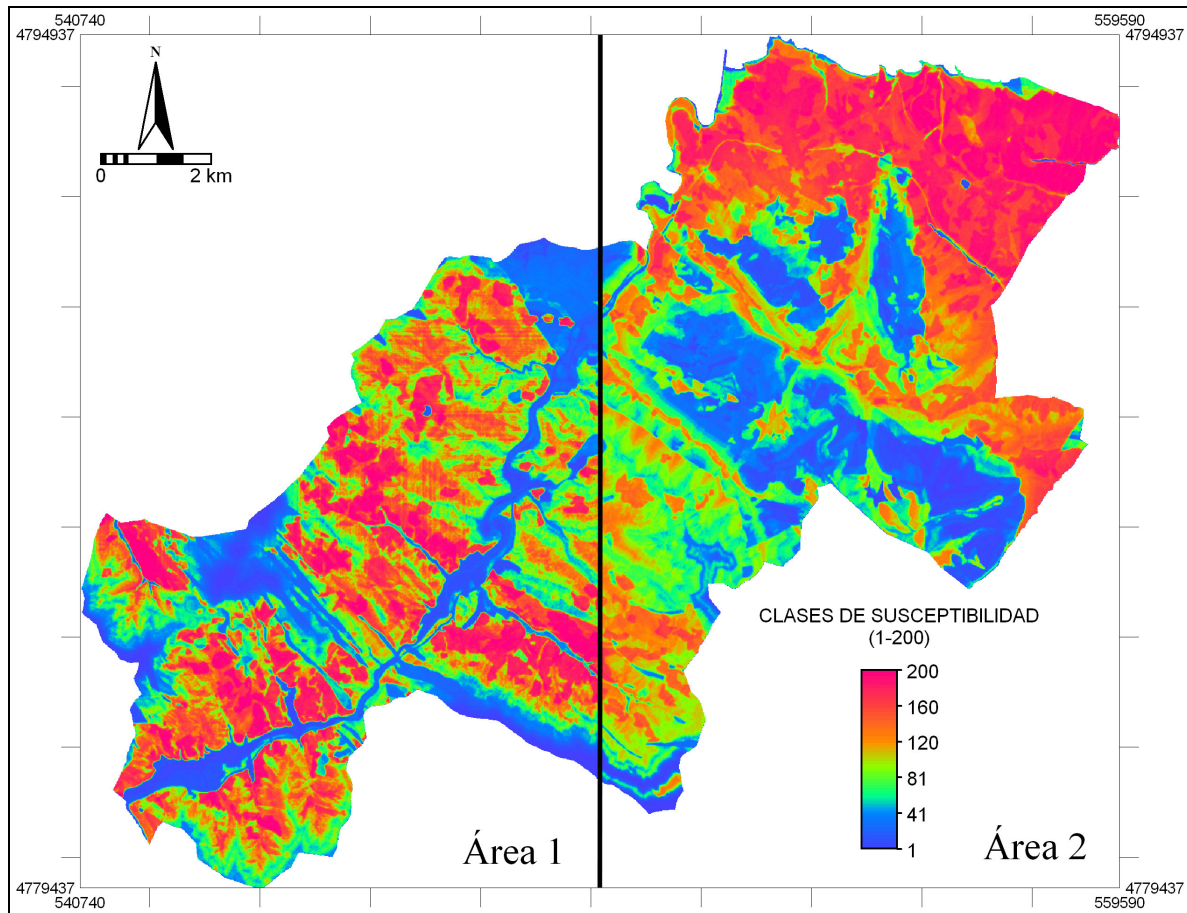


Figura 7.14. Modelo de susceptibilidad obtenido mediante la subdivisión de la zona de estudio en dos subzonas (ver Figura 7.13).

7.2 Resultados en relación con la peligrosidad

La estimación de la peligrosidad constituye el paso intermedio para la evaluación del riesgo. El modelo de susceptibilidad, generado con la serie de deslizamientos 1991-1997, se ha transformado, a partir de la frecuencia determinada para el pasado, en modelos de probabilidad espacio-temporal, por medio de diferentes extrapolaciones, derivadas de las tendencias observadas.

7.2.1 Modelos de peligrosidad obtenidos

7.2.1.1 Frecuencia de deslizamientos

Los datos temporales sobre la ocurrencia de los deslizamientos en el conjunto de la zona de estudio se han obtenido para tres periodos: pre-1991, 1991-1997 y 1997-2001. Dichos inventarios permiten obtener valores promedio, pero no son suficientes para determinar tendencias, dada la diferencia en cuanto a número de años abarcados.

Para el municipio de Deva se dispone de series temporales más completas (Tabla 7.1), a partir de los datos obtenidos por Remondo (2001), completados con el inventario realizado para el periodo 1997-2001. Este municipio representa el 37% de la superficie de la zona de estudio y contiene cerca del 50% del total de los deslizamientos de toda la zona (Tabla 7.2), por lo que las tendencias establecidas a partir de los datos obtenidos en este municipio se pueden considerar razonablemente representativas del conjunto y se han tomado como base para formular escenarios que permitan evaluar la peligrosidad.

7.2.1.1.1 Escenarios de peligrosidad o de probabilidad espacio-temporal

En la Tabla 7.1 se ha representado el número y la frecuencia anual de deslizamientos en el municipio de Deva, a lo largo de los distintos periodos estudiados. A partir de los valores de esas frecuencias de deslizamientos en el pasado, es posible establecer una serie de escenarios de tendencias futuras de aparición de movimientos en el área de estudio. Las extrapolaciones basadas en las tendencias pasadas deben tomarse con suma cautela, tanto mayor cuanto más largo sea el periodo considerado, ya que hay una considerable incertidumbre con respecto a la evolución de las condiciones en cualquier zona, especialmente en lo relativo a los factores que dependen de los seres humanos. Los cambios en esos factores afectan a la peligrosidad, y todavía en mayor medida al riesgo, ya que la cantidad, tipo y distribución de los elementos expuestos pueden variar mucho; las predicciones realizadas con respecto a la peligrosidad se han de referir, necesariamente, a una realidad diferente de la actual en cuanto a la exposición y la vulnerabilidad.

A pesar de esas dudas, la formulación de escenarios permite obtener una imagen útil del posible comportamiento futuro del proceso y de las consecuencias esperables.

Tal como se ha comentado en el capítulo de metodología (apartado 6.6.1.3.1), se han considerado tres posibles escenarios de comportamiento futuro (Figura 7.15):

- A) Comportamiento futuro equivalente al del pasado en el conjunto del área de estudio; esto es, frecuencia promedio similar a la obtenida para todo el Bajo Deva en el periodo 1954-2001, deducido a partir del municipio de Deva.

- B) Frecuencia futura aumentando de acuerdo con una tendencia lineal.
- C) Frecuencia futura aumentando de acuerdo con una tendencia exponencial (escenario pesimista).

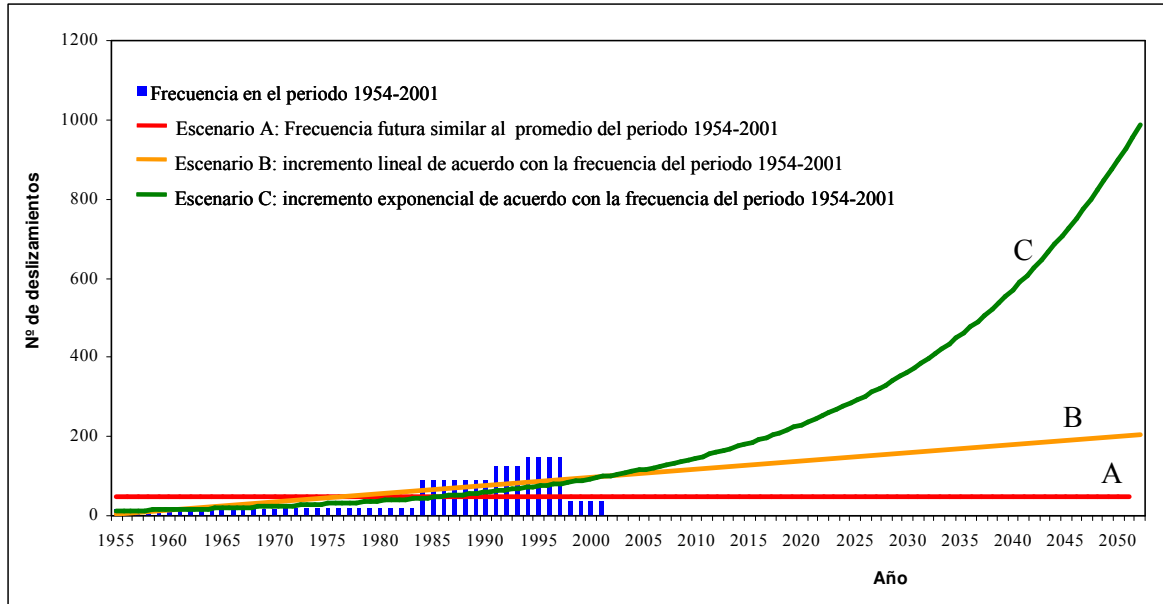


Figura 7.15. Frecuencia de deslizamientos en el pasado en la zona de estudio y frecuencias futuras de acuerdo con tres escenarios A, B y C.

En la Tabla 7.3 se observa el número de movimientos que cabe esperar en la zona del Bajo Deva en distintos años, en función del escenario considerado.

Con los datos anteriormente obtenidos, que cubrían hasta 1997 (Remondo et al., 2005c), la tendencia exponencial aparecía como la más probable. Sin embargo, los nuevos datos para el periodo 1997-2001 arrojan ciertas dudas con respecto a dicha interpretación. Como ya se ha comentado anteriormente, ese cambio de tendencia no tiene una explicación clara, especialmente teniendo en cuenta que parece presentar diferencias en la distribución espacial de los movimientos con respecto a periodos anteriores. Las dudas señaladas probablemente se podrán aclarar cuando se disponga de datos temporales para un nuevo lapso temporal de mayor duración.

Tabla 7.3. Número de deslizamientos esperables en distintos años en el área de estudio de acuerdo con los escenarios propuestos (Figura 7.15).

Año	Escenario A	Escenario B	Escenario C
2006	49	107	117
2010	49	116	140
2015	49	126	176
2020	49	137	220
2025	49	147	276
2030	49	158	347
2035	49	168	435
2040	49	179	545
2045	49	189	684
2050	49	200	858

Los tres escenarios descritos se han aplicado para la elaboración de modelos de peligrosidad (y estimación de frecuencias) que cubran lapsos temporales de 10 y 50 años. Por las razones ya comentadas, la proyección a 10 años es mucho más realista y fiable.

7.2.1.1.1 Probabilidad a 50 años

De acuerdo con los escenarios propuestos, la superficie deslizada en el área de estudio en los próximos 50 años, suponiendo un tamaño medio de deslizamiento de 510 m², será de 1,25 km² en el caso del escenario A, 3,83 km² en el escenario B y 9,26 km² en el escenario C. Esta superficie equivale, respectivamente, al 0,9%, 2,7% y 6,6% del total del área de estudio.

Una vez obtenida la superficie total deslizable para cada escenario en los próximos 50 años considerados, el siguiente paso consiste en calcular el porcentaje de dicha superficie que correspondería a cada clase de susceptibilidad. Para ello, de la relación existente entre el número de píxeles deslizados en una clase y el total de píxeles deslizados en el área (906 píxeles en el modelo de susceptibilidad 1991-1997, utilizado como referencia), se obtiene la porción de píxeles deslizados en cada clase. La representación gráfica de la porción de píxeles deslizados en cada clase, frente a cada clase de susceptibilidad, es una curva (Figura 7.16), a la cual se ajusta una línea de tendencia cuya expresión es la siguiente:

$$Y = 0,047 * \text{EXP} [-0,055 * (200-X)]$$

donde:

X es la clase de susceptibilidad,

Y es la porción de deslizamientos correspondiente a cada clase de susceptibilidad.

Mediante esa expresión la transformación de clases de susceptibilidad a valores de probabilidad espacial de deslizamientos es inmediata (Figura 7.16).

La distribución de la superficie deslizada a lo largo de la zona de estudio, es función de la porción de deslizamientos existentes en cada clase de susceptibilidad. De manera que para cada clase de susceptibilidad y para cada uno de los escenarios propuestos, el área propensa a deslizar (en m²) en los próximos 50 años vendrá dada por las expresiones siguientes (Chung & Fabbri, 1993):

*Área de clase deslizada en m² (Escenario A) = 1.250.000 m² * porción de deslizamientos predichos en cada clase*

*Área de clase deslizada en m² (Escenario B) = 3.830.000 m² * porción de deslizamientos predichos en cada clase*

*Área de clase deslizada en m² (Escenario C) = 9.260.000 m² * porción de deslizamientos predichos en cada clase*

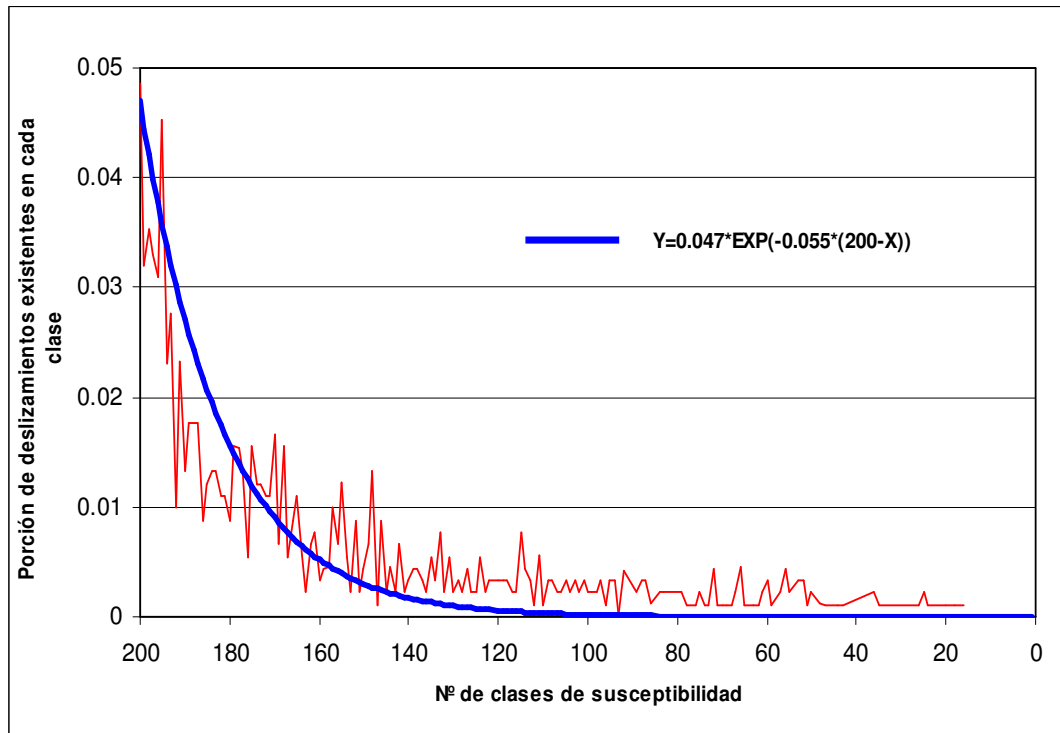


Figura 7.16. Curva y ecuación de ajuste del número de deslizamientos existentes en cada clase del modelo susceptibilidad.

Como, por otra parte, el área de cada una de las doscientas clases de susceptibilidad es conocida, la transformación de cada clase de susceptibilidad a probabilidad espacio-temporal (peligrosidad) en los próximos años, de acuerdo con los distintos escenarios definidos, se obtiene a partir de las expresiones siguientes:

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

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

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

En la Tabla 7.4, se muestra un ejemplo de los valores de probabilidad obtenidos (expresados en tantos por uno) para cada escenario, así como su correspondencia con los valores de susceptibilidad. La probabilidad, como es lógico, varía en función del tipo de escenario de peligrosidad considerado. Así, para el escenario A (optimista), la probabilidad de deslizamiento en el píxel de más alta susceptibilidad, en un periodo de 50 años sería del 7,6%. En el escenario B llegaría hasta el 21,5%; y en el escenario C (pesimista), la máxima probabilidad sería del 44,3%. Según se puede apreciar en la tabla, cada píxel, caracterizado por una determinada clase de susceptibilidad, tendrá un valor de peligrosidad, aunque a partir de la clase 100 de susceptibilidad, los valores de probabilidad son muy pequeños o nulos.

En la Figura 7.17 se han representado en pseudocolor los modelos de peligrosidad correspondientes a cada uno de los escenarios considerados para el intervalo de tiempo considerado. Las zonas de menor probabilidad (valores próximos a 0) aparecen en color azulado mientras que las que presentan mayor probabilidad se han representado con un color rojo.

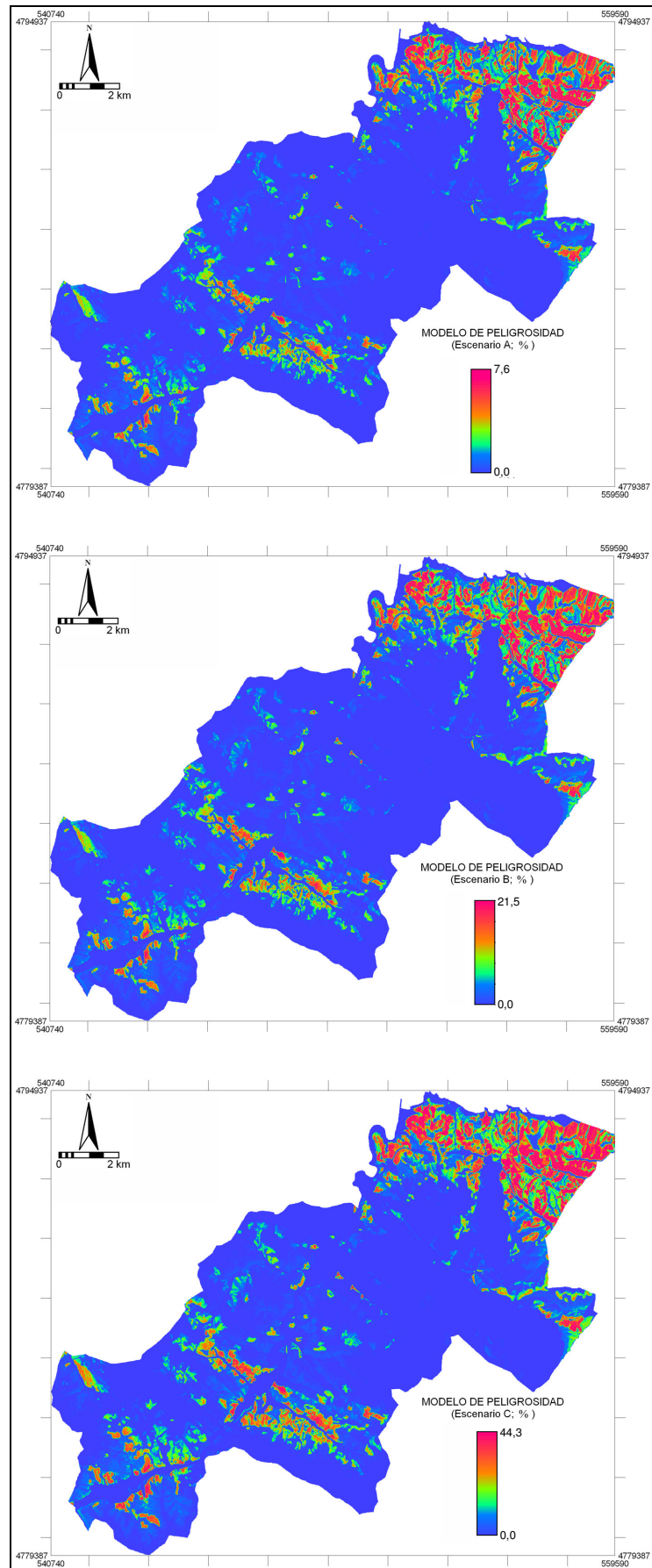


Figura 7.17. Modelos de peligrosidad, para un periodo de 50 años, obtenidos para el Bajo Deva de acuerdo con los tres escenarios propuestos (ver Figura 7.15).

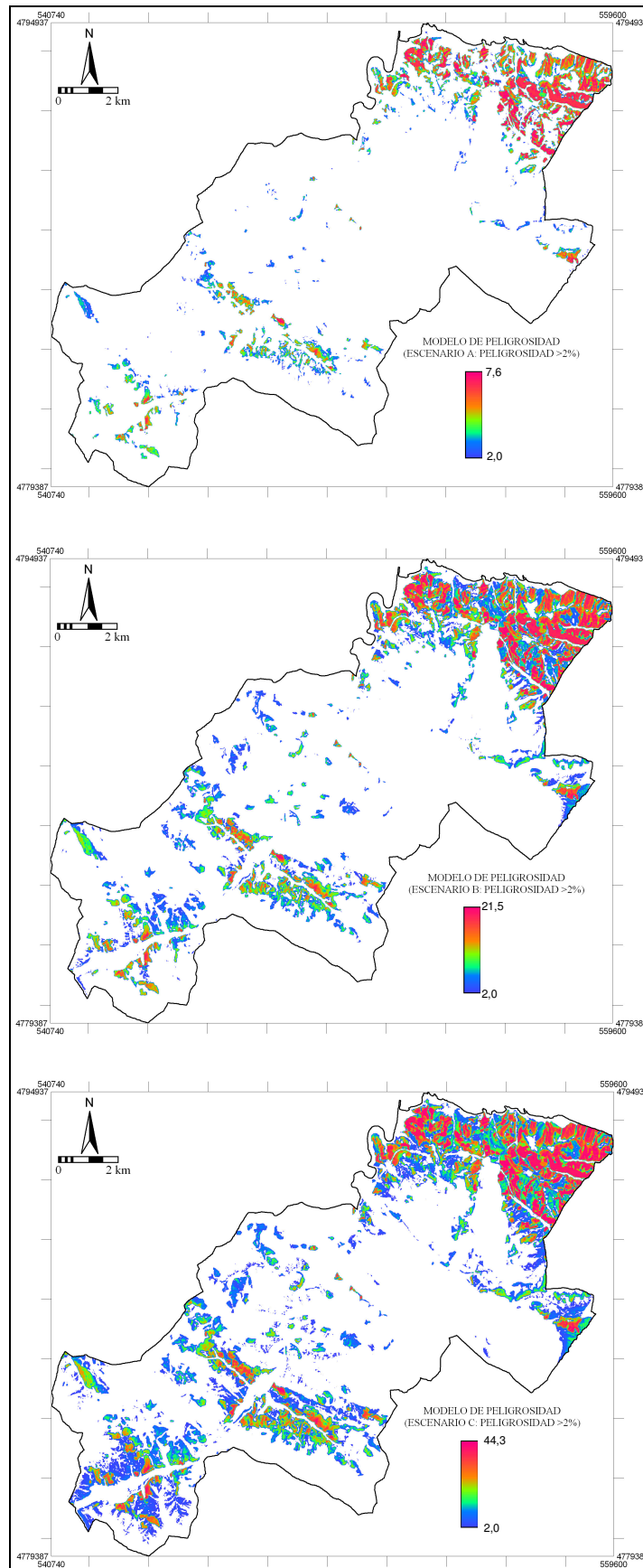


Figura 7.18. Modelos de peligrosidad, para un periodo de 50 años, en los que se han extraído las zonas con peligrosidad inferior al 2%.

Naturalmente, la forma del mapa y la distribución relativa de las zonas de peligrosidad son las mismas para los tres modelos, si bien varía la probabilidad de futuras ocurrencias.

Tabla 7.4. Clases de susceptibilidad a los deslizamientos, frecuencia y frecuencia ajustada en cada clase y probabilidad espacio-temporal (peligrosidad) para un periodo de 50 años en función de los escenarios propuestos. (Valores expresados en tantos por uno).

Clase de susceptibilidad	Porción de deslizamientos	Porción de deslizamientos (ajuste)	Probabilidad (Escenario A)	Probabilidad (Escenario B)	Probabilidad (Escenario C)
200	0,0486	0,0470	0,0760	0,2152	0,4434
199	0,0320	0,0440	0,0685	0,1955	0,4091
...
175	0,0118	0,01200	0,0206	0,0619	0,1432
...
150	0,0044	0,0030	0,0054	0,0164	0,0392
...
125	0,0022	0,0010	0,0014	0,0042	0,0102
...
100	0,0001	0,0001	0,0003	0,0011	0,0026
...
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

La Figura 7.18 muestra, para los escenarios A, B y C, las áreas con probabilidades superiores al 2% en 50 años; es decir, se han eliminado, para facilitar la visualización, las zonas con probabilidad inferior a dicho valor. Para el escenario A, existen 18,9 km² (equivalente al 13,5% del área de estudio) con una probabilidad de deslizamiento igual o superior al 2%; para el escenario B son 32,8 km² (equivalente al 23,4% del área de estudio), y para el escenario C, la superficie es de 43,9 km² (equivalente al 31,3% del área de estudio). En este último escenario, el más pesimista, una superficie de 13,3 km² tiene una probabilidad superior al 20% de sufrir deslizamientos. Esta figura, por tanto, permite identificar aquellas zonas que muestran una mayor peligrosidad y, consiguientemente, donde antes se debería actuar para reducir los posibles daños. Por otro lado, en estas zonas se debería evitar el ubicar elementos susceptibles de ser dañados por los deslizamientos.

7.2.1.1.1.2 Probabilidad a 10 años

Como ya se ha comentado, las predicciones a largo plazo (tal como la presentada anteriormente) muestran un alto grado de incertidumbre, dado que las condiciones, tanto humanas como naturales, pueden variar mucho en ese intervalo de tiempo. Por ello, es más adecuado realizar dichas predicciones para cortos lapsos de tiempo durante los cuales es de esperar que las condiciones futuras varíen en mucha menor medida. Con el fin de mostrar una predicción más acorde con las condiciones futuras, se ha realizado un análisis similar al anterior para un lapso de 10 años.

De acuerdo con los escenarios presentados, en un periodo de 10 años es de esperar un total de 490, 1.167 y 1.445 movimientos en el área de estudio, de acuerdo, respectivamente, con los escenarios A, B y C, lo que supone un área total deslizada (tomando como tamaño medio del deslizamiento una superficie de 510 m²) de 249.900 m² (Escenario A), 595.170 m² (Escenario B) y 736.950 m² (Escenario C). La probabilidad de deslizamientos para un periodo de 10 años se presenta en la Tabla 7.5. Si se compara esta tabla con la Tabla 7.4, se observa que, lógicamente, la probabilidad es mucho menor que en el caso anterior. La diferencia entre la probabilidad de nuevos deslizamientos a 10 y 50 años para los distintos escenarios varía entre un factor 5 en el caso del escenario A (frecuencia constante en el

tiempo) y un factor 10 en el caso del escenario C. En este último caso, la máxima probabilidad sería de 4,56% para 10 años y 44,34% para 50 años.

Tabla 7.5. Clases de susceptibilidad a los deslizamientos, frecuencia y frecuencia ajustada en cada clase y probabilidad espacio-temporal (peligrosidad) para un periodo de 10 años en función de los escenarios propuestos. (Valores expresados en tantos por uno).

Clase de susceptibilidad	Porción de deslizamientos	Porción de deslizamientos (ajuste)	Probabilidad (Escenario A)	Probabilidad (Escenario B)	Probabilidad (Escenario C)
200	0,0486	0,0470	0,0157	0,0370	0,0456
199	0,0320	0,0440	0,0141	0,0333	0,0410
...
175	0,0118	0,01200	0,0042	0,0099	0,0122
...
150	0,0044	0,0030	0,0011	0,0026	0,0032
...
125	0,0022	0,0010	0,0003	0,0007	0,0008
...
100	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
...
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

La Figura 7.19 representa los modelos de peligrosidad para un periodo de 10 años, obtenidos de acuerdo con los tres escenarios. Se ha elegido otro color para su representación, con el fin de diferenciarlo de la Figura 7.17. En esencia, sin embargo, es el mismo modelo, sólo cambia la escala de peligrosidad. En este periodo, en el caso del escenario A no existen zonas del área de estudio con probabilidad de nuevos deslizamientos superior al 2%. Los porcentajes del territorio con valores superiores a dicha probabilidad serían de 6,5% para el escenario B y 8,5% para el escenario C.

Los modelos de peligrosidad o probabilidad espacio-temporal así obtenidos se han utilizado para derivar los modelos de riesgo, de acuerdo con los resultados que se presentan más adelante.

Este análisis temporal permite obtener modelos de peligrosidad que consideren no sólo un escenario “probable” sino también otros escenarios que, a priori, podrían tener lugar de acuerdo con la tendencia de evolución observada en el pasado.

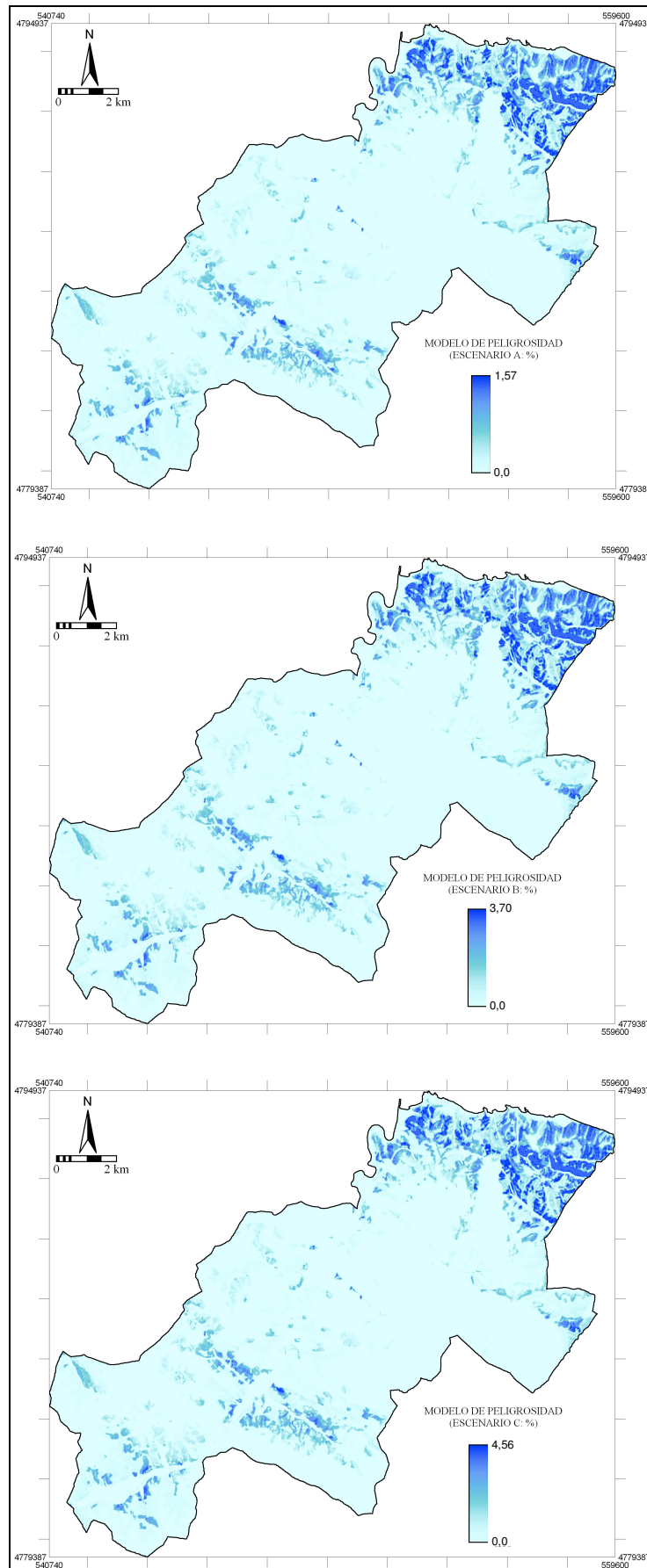


Figura 7.19. Modelos de peligrosidad, para un periodo de 10 años, obtenidos para el Bajo Deva de acuerdo con los tres escenarios propuestos (ver Figura 7.15).

7.2.1.1.2 Justificación de la determinación de tendencias, extrapolación y formulación de escenarios

Como se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior, la elaboración de modelos de peligrosidad, que necesariamente implica la estimación de frecuencias o probabilidad de ocurrencia de nuevos deslizamientos en el futuro, presenta bastante incertidumbre. Esa incertidumbre deriva del insuficiente conocimiento del proceso en relación con sus futuros factores condicionantes y desencadenantes, así como de la propia evolución futura de dichos factores.

Una posibilidad de abordar este problema, sobre una base empírica, es utilizar la extrapolación de las tendencias observadas y su relación con indicadores de tipo socioeconómico que pueden estar condicionando las mismas (Cendrero et al., 2006). En el caso concreto de la presente zona de estudio, los datos disponibles hasta ahora sugerían un acoplamiento entre Producto Interior Bruto (PIB) y frecuencia de deslizamientos, que los anteriores autores interpretan como una posible manifestación de la “dimensión geomorfológica del cambio global”. Sin embargo, los nuevos datos obtenidos y discutidos más arriba muestran una ruptura de la tendencia anterior para los últimos cuatro años analizados en este trabajo. Es difícil, con los datos actuales, dilucidar si este periodo representa simplemente una caída dentro de una tendencia general tipo “dientes de sierra”, o bien un verdadero desacoplamiento. En cualquier caso, eso introduce dudas con respecto a la posibilidad de utilizar las estimaciones de crecimiento del PIB (en sí mismas, por supuesto, también sujetas a incertidumbres) como estimadores de las tendencias de aumento en la frecuencia de deslizamientos (o de otros procesos geomorfológicos).

Por otro lado, y según muestran Cendrero et al. (2006), el tipo de relación citada entre PIB y frecuencia de eventos geomorfológicos observada en nuestra zona de estudio (Figura 7.20) parece existir en los ámbitos nacional (Figura 7.21; Italia) y global (Figura 7.22).

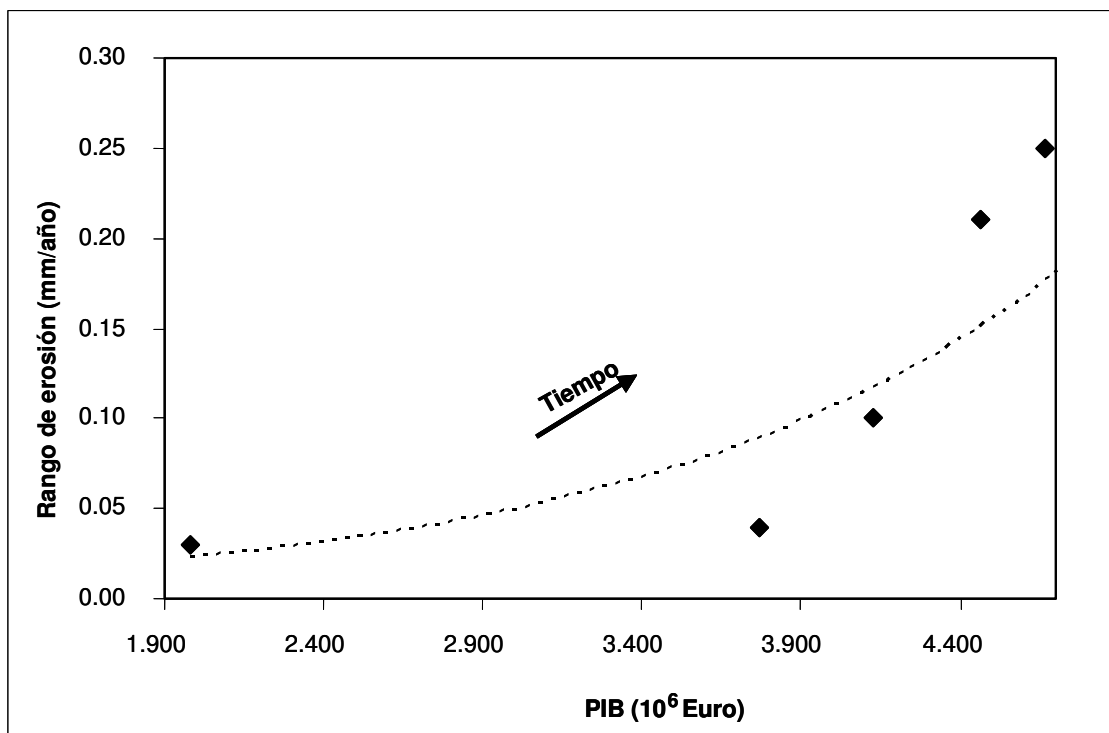


Figura 7.20. Correlación entre grado de erosión y PIB en el Bajo Deva.

Se ha recopilado información adicional sobre los indicadores, económico (PIB) y geomorfológico (nº de deslizamientos) para algunos países, con el fin de ver si la relación apuntada se da con carácter más general, o bien representa una simple coincidencia. De ser cierto lo primero, se tendría un criterio útil para estimar las tendencias más probables en cuanto a la futura evolución de los procesos y, por tanto, para formular escenarios de peligrosidad más probables.

La información relacionada con el PIB se ha obtenido para cada país del *Groningen Growth and Development Centre and The Conference Board, Total Economy Database*, <http://www.ggdc.net>).

La información referente a número de eventos se ha obtenido a partir de bases de datos existentes a nivel mundial o nacional. Estas bases de datos recogen solamente datos sobre eventos que han ocasionado algún tipo de pérdidas humanas y/o materiales, mientras que los procesos de escasa magnitud, los cuales no generan apenas daños, no suelen quedar registrados en las estadísticas y, por tanto, no se incluyen en dichas bases de datos.

Entre las bases de datos de desastres más completas están:

- *DesInventar*: se pone en funcionamiento a partir de 1993 por “La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres” y cuyo objetivo es realizar un inventario de los desastres que han afectado y afectan a América Latina. Los registros, obtenidos a través de hemerotecas para eventos del pasado, incluyen todo tipo de desastres (entre ellos los deslizamientos) que se actualizan continuamente, para los siguientes países latinoamericanos: Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Perú, República Dominicana, Trinidad y Tobago y Venezuela. Para algunos países se dispone de información a partir de 1900, mientras que para otros, los datos corresponden a periodos más recientes (a partir de 1970).

- *EM-DAT (Emergency Disasters Data Base)*: Esta base de datos creada por “The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)” de ámbito internacional pero perteneciente a la “Université Catholique de Louvain (UCL)” en Bruselas. A partir de 1973 comienza a hacer recopilaciones de desastres a nivel mundial. Este organismo obtiene información de los distintos países del mundo desde 1900, a través de distintas fuentes: agencias no gubernamentales, compañías aseguradoras, oficinas de Naciones Unidas, institutos de investigación y agencias de prensa.

Existen otros organismos como aseguradoras (Munich Re o Swiss Re) o *The Asian Disaster Reduction Center*, que también recopilan información sobre distintos tipos de desastres.

Después de la 2ª Guerra Mundial se ha incrementado notablemente el registro de datos sobre los distintos procesos geomorfológicos (Ibsen & Brunnsden, 1996; Vandine & Bovis, 2002), siendo a partir de las décadas de los 70 y 80 cuando se inician las principales recopilaciones de datos, los cuales son cada vez de mayor calidad y más abundantes. De acuerdo con esto, cabe esperar que, por el simple hecho de que la recogida de datos ha sido más completa, el número de deslizamientos a partir de los 70 sea superior a los registrados anteriormente. Por otro lado, ese efecto no debería dar lugar a un aumento marcado de los deslizamientos con el tiempo a partir de dichas fechas; sin embargo ese aumento se observa con claridad. Entre 1980 y 2000, por ejemplo, el número de desastres naturales se ha

multiplicado casi por tres (Figura 1.6; EM-DAT, 2005; Munich Re, 2005). Esto sugiere que hay factores que están determinando un aumento real de la frecuencia del proceso.

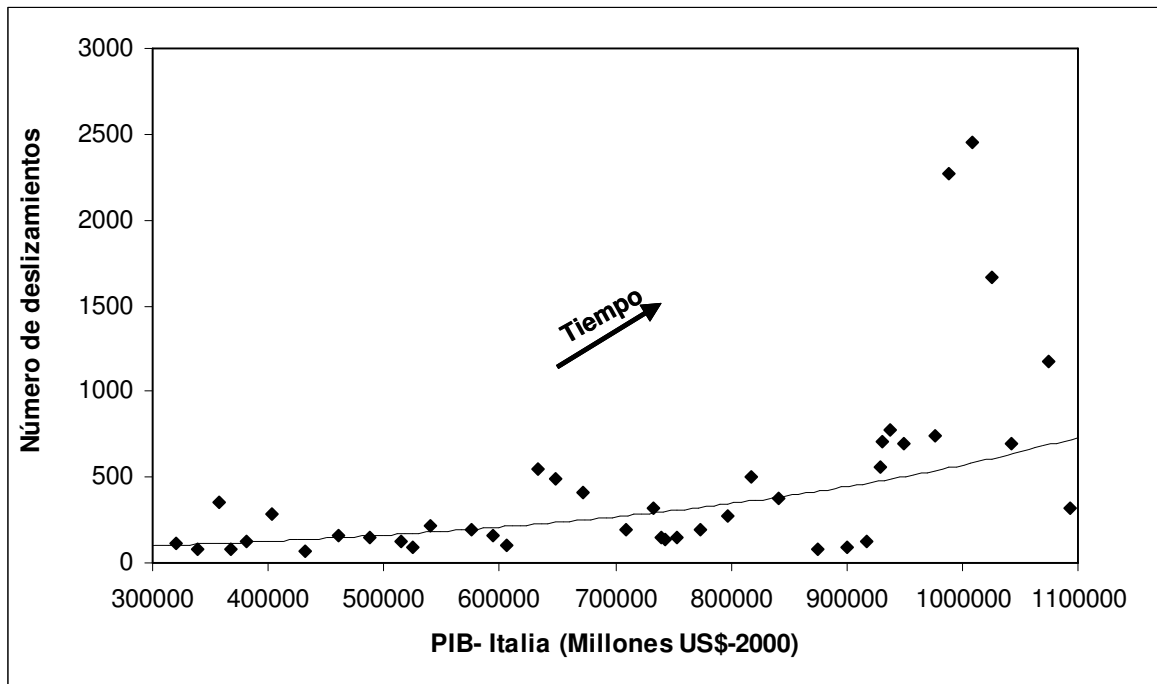


Figura 7.21. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Italia para el periodo 1960-2003. Se han representado las líneas de tendencia.

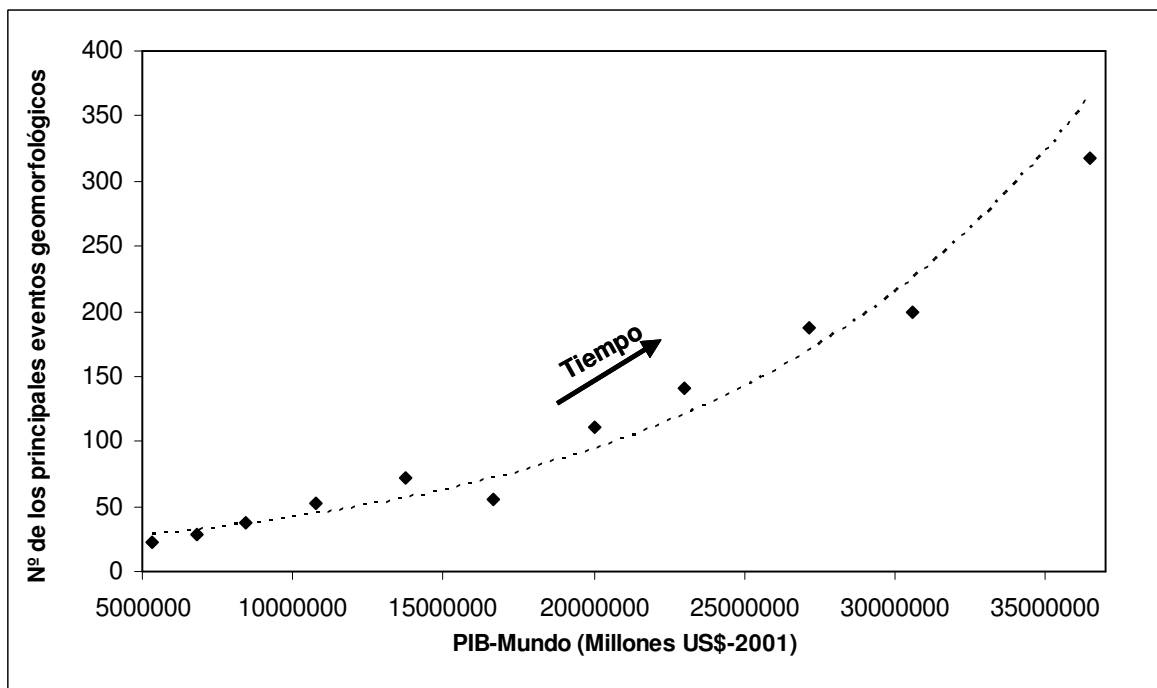


Figura 7.22. Relación entre PIB y principales eventos geomorfológicos en el mundo para el periodo 1950-2000. Se han representado las líneas de tendencia.

Lo que de forma general muestran todas estas bases de datos, es que existe un incremento de los desastres naturales en las últimas décadas. Como ya se indicó en el capítulo 1, el número de desastres naturales a nivel mundial se ha visto incrementado en los últimos años.

Según una nota de prensa de la oficina de la *International Strategy for Disaster Reduction* el número de desastres naturales en 2005 fue de 360 eventos, lo que supuso un incremento del 18% respecto a 2004, con 305 eventos (esto se ha debido, principalmente, al incremento de inundaciones y sequías). El incremento de pérdidas económicas, para el mismo periodo, fue del 71% (ocasionadas en su mayor parte por el huracán Katrina), mientras que el número de pérdidas humanas disminuyó.

En el caso de los deslizamientos, la información es más escasa. Algunos países están generando actualmente bases de datos sobre los deslizamientos que se han producido o se producen en su territorio.

En Irlanda (Charise McKeon, del *Geological Survey of Ireland*, comunicación personal), está en desarrollo una base de datos que incluye sólo grandes deslizamientos. En este país los deslizamientos aparecen en zonas muy concretas, al sureste y oeste del país. Para el siglo XIX hay registros de 17 deslizamientos; para el siglo XX hay 47 y, para el periodo 2000-2005, 17 movimientos. La fuente de información procede de periódicos, revistas científicas y proyectos de ingeniería. Aunque se considera que faltan registros, sobre todo de pequeños eventos, parece claro que hay un aumento marcado de la frecuencia con el tiempo (Figura 7.23).

La información para Italia es de las más completas que existen con casi 22.000 eventos registrados (Guzzetti, 2000; Guzzetti & Tonelli, 2004).

En el Reino Unido este tipo de información está en proceso de elaboración y, probablemente, en poco tiempo se disponga de un buen inventario de deslizamientos (David Petley, comunicación personal).

En España, con el nuevo Plan de Cartografía de Riesgos Geológicos (PRIGEO) promovido por el IGME, probablemente se recojan datos de este tipo.

En Japón se producen anualmente miles de deslizamientos. La *International Sabo Association* (2004) tiene registrados durante el periodo 1982-2001 un total de 27.687 movimientos, siendo en su mayor parte “debris flow” (Figura 7.24).

Australia dispone de una base de datos (*Australian Landslide Database*: <http://www.ga.gov.au/urban/factsheets/landslide.jsp>) que incluye 561 grandes deslizamientos, con una distribución temporal que también muestra un aumento de la frecuencia con el tiempo (Figura 7.25). Estos deslizamientos aparecen principalmente en la zona este del país.

En Canadá, se dispone de datos de unos 22.000 deslizamientos que se producen en la zona Oeste (Cordillera Canadiense) y en zonas próximas a la Península del Labrador.

Para algunos países latinoamericanos se dispone de datos sobre desastres ocasionados por deslizamientos a través de la base de datos DesInventar. Por ejemplo, para Colombia se dispone de registros de 4.116 movimientos producidos entre 1921 a 2002 (Figura 7.27); en Venezuela se han inventariado 245 deslizamientos entre 1970 y 2000; en Chile, para el periodo 1970-2000, se dispone de datos sobre 198 eventos (Figura 7.28); en Méjico, entre 1970 y 2001 se han inventariado 225 deslizamientos (Figura 7.29).

Las figuras 7.23 a 7.29 muestran las relaciones existentes entre los datos obtenidos sobre la ocurrencia de deslizamientos, en diferentes países y para distintos periodos, y los datos de PIB para los mismos. Conviene señalar que la naturaleza de los datos es muy diferente, anuales y de bastante precisión para el PIB y discontinuos e incompletos para los deslizamientos.

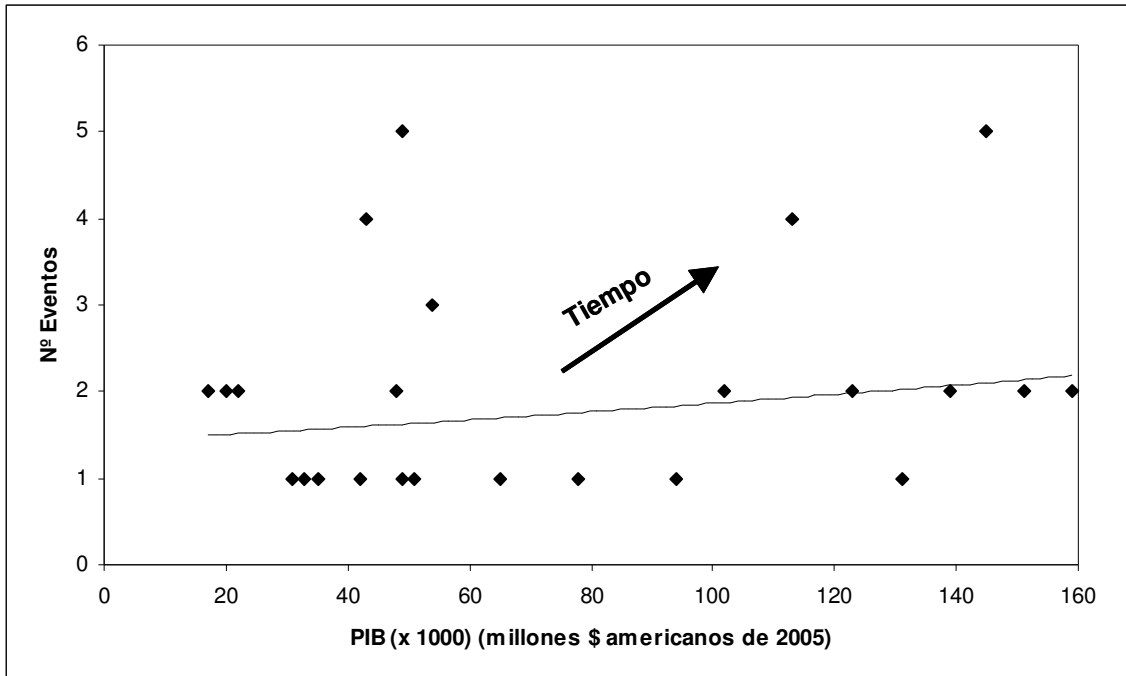


Figura 7.23. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Irlanda para el periodo 1954-2005. Se han representado las líneas de tendencia.

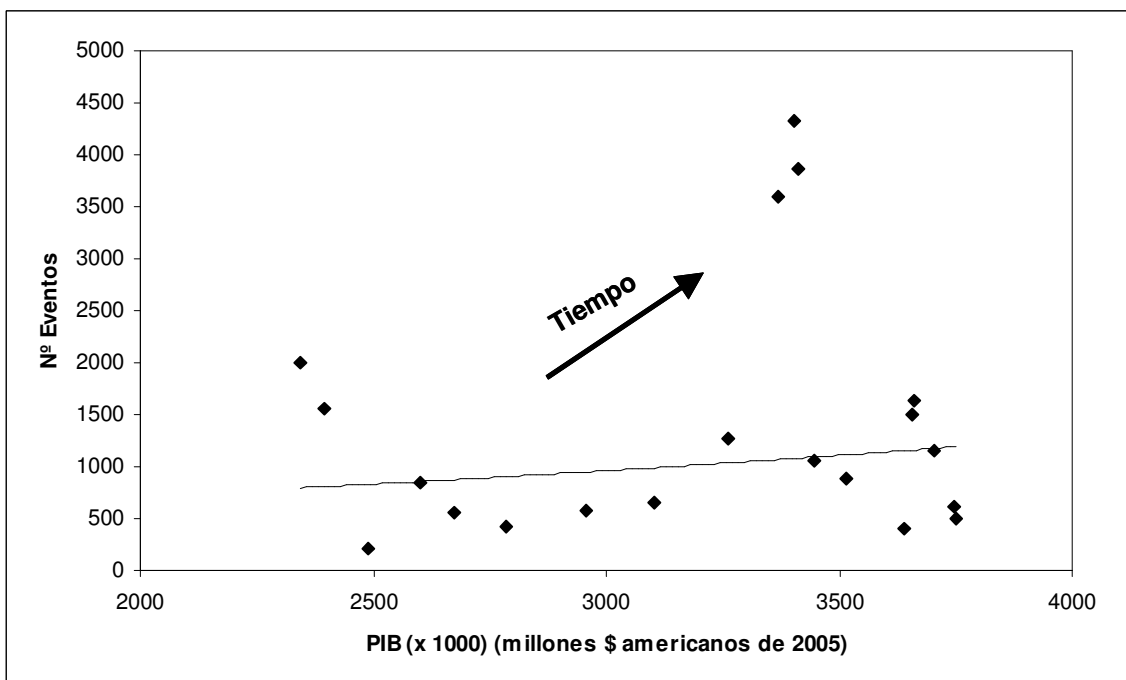


Figura 7.24. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Japón para el periodo 1982-2001. Se han representado las líneas de tendencia.

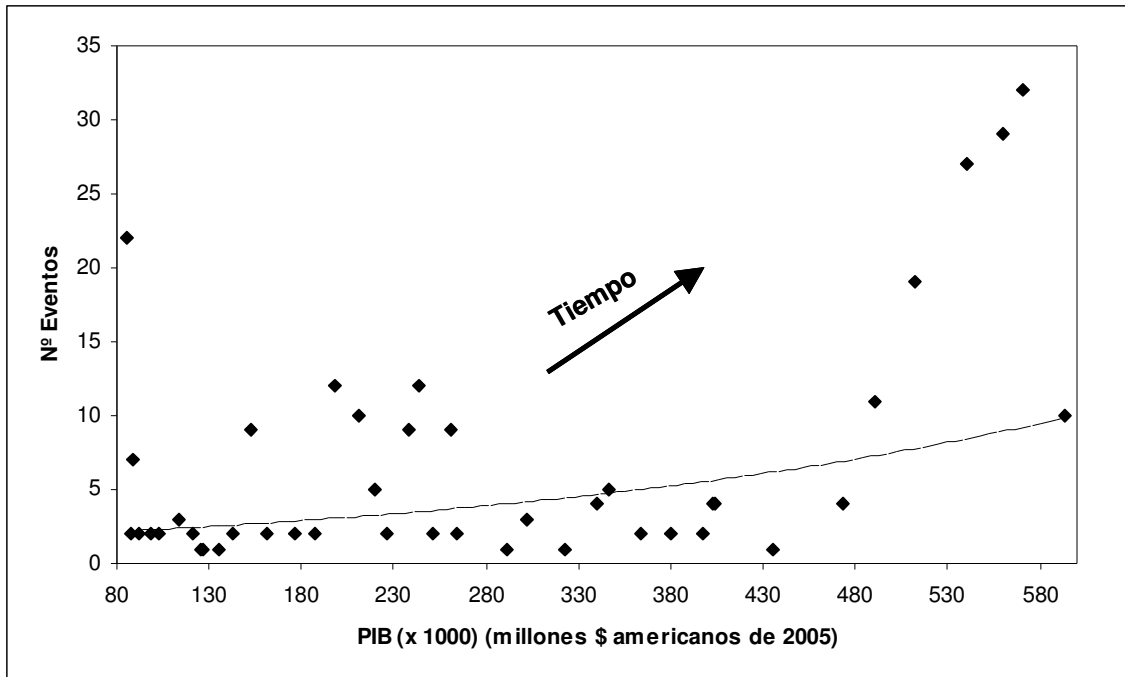


Figura 7.25. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Australia para el periodo 1950-2001. Se han representado las líneas de tendencia.

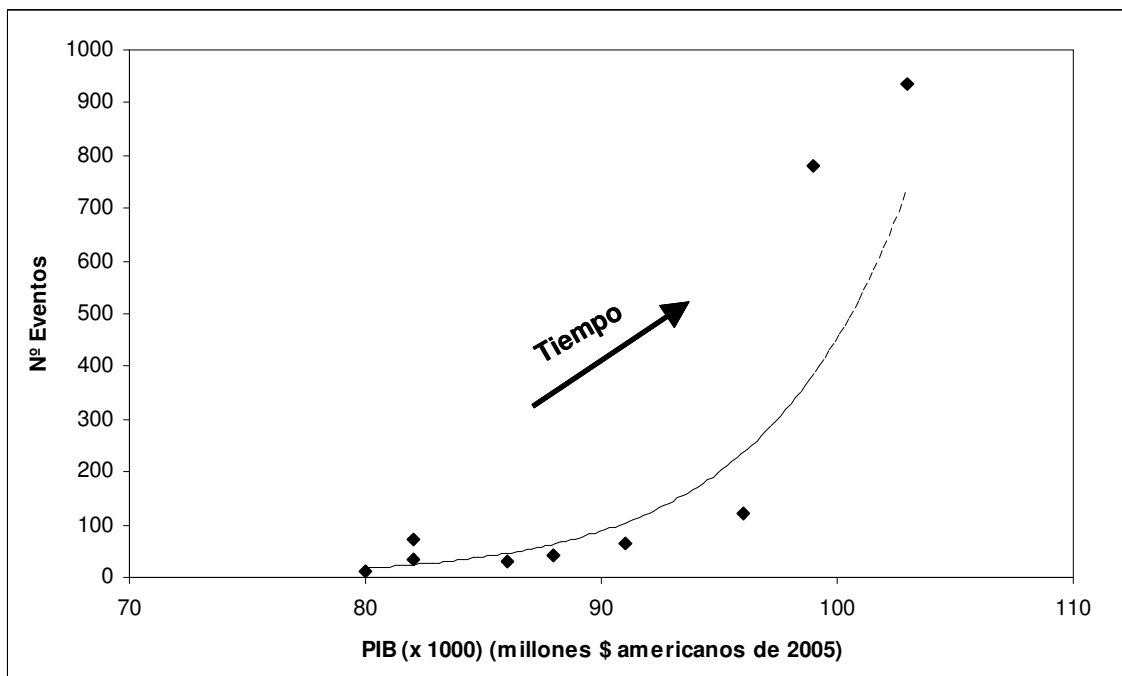


Figura 7.26. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Nueva Zelanda para el periodo 1996-2004. Se han representado las líneas de tendencia.

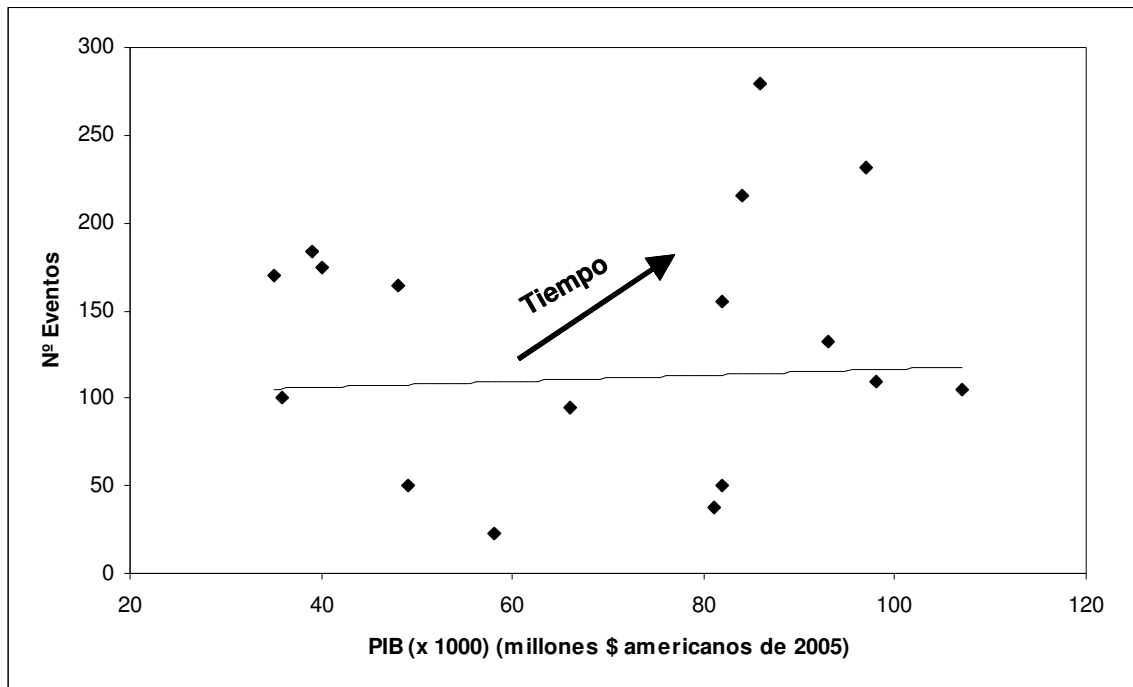


Figura 7.27. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Colombia para el periodo 1986-2002. Se han representado las líneas de tendencia.

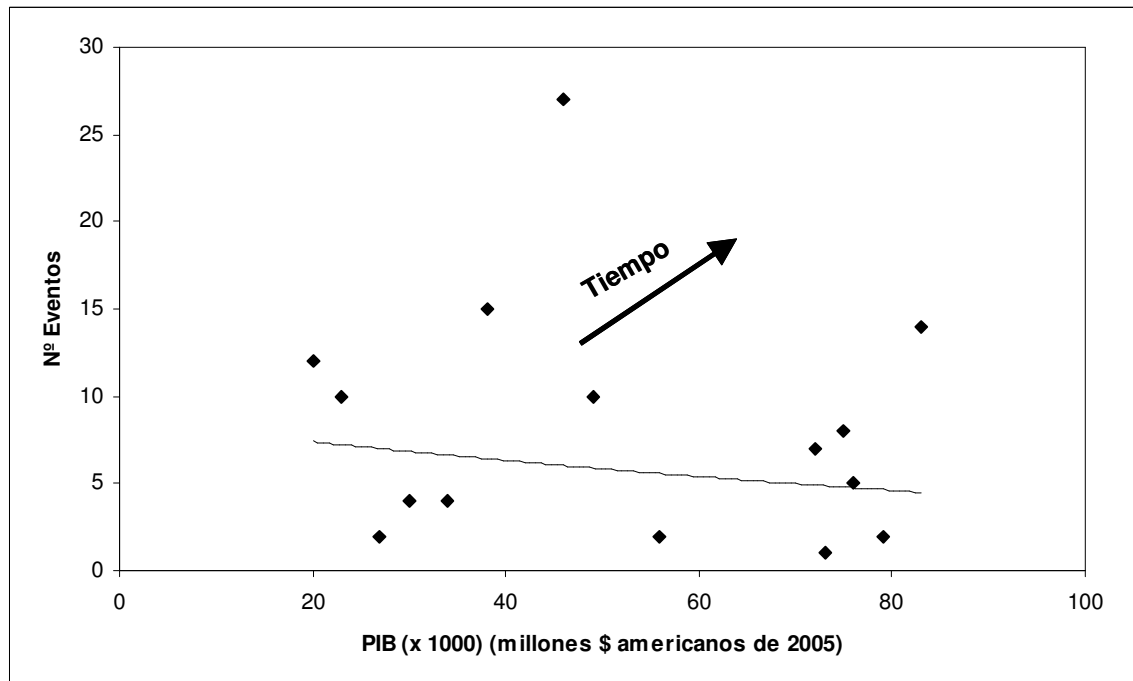


Figura 7.28. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Chile para el periodo 1986-2000. Se han representado las líneas de tendencia.

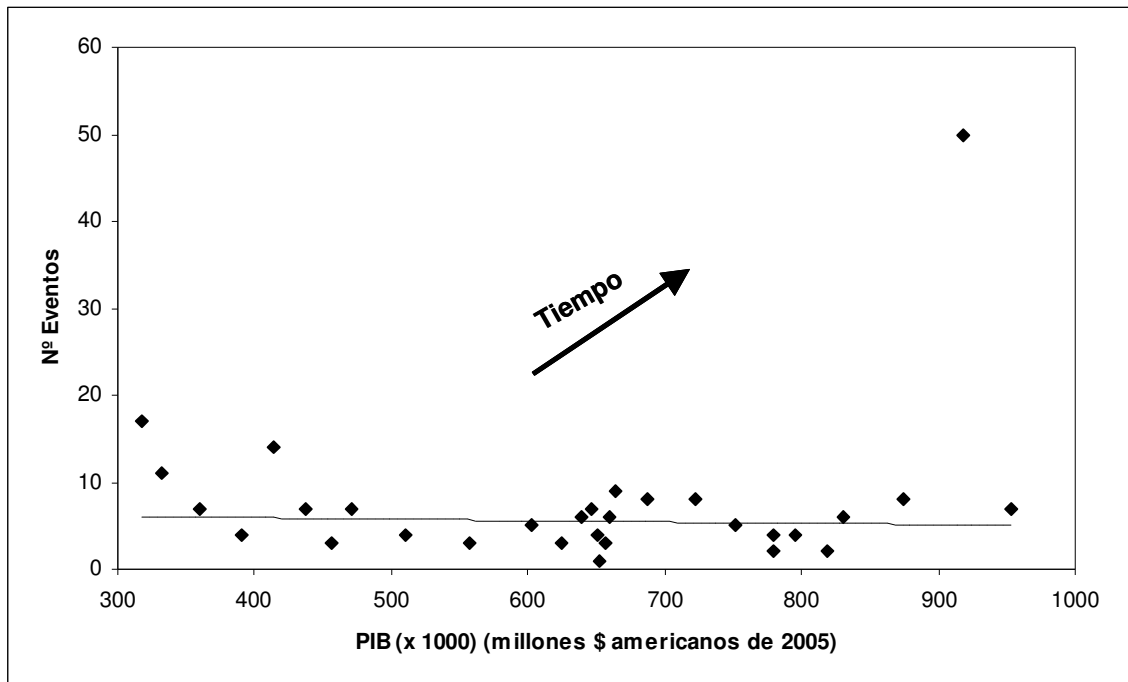


Figura 7.29. Relación entre PIB y número de deslizamientos en Méjico para el periodo 1970-2001. Se han representado las líneas de tendencia.

De todo lo anteriormente expuesto parece, en primer lugar, que existe una tendencia bastante general al aumento en la frecuencia de los eventos catastróficos de tipo geomorfológico con el tiempo (Figura 1.3). La relación entre deslizamientos y PIB, parece mostrar una tendencia de aumento en algunos de los países para los cuales se dispone de información tales como Australia (Figura 7.25), Irlanda (Figura 7.23), Italia (Figura 7.21) y Nueva Zelanda (Figura 7.26). En Japón (Figura 7.24) y Colombia (Figura 7.27) la tendencia al aumento es menos clara. En los otros dos casos, Chile (Figura 7.28) y Méjico (Figura 7.29), dicha relación no parece existir. Eso podría deberse a que las bases de datos están incompletas, bien porque el periodo de tiempo cubierto es corto, bien porque sólo se registran datos sobre eventos que han producido determinados daños humanos o materiales, o bien porque ese tipo de relación no funciona.

No obstante, hay que tener presentes algunas cautelas. En primer lugar, aunque la frecuencia de los eventos geomorfológicos no aumente (escenario de “peligrosidad constante”), es lógico que aumente el número de catástrofes, debido al aumento en la exposición que el crecimiento del PIB implica. Además, es también lógico esperar que los datos para épocas más recientes sean más completos que para periodos más antiguos. A pesar de dichas cautelas, los datos de la Figura 1.3 (EM-DAT, 2005) sugieren que el aumento en la frecuencia de los episodios de tipo geomorfológico refleja una realidad.

Parece por tanto que algunos de los datos obtenidos son coherentes con la hipótesis formulada en el capítulo 5 que supone: a) existe una tendencia al aumento de la frecuencia de los deslizamientos con el tiempo (y también de otros eventos relacionados con procesos geomorfológicos); b) dicha tendencia es reflejo en gran parte de la progresiva modificación de la capa superficial como consecuencia de influencias humanas directas e indirectas, siendo el PIB un indicador que refleja la capacidad humana para producir dichas modificaciones.

Si esta hipótesis se confirmase por medio de otros datos, se dispondría de un criterio adicional que ayudaría a estimar mejor los escenarios más probables de frecuencia futura y, por tanto, a elaborar modelos de peligrosidad más realistas.

A pesar de todo, este tipo de criterios deben aplicarse con gran cautela en el ámbito local, tal como muestran los datos más recientes sobre la zona de estudio y para algunos países. Incluso si la tendencia y el tipo de relación indicados fueran válidos en los ámbitos nacional y/o global, cabría esperar desviaciones apreciables en ámbitos locales, de extensión reducida, especialmente para periodos de tiempo cortos.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, se puede considerar que el escenario más probable para la zona de estudio debería estar comprendido entre los tres propuestos en este trabajo.

7.3 Resultados en relación con los elementos expuestos

Para cada tipo de elemento expuesto se ha creado un mapa de valor que se expresa en Euros por píxel. Tanto el mapa de valor de infraestructuras como el de valor de edificios o de usos del suelo, serán utilizados en la obtención de los respectivos modelos de vulnerabilidad y de riesgo específico. Para obtener estos mapas se han hecho una serie de suposiciones basadas en los datos obtenidos sobre los daños causados por los deslizamientos en el pasado.

Una parte importante de los resultados obtenidos, a partir de este apartado, se presenta en figuras en forma de mapas. Debido a las limitaciones del tamaño de la página, dichos mapas muestran un nivel de detalle reducido, que puede inducir a error. El nivel de precisión de los resultados corresponde a píxeles de 10 x 10 metros. En algunos casos, se ha incluido en la figura un recuadro con mayor nivel de detalle.

7.3.1 Infraestructuras

7.3.1.1 Estimación de daños potenciales

A la hora de estimar las pérdidas producidas en las infraestructuras se consideraron varias alternativas. Inicialmente, se tuvieron en cuenta los gastos medios anuales que se dedican a conservación de los distintos tipos de vías en España, a partir de las estadísticas del Ministerio de Fomento (Tabla 7.6). Sin embargo, estas cifras engloban otras muchas actuaciones, además de las debidas exclusivamente a movimientos de ladera, por lo que dichos datos sólo sirven de orientación para conocer los márgenes en que se mueven estas cifras.

Tabla 7.6. Costes medios anuales de conservación por metro y año de las principales vías de comunicación en España (Ministerio de Fomento, 2001).

Tipo de carretera	€/m/año
Media autovías y autopistas libres	19,83
Autovías urbanas (Madrid, Barcelona y Valencia)	39,6
Autovías con elevado tráfico	18,63
Carreteras convencionales	7,21

También se estudiaron los presupuestos dedicados por los organismos competentes (Departamento de Transportes y Carreteras de la DFG, Departamento de Transportes del Gobierno Vasco y Ministerio de Fomento) para reparar y conservar las infraestructuras en la provincia de Guipúzcoa. En este sentido, corresponden al programa de conservación de la red de carreteras de la DFG (carretera nacional y carreteras regionales) unos 1.215 kilómetros de carreteras. Para la conservación de esta red se contó en los últimos años con un presupuesto medio de unos 27 millones de Euros por año, lo que supone un gasto medio por kilómetro de unos 22.000 €/año. Por supuesto, esta cantidad no se dedica totalmente a afrontar los daños provocados por los deslizamientos, por lo que esta cifra se debe considerar como un máximo. Por otro lado, se ha de tener en cuenta que en determinadas zonas, con el fin de evitar reactivaciones de deslizamientos, se realizan labores de estabilización y protección, las cuales incrementan, de forma significativa, los gastos de reconstrucción o mantenimiento de esas zonas. Por ejemplo, en la zona de los acantilados de Deva, afectados por grandes movimientos (km 42,890-42,980 de la N-634), se dedicó en 1998 una cantidad media de unos 1.700 €/metro para estabilizar los taludes.

La autopista se ha visto afectada por deslizamientos de cierta entidad en sus taludes en los últimos años. Por ejemplo, existen registros de hemerotecas (el servicio vasco de

meteorología: EUSKALMET, dispone de una base de datos que permite realizar búsquedas sobre daños o desastres, etc., a partir de los datos publicados en la mayor parte de los periódicos españoles) donde se comenta lo siguiente:

El 20 de diciembre de 1980 se produjo, hacia las dos y media de la madrugada, en el kilómetro 63 de la autopista (municipio de Mendara) un desprendimiento de barro y ramas de árboles, a causa de la lluvia que obligó a cortar el tráfico de la calzada en sentido a Bilbao entre los puntos kilométricos 62 y 64. Sin embargo, la circulación no fue interrumpida en ninguno de los dos sentidos, ya que se habilitó la calzada en dirección a San Sebastián para la circulación en ambos sentidos.

También,

El 6 de octubre de 1995 varias rocas de gran tamaño cayeron desde una altura de 30 metros procedentes de un talud, en el kilómetro 69 de la autopista Bilbao-San Sebastián, a la altura de Elgoibar, sin que se produjeran heridos.

Y el más reciente

El pasado 20 de Diciembre de 2005, a las 7:50 de la mañana, a la altura del kilómetro 51,5 de la autopista A-8 (entre las salidas de Zestoa y el alto de Itziar), se produjo un desprendimiento de rocas de grandes dimensiones que afectó por completo los dos carriles en dirección a Bilbao y uno en sentido a San Sebastián, lo cual obligó a cortar el tráfico en ambos sentidos, desviándolo por la N-634 que soportó, a su vez, importantes retenciones. La autopista permaneció todo el día cortada en ambos sentidos y a las 13 horas del día siguiente fue restablecido el tráfico, ya que se habilitó uno de los carriles en sentido San Sebastián. Así todo, las retenciones en dicho punto fueron muy habituales. Las labores de mantenimiento del talud hicieron que hasta el 28 de Febrero de 2006, no se abriese uno de los carriles en sentido Bilbao.

La ladera de treinta metros de altura, compuesta principalmente por un flysch arenoso-margoso, se deslizó sobre la carretera y dejó un depósito de cuarenta metros de anchura. Como consecuencia del corrimiento, dos turismos y un camión quedaron parcialmente sepultados y, al menos, cuatro vehículos más resultaron con desperfectos de menor consideración. Dos de los conductores sufrieron lesiones leves.

El deslizamiento comentado anteriormente, ha generado unos gastos de aproximadamente 600.000 Euros, debido a las labores de estabilización y limpieza del talud (BIDEGI, comunicación personal). Sin embargo, los movimientos que se han estudiado en este trabajo son deslizamientos de pequeña entidad, es decir, no afectan prácticamente a la autopista (EUROPISTAS, comunicación personal), con lo cual los daños económicos producidos son pequeños y no suelen quedar registrados en ninguna estadística.

De acuerdo con la memoria de Euskotren, empresa que gestiona los ferrocarriles vascos de vía estrecha, en 2002 se dedicaron a actuaciones frente a riesgos geológicos (principalmente deslizamientos) un total de 825.531 €, mientras que en 2003 fue de 1.103.000 €. Teniendo en cuenta que la red de ferrocarril gestionada tiene una longitud de 181 kilómetros, dichas actuaciones conllevan un gasto medio de 4,6 €/metro. Sin embargo, los daños no se producen a lo largo de toda la longitud de vía sino en puntos concretos donde actúan deslizamientos de cierta entidad. En las hemerotecas ha quedado registrado, por ejemplo, que:

El 20 de Diciembre de 1980 hubo de suspenderse el servicio de ferrocarril de FEVE (línea Bilbao-San Sebastián) entre Deva y Elgoibar, por desprendimientos de tierra a la altura del barrio de Alzola. El año anterior, algunos desprendimientos de tierra bloquearon la vía del ferrocarril en la salida de Deva hacia Zumaya llegando entonces a quedar volcada una máquina de tren.

Las carreteras locales y los caminos vecinales, generalmente de hormigón, son los que sufren con mayor frecuencia los daños. Por ejemplo, un deslizamiento afectando a este tipo de carreteras, además de generar los daños directos correspondientes, origina otros gastos derivados de desplazar al lugar alguna pala excavadora, camiones, etc. Por tanto, teniendo en cuenta el costo de la excavadora (aprox. 100 €/hora), camiones (100 €/hora), 2 obreros, etc., en una jornada de trabajo el coste total generado sería de unos 1.800 €. De acuerdo con esto, el coste promedio para toda la zona sería de aproximadamente 3,6 €/metro. Algunos de los presupuestos de proyectos para estabilizar los deslizamientos que afectan a caminos asfaltados oscilan entre 12 y 80 €/metro.

Teniendo en cuenta la variabilidad de las cifras presentadas anteriormente, y a falta de más datos sobre daños de eventos concretos, en este trabajo se han hecho las siguientes suposiciones:

Considerando el tipo y magnitud del deslizamiento más frecuente que aparece en la zona de estudio (superficie media: 510 m²; volumen medio: 250 m³; anchura media: 24 m), los daños que se pueden ocasionar en estas vías son pequeños, ya que los deslizamientos son de poca entidad. Cuando se produce uno de estos deslizamientos, y si todo el material removido llega a la infraestructura, las pérdidas ocasionadas se deben sobre todo al coste de retirar el material, a las labores de limpieza y/o a la construcción de escolleras. Estas actuaciones tienen unos precios fijados por algunos organismos públicos en el momento de contratar determinadas obras. Este es el caso de la Comunidad de Extremadura (no se han encontrado el mismo tipo de datos para el País Vasco), la cual publica regularmente el *Banco de precios de la Junta de Extremadura*. En este caso se ha seleccionado el correspondiente al periodo 2002-2003, accesible vía Internet en la siguiente dirección (<http://www.juntaex.es/consejerias/fomento/dgu/bdpc2002/htmls/E32.html>). De este banco de precios se han extraído los precios correspondientes a las diferentes actuaciones que se deben llevar a cabo cuando se produce un deslizamiento de las características comentadas. Estas actuaciones son las siguientes:

- Transporte de tierras al vertedero, a una distancia menor de 10 km., considerando ida y vuelta, con camión basculante cargado a máquina, canon de vertedero, y con medios auxiliares, considerando también la carga (Tabla 7.7).

Tabla 7.7. Precios de diferentes tipos de actuaciones (transporte de tierras al vertedero) que se necesitan para reparar daños provocados por deslizamientos (origen: Banco de precios de la Junta de Extremadura).

Código	Cantidad	Unidad	Denominación	Precio	Importe
M05PN010	0,020	h.	Pala carg.neumát. 85 CV/1.2m ³	31,41	0,63
M07CB010	0,095	h.	Camión basculante 4x2 10 t.	19,53	1,86
M07N060	1,000	m ³	Canon de tierra a vertedero	0,24	0,24
TOTAL PARTIDA (€)					2,73

Para el deslizamiento considerado, el coste total ascendería a $2,73 \text{ €/m}^3 \times 250 \text{ m}^3 = \mathbf{682,5 \text{ €}}$.

- Escollera de 50 kg. colocada en protección de cauces, manto de espesor 1 m., incluido suministro y preparación de la superficie de apoyo, perfectamente rasanteada y terminada (Tabla 7.8).

La construcción de la escollera a lo largo de los 24 metros de la zona deslizada equivaldría a $16,33 \text{ €/m}^3 \times 24 \text{ m (longitud)} \times 3 \text{ m (altura)} \times 1 \text{ m (espesor)} = 1.176 \text{ €}$

Tabla 7.8. Precios de diferentes tipos de actuaciones (construcción de escollera) que se necesitan para reparar daños provocados por deslizamientos (origen: Banco de precios de la Junta de Extremadura).

Código	Cantidad	Unidad	Denominación	Precio	Importe
O01OA020	0,050	h.	Capataz	9,80	0,49
O01OA070	0,200	h.	Peón ordinario	9,18	1,84
M05EN010	0,250	h.	Excav. hidr. neumáticos 67 CV	32,45	8,11
P01AE010	1,600	t.	Escollera de 50 kg	3,68	5,89
TOTAL PARTIDA (€)					16,33

- Refuerzo del firme mediante, una capa de aglomerado, incluido riego (6 cm de espesor) a un precio de $3,61 \text{ €/m}^2$.

Si se tiene una superficie mínima de 24 m de longitud y 2 m de anchura esto supondría un coste de $3,61 \text{ €/m}^2 \times 48 \text{ m}^2 = 173 \text{ €}$

- Cuadrilla de obreros de tipo A (Tabla 7.9) que dedica todo el día para el trabajo en esa zona $23,69 \text{ €/hora} \times 8 \text{ horas} = 190 \text{ €}$

Tabla 7.9. Precios de la mano de obra que se necesita para reparar daños provocados por deslizamientos (origen: Banco de precios de la Junta de Extremadura).

Código	Cantidad	Unidad	Denominación	Precio	Importe
O01OA030	1,000	h.	Oficial primera	9,66	9,66
O01OA050	1,000	h.	Ayudante	9,44	9,44
O01OA070	0,500	h.	Peón ordinario	9,18	4,59
TOTAL PARTIDA (€)					23,69

El coste total que supondrían todas estas actuaciones en una carretera afectada por un deslizamiento ascendería a 2.222 €, que distribuidos en 24 metros lineales de carretera (que es la anchura media del deslizamiento), supondría unas pérdidas medias por metro de vía de $92,5 \text{ €/m}$. Esto es, teniendo en cuenta la incertidumbre implícita en esta estimación y que los costos en Guipúzcoa son mayores que en Extremadura, esa cifra se podría incrementar. Además, es lógico pensar que las pérdidas no serían iguales en todas las infraestructuras, pero aquí se ha considerado un valor medio para todas y que, probablemente, no difiere en mucho del valor real.

Como se ve, esta cifra es aproximadamente un orden de magnitud superior a los costos de mantenimiento antes indicados para el conjunto de la red, lo cual es lógico, ya que la peligrosidad es, en general, muy pequeña. En realidad, los costos promedio reales seguramente son superiores, ya que las labores descritas corresponden a un hipotético tramo de carretera local que no haya sufrido desperfectos importantes; lógicamente, no en todos los casos es así. Por ello, los costos aquí presentados deben considerarse como orientativos que podrían mejorarse con un análisis más detallado.

7.3.1.2 Estimación del valor del tipo de infraestructura

El coste medio de las autopistas y autovías en el norte de España es de unos 6 millones de Euros por kilómetro (6.000 €/metro). Para las carreteras nacionales este valor oscila entre 1,1 y 1,8 millones de Euros por kilómetro (valor medio estimado: 1.500 €/metro), según el número y tamaño de estructuras que contengan. En las carreteras regionales, los costes varían de 1,2 a 0,7 millones de Euros por kilómetro (1.200 y 700 €/metro, respectivamente) en función de la categoría de la carretera. El coste de las carreteras locales, si se tiene en cuenta que en esta zona casi todas ellas están construidas en hormigón y que éste tiene un valor medio de 100 €/m³, se puede estimar en un valor medio de 100 €/metro. En el caso del ferrocarril, el coste medio de vía es de 0,11 millones de Euros por kilómetro (110 €/metro) para la empresa FEVE (Juan de la Cruz, FEVE, comunicación personal), valor que se puede extrapolar a la infraestructura de Euskotren. En la Tabla 7.10 se resumen los precios de la infraestructura en €/metro y el valor total de cada tipo de vía en el área de estudio.

Tabla 7.10. Coste, en Euros por metro, de los tipos de infraestructura existentes en el área de estudio y coste total aproximado en millones de Euros para toda la zona de estudio.

Tipo de vía	Coste (€/m)	Coste total (M€)
Ferrocarril	110	2,4
Carretera local	100	76,3
Carretera Regional-B	700	43,6
Carretera Regional-A	1.200	0,2
Carretera Nacional	1.500	52,5
Autopista	6.000	154,2

7.3.2 Edificios

7.3.2.1 Estimación de daños potenciales

De los cerca de 3.000 edificios existentes en el área, muy pocos se han visto afectados por movimientos de ladera en el pasado. Los más propensos a sufrir daños son las construcciones individuales situadas en las zonas rurales. De cualquier modo, aunque se tiene constancia de que ha habido edificios afectados por deslizamientos, no se han podido obtener datos sobre los daños sufridos. Por tanto, para la evaluación de las pérdidas en los edificios se ha de recurrir a determinadas suposiciones. En este caso tampoco se ha considerado el tipo de uso del edificio ni el tipo de edificio, factores que influyen directamente en la vulnerabilidad.

Teniendo en cuenta el tipo de deslizamiento considerado en el análisis de la peligrosidad (según se ha indicado ya, un deslizamiento con las siguientes características: superficie media, 510 m²; volumen medio, 250 m³; anchura media, 24 m), es poco probable que este tipo de movimiento produzca daños apreciables a la estructura de un edificio, por lo que las posibles pérdidas económicas son pequeñas y, por tanto, su vulnerabilidad será relativamente baja, lo cual concuerda con los muy escasos daños registrados en el pasado. Según esta suposición, las pérdidas esperables son las debidas a los gastos originados por la limpieza y rehabilitación del edificio, que únicamente se puede ver afectado en su parte exterior. Para estimar estas pérdidas, al igual que en el caso de las infraestructuras, y de acuerdo con el *Banco de precios de la Junta de Extremadura 2002-2003*, se han considerado las siguientes acciones:

- *Transporte de tierras al vertedero, a una distancia menor de 10 km., considerando ida y vuelta, con camión basculante cargado a máquina, canon de vertedero, y con medios auxiliares, considerando también la carga (Tabla 7.7).*

Este trabajo tiene un precio de **2,73 €/m³** con lo cual si el volumen medio del deslizamiento es de 250 m³, implica un coste total de **682,5 €**.

- *Además de la retirada de tierras puede ocurrir que se necesite la mano de obra de un albañil (30 €/hora) y de un pintor (30 €/hora) que durante un día de trabajo recibirían un salario total de 480 €.*

Finalmente, el coste total supuesto asciende a **1.162,5 €**, que constituye el valor de las pérdidas máximas esperables en edificios si ocurriese un deslizamiento de las características mencionadas anteriormente. Por las razones ya comentadas, esta cifra se ha redondeado a **1.200 €**. Evidentemente, esta cantidad, durante el tratamiento informático, hay que distribuirla entre la superficie o número de píxeles que contienen al elemento correspondiente.

7.3.2.2 Estimación del valor del edificio

El valor de los edificios se ha obtenido a partir de los datos oficiales contenidos en el catastro. Entre los atributos más importantes de la base de datos del catastro destacan: tipo de edificio, superficie en m² y valor catastral. Dado que el valor catastral es inferior al valor de mercado o valor real del edificio, el valor del catastro se ha multiplicado por tres con el fin de tener un valor más real (Andrés Gómez, comunicación personal).

La Figura 7.30 muestra los valores de diferentes edificios en la zona; como es lógico, los valores más altos se localizan en las zonas urbanas.

7.3.3 Usos del suelo

7.3.3.1 Estimación de daños potenciales

Los deslizamientos han producido, y producen, importantes daños en prados y cultivos así como en las zonas forestales. Estos daños son debidos, principalmente, a los cambios en los usos del suelo o al cese de determinadas actividades; como resultado se suele producir la degradación del propio suelo que, en muchos casos, puede llegar a perder su capacidad productiva.

A partir de consultas realizadas a la Oficina Comarcal Agraria de Elgoibar sobre indemnizaciones pagadas a propietarios que vieron sus fincas afectadas por deslizamientos, se han obtenido algunos datos sobre las pérdidas ocasionadas por deslizamientos en anteriores eventos.

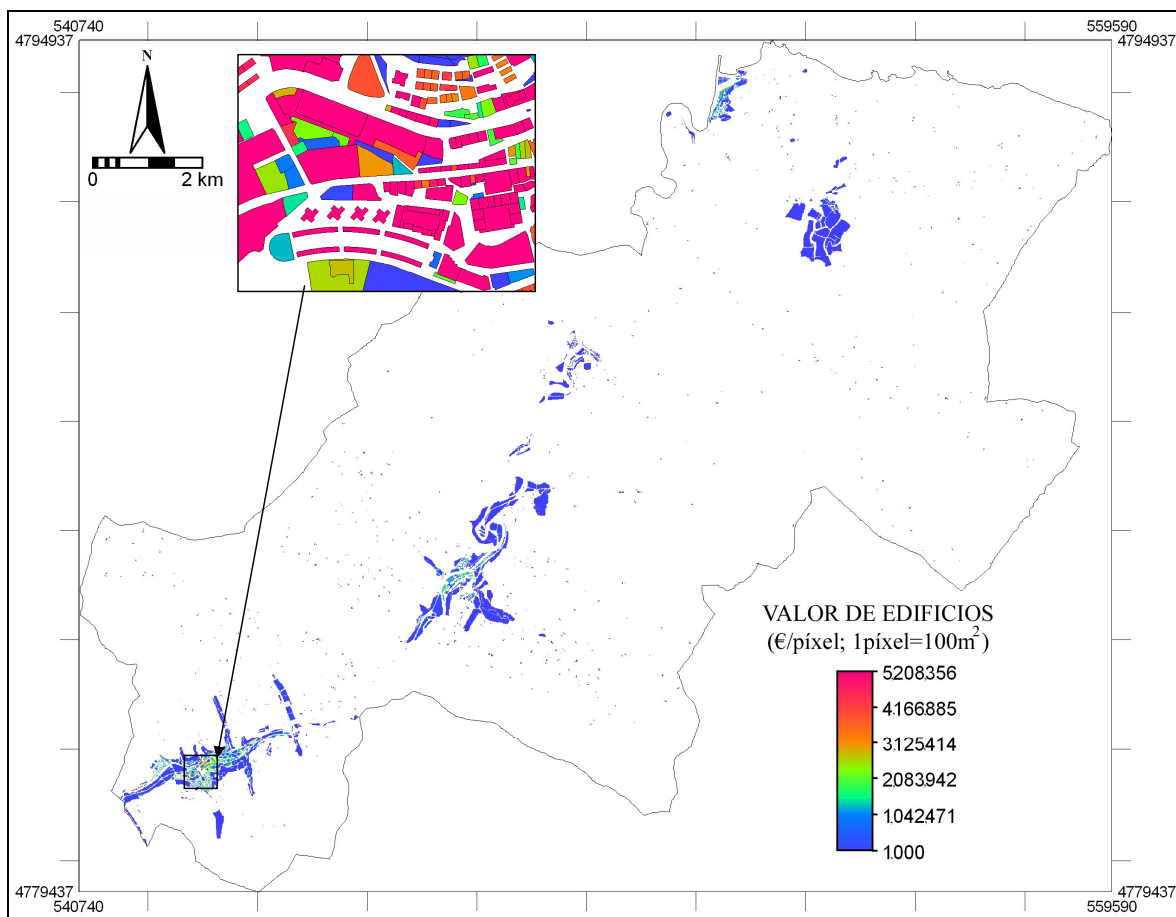


Figura 7.30. Modelo del valor de los edificios.

Las pérdidas que tienen lugar en los diferentes tipos de usos del suelo son generalmente pequeñas ya que los deslizamientos en sí son de reducidas dimensiones. De acuerdo con los diferentes tipos de usos del suelo identificados anteriormente se han estimado las pérdidas ocasionadas por el tipo de deslizamiento considerado.

En el caso de las masas forestales, los daños que se producen afectan a algunos árboles, por lo que las pérdidas se traducen en una merma de la producción forestal, así como en los costes de reforestar la zona. Teniendo en cuenta que en la provincia de Guipúzcoa la superficie forestal en el año 1999 era de unos 1.182 km² (INE, 2003) y la producción anual forestal es de unos 37 millones de Euros (EUSTAT, 2003), la producción forestal anual que podría perderse se estima en 0,03 €/m². Si a esta cantidad se le añade el valor de una nueva reforestación, cuyo coste aproximado es de 1.200 €/ha, las pérdidas totales ascienden a **0,15 €/m²**.

Los daños en los prados se deben fundamentalmente a la pérdida de la producción de forraje, así como a la degradación del suelo. Los daños provocados en 1988 por varios deslizamientos en un prado en Elgoibar (deslizamientos causados por intensas precipitaciones), se valoraron en 24.000 pesetas (actualizadas al año 2000), que son equivalentes a 144 €, afectando a 2.500 m² (lo que equivale a 0,06 €/m²). Por otro lado, la degradación del suelo en la misma zona fue valorada en 100.000 pesetas (actualizadas al año 2000), que equivalen a 0,24 €/m². Todo ello hace un total aproximado de **0,30 €/m²** en pérdidas.

El mismo deslizamiento que afectó a terrenos dedicados a cultivos y frutales, produjo daños valorados en **0,48 €/m²**.

En consecuencia, de acuerdo con las citadas valoraciones de la Oficina Comarcal Agraria de Elgoibar, los valores que se utilizarán para los demás tipos de usos son los siguientes:

- En pastizales (las pérdidas son debidas principalmente a la degradación del suelo) el valor tomado como referencia es de **0,1 €/m²**.

- Como no existen datos sobre daños en zonas de matorral o erial, las pérdidas en este tipo de terreno se han estimado en **0,01 €/m²**.

- A los usos del suelo clasificados como improductivos se les ha asignado un valor de pérdidas igual a **0 €**, ya que este tipo de uso se ha tenido en cuenta a la hora de estimar el valor de las infraestructuras y de los edificios, y a que su capacidad productiva desde el punto de vista agrícola es nula.

De los datos expuestos, se desprende que las áreas de prados y los cultivos, así como las zonas forestales, son los usos del suelo que más gravemente se ven afectados, en cuanto a pérdidas económicas, por los deslizamientos (Tabla 7.11).

Tabla 7.11. Estimación de pérdidas producidas en cada tipo de uso del suelo por el tipo de movimiento considerado en la zona de estudio.

Usos del suelo	Pérdidas (€/m ²)
Urbano (Improductivos)	0,00
Agua (Improductivos)	0,00
Roquedo (Improductivos)	0,00
Matorral, Espinos	0,01
Pastizales	0,10
Forestal arbolado denso/ralo	0,15
Prados	0,30
Labores intensivas (Frutales y cultivos)	0,48

7.3.3.2 Estimación del valor del tipo de uso del suelo

Según el MAPA (2002), en su publicación sobre los precios de la tierra, el valor medio de los prados en el País Vasco en 2001 era de aproximadamente **1 €/m²**; el valor medio de los pastizales era de **0,6 €/m²**; las tierras de labor tenían un valor medio de **0,8 €/m²**, pero si se dedican a frutales o a viñedos este valor puede incrementarse hasta **5 €/m²**. Para estimar el valor de las áreas forestales, se ha considerado el valor de las zonas de pastizales más el valor de la producción forestal, es decir, la suma de 0,6 €/m² más 0,04 €/m², que hace un total de **0,64 €/m²**. Estos valores se muestran en la Tabla 7.12 y Figura 7.31.

Tabla 7.12. Valor catastral (Departamento para la Fiscalidad y las Finanzas de la DFG, 2001) y valor de mercado (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2002) de cada tipo de uso del suelo en la zona de estudio.

Usos del suelo	Valor catastral (€/m ²)	Valor mercado (€/m ²)
Urbano (Improductivos)	0,00	0,00
Agua (Improductivos)	0,00	0,00
Roquedo (Improductivos)	0,00	0,00
Matorral, Espinos	0,004	0,10
Pastizales	0,010	0,60
Forestal arbolado denso/ralo	0,055	0,64
Prados	0,066	1,00
Labores intensivas (Frutales y cultivos)	0,133	0,80

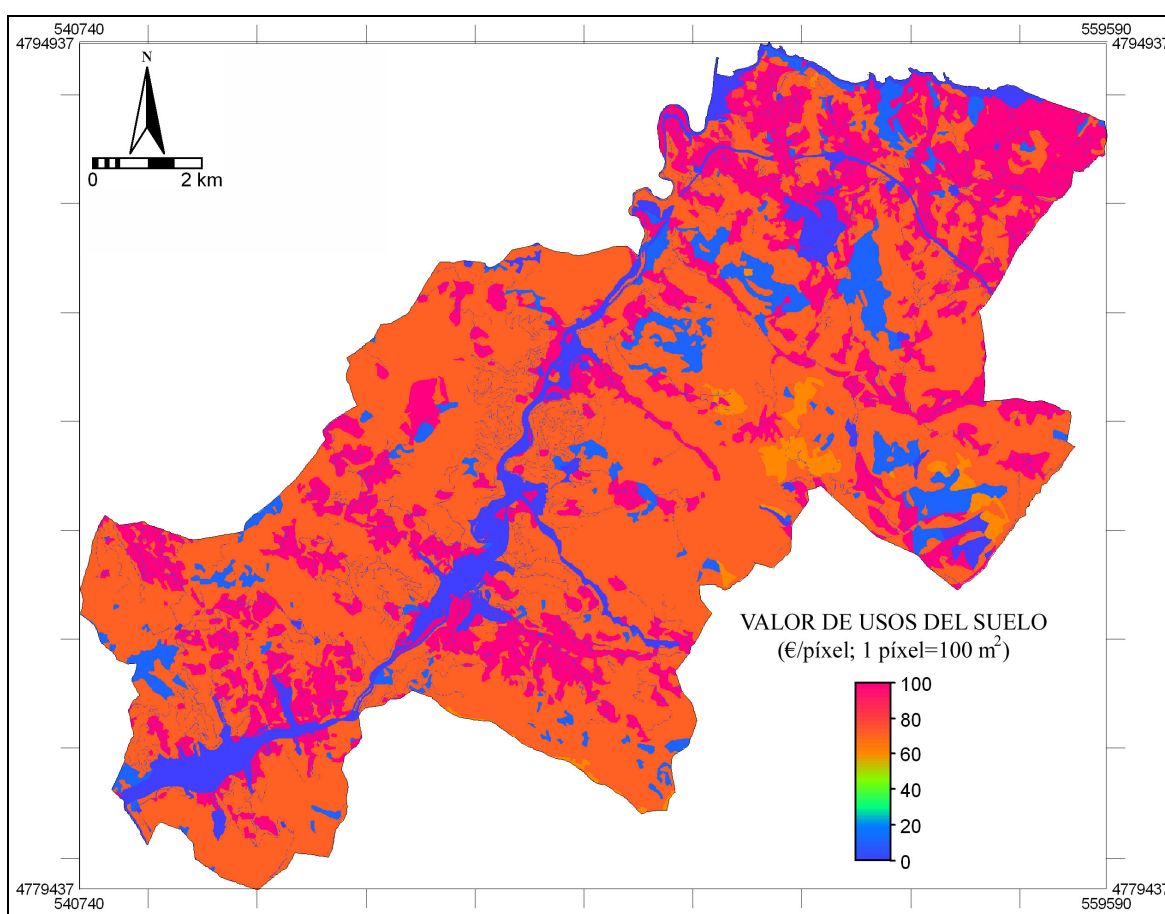


Figure 7.31. Modelo del valor de los usos del suelo.

7.4 Resultados en relación con la vulnerabilidad

En función de los tipos de vulnerabilidad considerada, directa e indirecta, y dado que la forma de estimarla es diferente para cada tipo, los resultados obtenidos también serán diferentes. La vulnerabilidad directa depende de las características del proceso y del tipo de elemento afectado. La vulnerabilidad indirecta está condicionada por las características del proceso y, principalmente, por el tiempo que permanecen bloqueadas las vías de comunicación (ver apartado 6.5.2.2).

7.4.1 Vulnerabilidad directa o pérdidas directas

A partir de la valoración de los daños (pérdidas) y del coste de los distintos elementos expuestos (valor económico) se han estimado los valores de vulnerabilidad de los diferentes elementos considerados, tal y como se describe en apartado 6.6.3.1 del capítulo de metodología. Las Tablas 7.13, 7.14 y 7.15 recogen los valores de vulnerabilidad, entre 0 y 1, obtenidos para cada uno de los elementos en riesgo considerados, así como los valores de costes y pérdidas. Asimismo, se muestran de forma gráfica los mapas de vulnerabilidad de cada elemento (Figuras 7.32, 7.33 y 7.34).

En el caso de las infraestructuras, son las carreteras locales y la línea de ferrocarril los elementos más vulnerables con vulnerabilidades próximas a 1. Esto es, el costo unitario de la reparación de daños por deslizamientos es equivalente al costo de construcción. El caso contrario lo muestran la autopista y las carreteras nacionales y regionales, las cuales suelen estar mejor protegidas, por lo que los deslizamientos les afectan en menor medida y, además, tienen costos de construcción muy superiores.

Tabla 7.13. Pérdidas económicas, coste y valor de vulnerabilidad para cada tipo de infraestructura.

Nombre	Pérdidas (€/m)	Valor de la infraestructura (€/m)	Vulnerabilidad
Ferrocarril	92,5	110	0,84
Carretera local	92,5	100	0,93
Carretera Regional-B	92,5	700	0,13
Carretera Regional-A	92,5	1.200	0,07
Carretera Nacional	92,5	1.500	0,06
Autopista	92,5	6.000	0,02

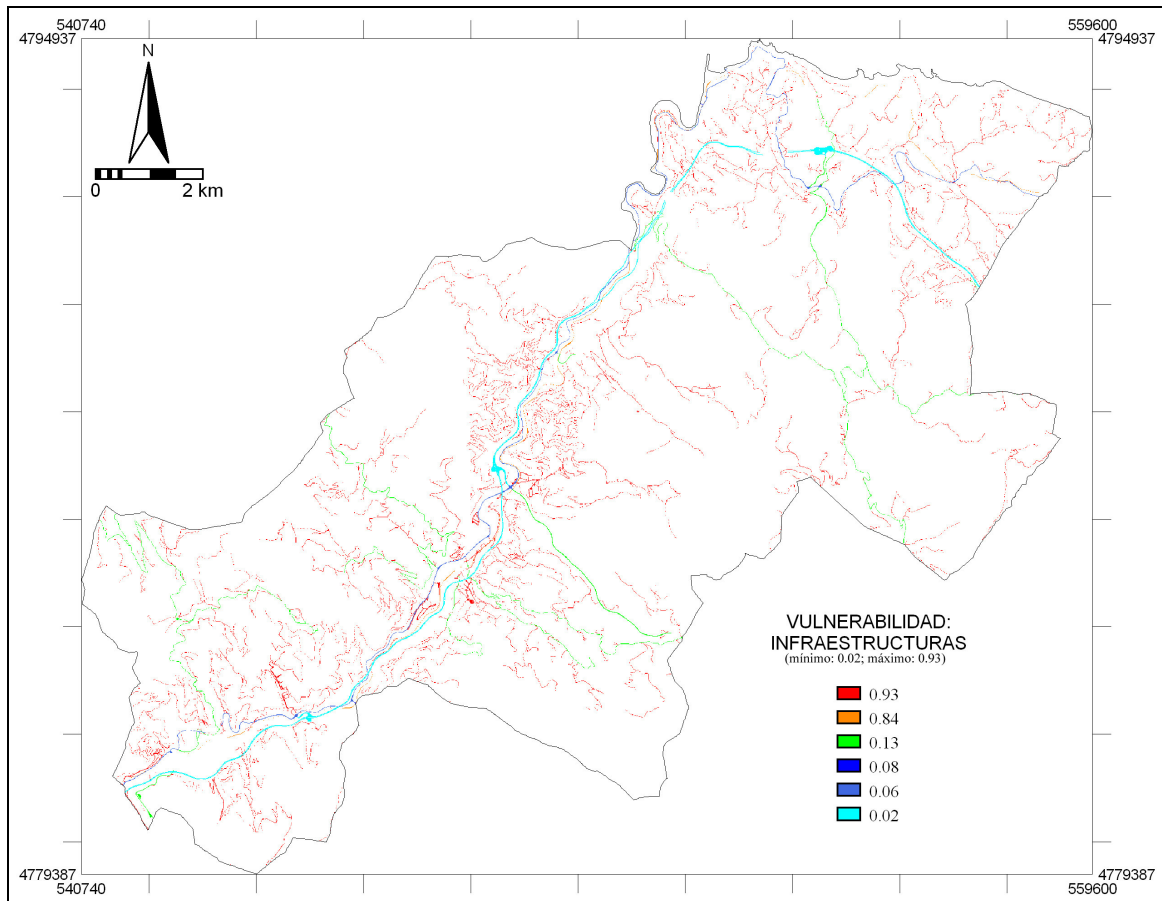


Figura 7.32. Modelo de la vulnerabilidad de las infraestructuras.

En el caso de los edificios, la situación es muy distinta. Los valores de vulnerabilidad, en general, son muy bajos (valor máximo de 0,24). Esto es debido fundamentalmente a los escasos daños que generan los deslizamientos sobre este tipo de elemento y al alto valor económico de los edificios.

Tabla 7.14. Uso, pérdidas, valor económico y valor de vulnerabilidad para cada edificio. (Cada número de la primera columna se refiere a un edificio concreto recogido en el catastro; se muestran solamente algunos a modo de ejemplo).

Edificio id	Destino	Pérdidas (€)	Valor de Mercado (€)	Vulnerabilidad (0-1)
1	Vivienda	1.200	57.843,48	0,0201
2	Vivienda	1.200	1.186.213,98	0,0001
3	Vivienda	1.200	1.225.644,09	0,0009
4	Vivienda	1.200	1.399.744,71	0,0008
5	Agropecuario	1.200	70.377,48	0,0165
6	Industrial	1.200	968.109,90	0,0012
7	Industrial	1.200	1.961.302,50	0,0006
8	Hostelería	1.200	106.732,17	0,0109
...

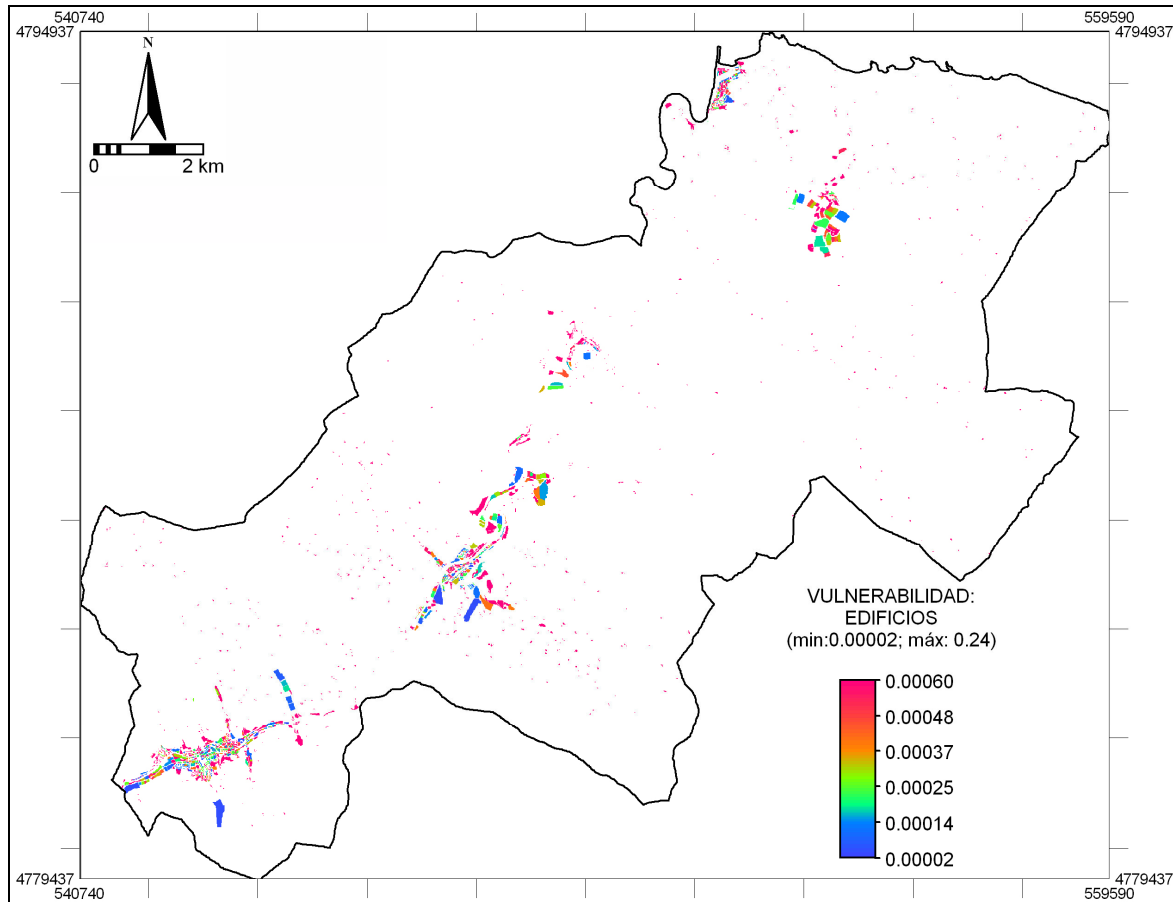


Figura 7.33. Modelo de la vulnerabilidad de los edificios. Debido a que existe un gran número de píxeles con valores muy bajos, para facilitar su visualización el histograma de valores se ha estirado y se han establecido los límites entre 2×10^{-5} y 6×10^{-3} .

Los usos del suelo más vulnerables son las zonas de cultivos (valor de vulnerabilidad: 0,60), seguidos de las zonas de arbolado y prados (valores de vulnerabilidad de 0,32 y 0,30, respectivamente), ya que son los usos de mayor valor económico y donde los perjuicios ocasionados por los deslizamientos, en cuanto a pérdidas de suelo o productividad, son más importantes.

Tabla 7.15. Pérdidas económicas, valor y valor de vulnerabilidad para cada tipo de uso del suelo.

Usos del suelo	Pérdidas (€/m ²)	Valor mercado (€/m ²)	Vulnerabilidad (0-1)
Urbano (Improductivos)	-	-	-
Agua (Improductivos)	-	-	-
Roquedo (Improductivos)	-	-	-
Matorral, Espinos	0,01	0,1	0,10
Pastizales	0,1	0,6	0,17
Prados	0,3	1,0	0,30
Forestal arbolado denso/ralo	0,23	0,71	0,32
Labores intensivas (Frutales y cultivos)	0,48	0,8	0,60

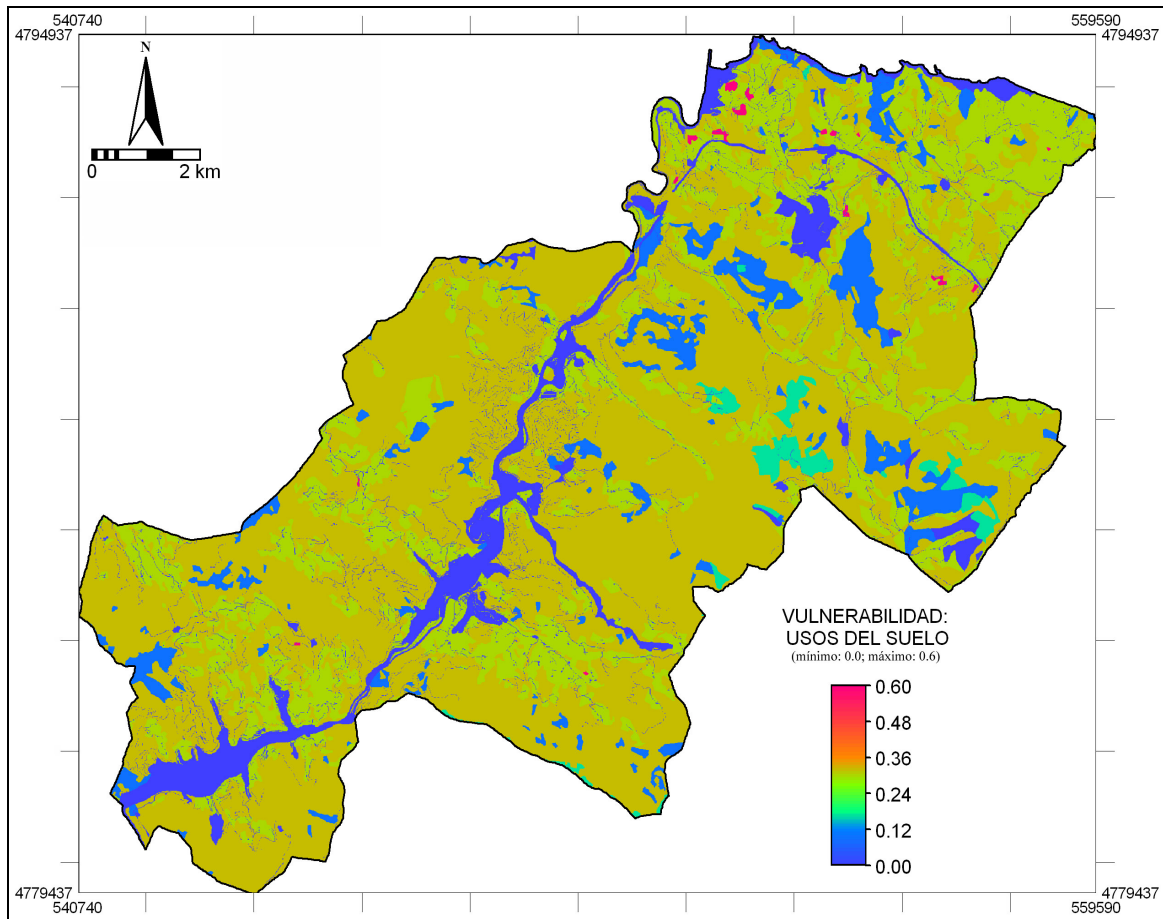


Figura 7.34. Modelo de la vulnerabilidad de los usos del suelo.

7.4.2 Vulnerabilidad indirecta o pérdidas indirectas

La vulnerabilidad indirecta o pérdidas indirectas debidas a los procesos de deslizamiento en la zona de estudio, se ha estimado teniendo en cuenta los efectos del “deslizamiento tipo” considerado en los distintos tipos de infraestructuras existentes (ver apartado 6.5.2.2).

A partir de la intensidad media diaria de circulación de vehículos, a lo largo de los diferentes tramos de las vías de comunicación, se ha estimado el número de personas que pueden verse afectadas, por hora, si un deslizamiento del tipo estudiado ocurre en cualquiera de los puntos de un determinado sector de la infraestructura considerada: autopista, carretera nacional y carreteras regionales. Las carreteras locales y el ferrocarril tienen un tratamiento distinto como más adelante se comenta.

El número de personas que viajan en un vehículo puede oscilar entre 1 y 5 por término medio (en el caso de microbuses o autobuses estos valores se incrementan). En Portugal se han recogido datos sobre el número medio de personas que viaja habitualmente en un vehículo a lo largo de una de las autopistas más importantes. Esos datos reflejan una media de 1,55 personas/vehículo (Jose Luis Zêzere, comunicación personal). Aunque esta cifra no tiene porque ser extrapolable a la zona del Bajo Deva, se ha considerado como válida para el análisis que se pretende llevar a cabo. Teniendo en cuenta el número de vehículos que circulan por hora en cada sector, el número de personas afectadas por hora y sector será:

$$N^{\circ} \text{ de personas afectadas en el sector por hora} = N^{\circ} \text{ de vehículos por hora} \times 1,55$$

Dado que muchas de las personas que viajan en esos vehículos no tienen una actividad productiva (desempleados, jubilados, estudiantes, etc.), con el fin de obtener el porcentaje de trabajadores que viajan en estos vehículos, y que son los más directamente afectados, se ha multiplicado el número de personas obtenido anteriormente por el porcentaje de personas en activo de la zona, el cual es del 45,5% (en el Bajo Deva) del total del número de personas (EUSTAT, 2003), por lo tanto:

$$N^{\circ} \text{ de trabajadores} = N^{\circ} \text{ de personas afectadas en el sector por hora} \times 0,455$$

A partir de las estadísticas de EUSTAT (2003) se ha obtenido el coste medio mensual que supone un trabajador para una empresa del País Vasco, valor que asciende a 2.380 Euros. A partir de estos datos se ha calculado el coste medio por trabajador y hora, suponiendo que se trabajan 240 horas por mes:

$$\text{Coste por hora de un trabajador} = 2.380 / 240 = 9,92 \text{ €/hora}$$

Esto significa que por cada hora de trabajo que un asalariado desaprovecha, la empresa perdería aproximadamente 10 Euros.

Por otro lado, a partir de experiencias de eventos pasados, se ha estimado el periodo de tiempo que determinadas infraestructuras podrían quedar bloqueadas al ser afectadas por este tipo de deslizamientos. Cuando se produce un deslizamiento de las características ya descritas, el tráfico podría quedar interrumpido en la autopista durante unas 2 horas, ya que ese periodo hay tiempo para habilitar alguno de los carriles del sentido contrario con el fin de evitar un atasco mayor.

Las pérdidas económicas indirectas, como consecuencia de la pérdida de horas de trabajo debido al retraso de los trabajadores en cada sector de la autopista (recordemos que cada sector muestra una determinada intensidad media diaria de vehículos), vienen dadas por la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas por sector de autopista} = N^{\circ} \text{ de trabajadores por hora} \times \text{Coste de un trabajador} (9,92 \text{ €/h}) \times \text{duración de la interrupción} (2 \text{ h})$$

Según esta expresión, el efecto indirecto que pueden ocasionar los deslizamientos, si se parase toda la autopista durante dos horas entre sus puntos inicial y final (afectando a 2.400 vehículos a la hora), ascendería a unas pérdidas totales de 33.486 € (Tabla 7.16), si bien es altamente improbable que se paralice toda la autopista. En el caso de que se produzca un deslizamiento y se pare el tráfico en un determinado punto de la autopista, el tramo afectado sería el existente entre las dos zonas, de entrada/salida, más próximas. Si esto ocurre, los vehículos comenzarán a pararse en las cercanías del deslizamiento y quedarán allí bloqueados. Durante ese tiempo, otros vehículos, conscientes del problema, podrán desviarse de la autopista en la salida más próxima, y darán un pequeño rodeo hasta incorporarse en la siguiente entrada. Por ello se han considerado las pérdidas potenciales para los tramos de la autopista (entre accesos) teniendo en cuenta las intensidades de tráfico que cada uno soporta. Dichas pérdidas se han representado en la Figura 7.35, donde cada sector o tramo de infraestructura muestra un valor de pérdidas potenciales que podrían tener lugar en cualquier punto del tramo. Así, cuando se produce un deslizamiento

en la autopista, dependiendo del sector donde el movimiento ocurra, las pérdidas pueden oscilar entre los 867 € y los 6.325 €.

Tabla 7.16. Pérdidas indirectas potenciales, en los diferentes sectores de cada tipo de infraestructura, que podrían producir los deslizamientos de la zona de estudio si bloqueasen alguno de los sectores de la vía durante unos determinados lapsos de tiempo. Obviamente las pérdidas indirectas potenciales no consideran la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos.

Tipo de vía	Pérdidas indirectas potenciales (€)
Ferrocarril	139.200
Carreteras Locales	22
Carreteras Regionales	14.447
Carretera Nacional	36.625
Autopista	33.486
Total	223.780

Otras carreteras de menor categoría, cuando son afectadas por deslizamientos, suelen permanecer con la circulación interrumpida durante un periodo de tiempo superior (en este caso se ha supuesto un tiempo de seis horas de acuerdo con la información proporcionada por el personal de la DFG), con lo cual es necesario desviar el tráfico por una ruta alternativa. Esto conlleva, además del tiempo de trabajo que se pierde, mayor distancia a recorrer, la cual también implica un coste. La distancia adicional media que recorren los vehículos al tomar una vía alternativa se estima en 5 kilómetros, el coste medio por kilómetro adicional recorrido es de 0,2 € y el tiempo que se emplea en realizar esa distancia adicional depende de la velocidad media desarrollada, la cual se supone que no supera los 70 km/hora. En función de estos criterios, la ocurrencia de un deslizamiento a lo largo de la carretera nacional, con una intensidad de tráfico en esta zona superior a la de la autopista, producirá unas pérdidas económicas que vienen dadas por la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas} = \text{Pérdidas debidas al aumento de la distancia} + \text{Pérdidas debidas al retraso}$$

es decir,

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas por sector de carretera nacional} = & [\text{longitud adicional del camino alternativo (5 km)} * \text{coste por km (0,2 €)} * \text{N}^\circ \text{ de vehículos afectados durante las seis horas de paro}] + \\ & [\text{tiempo empleado en realizar la distancia alternativa (5/70)} * \text{N}^\circ \text{ trabajadores afectados durante las seis horas de parada} * \text{coste hora trabajador (9,92 €)}] \end{aligned}$$

Aplicando la expresión anterior, las pérdidas para los distintos sectores de la carretera nacional oscilarían entre 1.600 y 7.600 €. Esto significa que hay tramos en los que, si se produce un deslizamiento, las pérdidas indirectas pueden ser muy importantes y, por tanto, deberían ser las zonas a proteger con mayor prioridad. Esas pérdidas superan a las de la autopista, lo que se explica por la mayor intensidad de tráfico en la carretera nacional y la mayor duración de las interrupciones.

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas por sector de carretera regional} = & [\text{longitud adicional del camino alternativo (5 km)} * \text{coste por km (0,2 €)} * \text{N}^\circ \text{ de vehículos afectados durante las seis horas de paro}] + \\ & [\text{tiempo empleado en realizar la distancia alternativa (5/70)} * \text{N}^\circ \text{ trabajadores afectados durante las seis horas de parada} * \text{coste hora trabajador (9,92 €/h)}] \end{aligned}$$

Las pérdidas por sector de carretera regional en la zona de estudio oscilan entre los 56 y 4.700 €.

En las carreteras locales y el ferrocarril el tratamiento es diferente, dado que no existen sectores con diferencias de intensidad en el paso de vehículos o de personas.

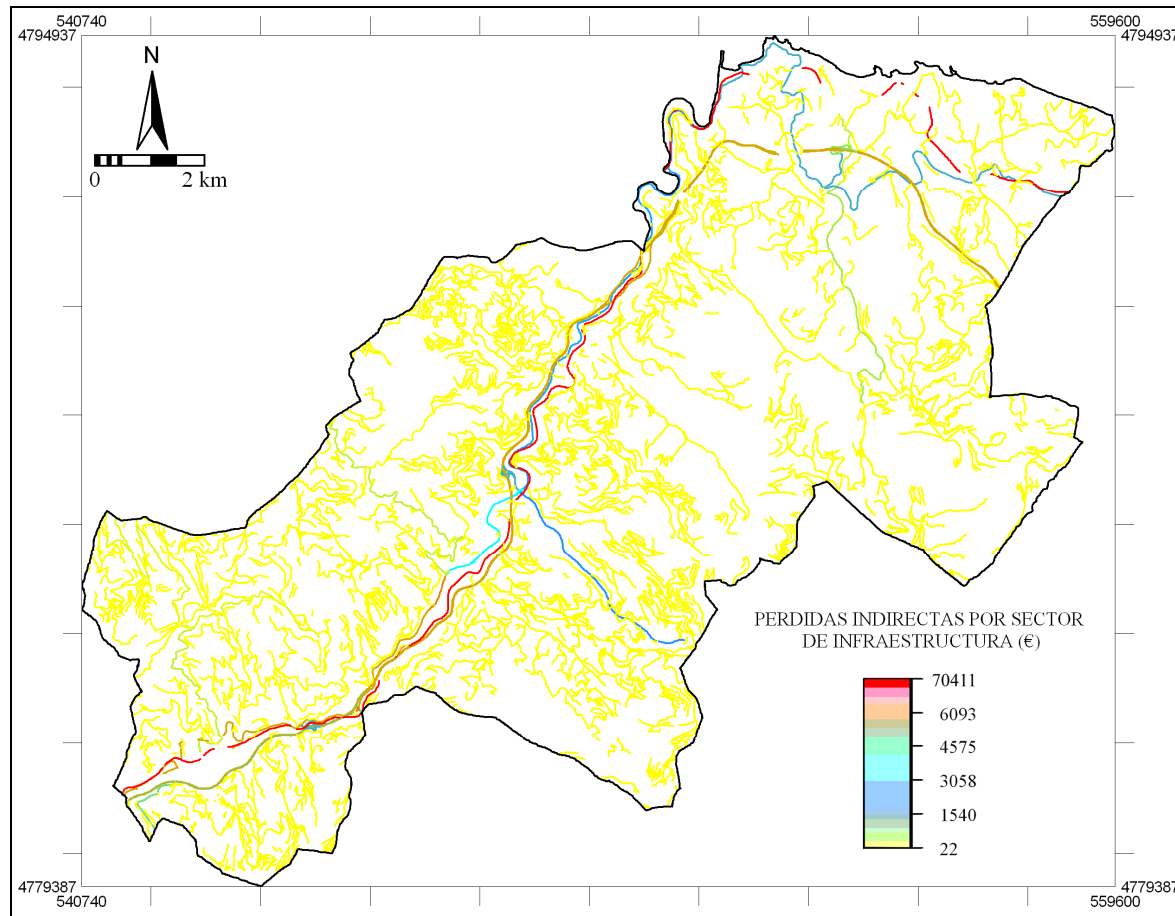


Figura 7.35. Modelo de pérdidas indirectas potenciales por sector o tramo de infraestructura.

Puesto que no existen datos sobre número de vehículos transitando diariamente por las carreteras locales, se ha supuesto una intensidad media diaria y constante de 25 vehículos (aproximadamente un vehículo a la hora). En este caso, la aparición de un deslizamiento se supone que produce una interrupción de veinticuatro horas en una carretera local. Sin embargo, el número de vías alternativas es mayor y, únicamente, pueden darse problemas si el deslizamiento se produce en zonas donde no existe una vía alternativa. La posibilidad de tomar un camino alternativo es mucho más fácil debido a la densa red de este tipo de infraestructuras existente. Por tanto, las posibles pérdidas serán debidas a un incremento del desplazamiento de 2 kilómetros, que se realiza a una velocidad de 30 km/hora. Por consiguiente, la expresión para el cálculo de las pérdidas indirectas quedaría así:

$$\text{Pérdidas carreteras locales} = [\text{longitud adicional del camino alternativo (2 km)} * \text{coste por km (0,2 €)} * \text{Nº de vehículos afectados durante las 24 horas de paro}] + [\text{tiempo empleado en realizar la distancia alternativa (2/30)} * \text{Nº trabajadores afectados durante las 24 horas de parada} * \text{coste hora trabajador (9,92 €/h)}]$$

Así, cuando se produce un deslizamiento en un punto cualquiera de una carretera local que queda cortada al tráfico durante todo un día, las pérdidas indirectas potenciales que se producen son insignificantes 22 € (Tabla 7.16). Esto se explica por la baja intensidad de tráfico existente en este tipo de vías y, en general, porque el ir de un punto a otro es

sencillo, debido a la densa red de vías existentes. En cambio, si se produjese un gran número de deslizamientos afectando a este tipo de vías de comunicación, las pérdidas podrían ser considerables.

Para el ferrocarril, se ha estimado que el retraso promedio que sufriría un trabajador sería de 3 horas. El coste de la contratación de autobuses para el transporte alternativo de los viajeros es de 2.700 €, a razón del alquiler de 3 autobuses (600 €/día/autobús) durante día y medio que se supone queda bloqueada la vía férrea. El número de trabajadores potencialmente afectados se ha calculado teniendo en cuenta que entre Ermua (localidad vecina a Eibar) y San Sebastián el número medio de viajeros diarios es de aproximadamente 10.000. Teniendo en cuenta la tasa de actividad de la población en el área de estudio (45,5%), esto equivale a 4.550 trabajadores diarios, aunque esa cifra presenta bastantes incertidumbres debido a que el número de viajeros entre ambas estaciones puede variar dependiendo de las fechas. No obstante, suponiendo esos datos como válidos, las pérdidas indirectas generadas en el ferrocarril vendrán dadas por la siguiente expresión:

*Pérdidas debidas a interrupciones en la vía del tren = [Nº de trabajadores afectados en día y medio * Coste de un trabajador (9,92 €/h) * tiempo de retraso (3 h)] + coste de transporte alternativo en autobús*

Esto supone un total de 139.200 € en pérdidas (Tabla 7.16), en el caso de que se produjese un deslizamiento en cualquier punto de la vía del tren.

De estas cifras se desprende, que es la vía del tren el elemento cuya interrupción por un deslizamiento daría lugar a las mayores pérdidas indirectas, seguida de la carretera nacional y de la autopista. Dichas pérdidas, para un deslizamiento promedio que afecte a un punto de la red de vías de comunicación, oscilarían aproximadamente entre 20 € (carretera local) y 139.000 (ferrocarril).

En este trabajo no se ha considerado el tráfico de mercancías, ni se han evaluado los retrasos en el transporte de las mismas, ni otro tipo de consecuencias económicas indirectas. La evaluación de todos esos costes requeriría un análisis más complejo, que no se ha abordado en este trabajo. En cualquier caso, es evidente que dichos aspectos contribuirían a aumentar las pérdidas indirectas.

El modelo de pérdidas indirectas para las infraestructuras debe entenderse como un modelo general en el que, aunque las pérdidas se producen en un determinado píxel, afectan a todos los píxeles del sector (a diferencia de las pérdidas directas, en las cuales las pérdidas tienen lugar sólo en los píxeles afectados, correspondientes a un elemento determinado), estén directamente relacionados con el sector o no.

En todo lo precedente se han estimado las pérdidas potenciales por evento, pero no se ha tenido en cuenta la frecuencia de ocurrencia de los deslizamientos. Sin embargo, las pérdidas se producirán más o menos frecuentemente en unas zonas que en otras, dependiendo de la probabilidad de aparición de los movimientos en uno u otro sector. El producto de estas pérdidas por la probabilidad de que se produzca un deslizamiento en un determinado punto de una vía, determina el riesgo que afecta a ése sector concreto.

7.5 Resultados en relación con el riesgo

Una vez obtenidos los modelos de peligrosidad, conocidos los valores de los elementos expuestos y estimada la vulnerabilidad de los mismos, se puede proceder a elaborar los diferentes modelos de riesgo. En lo que sigue se presentarán, por un lado, los modelos de riesgo específico (para cada elemento afectable), los cuales permitirán obtener el riesgo directo; por otro lado, se deriva el modelo de riesgo indirecto, resultado de la combinación del modelo de peligrosidad con la vulnerabilidad indirecta (actividades económicas). Por último, se presentará un modelo de riesgo total, teniendo en cuenta ambos efectos.

7.5.1 Modelos de riesgo específico

Los modelos de riesgo específico que se han obtenido son tres, correspondientes a las infraestructuras, los edificios y los usos del suelo. Dichos modelos se han elaborado para cada uno de los escenarios de peligrosidad propuestos. El modelo de riesgo se obtiene por medio del producto, para cada píxel, de la peligrosidad (probabilidad de nuevos deslizamientos) por el valor de los elementos que contiene y por su vulnerabilidad.

7.5.1.1 Modelos de riesgo específico para infraestructuras

En la Figura 7.36 se presentan los modelos de riesgo específico para las infraestructuras, según los tres escenarios de peligrosidad propuestos para el periodo de 50 años. El riesgo específico total, en infraestructuras, esperable en los próximos 50 años, de acuerdo con los escenarios A, B y C, es de 5.596.818 €, 16.530.670 € y 37.131.262 €, respectivamente (Tabla 7.17).

Tabla 7.17. Riesgo específico, en Euros, en infraestructuras de acuerdo con los escenarios de peligrosidad propuestos para los periodos de 50 y 10 años.

Infraestructura	50 años			10 años		
	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C
Ferrocarril	133.921	387.456	835.210	27.348	64.734	79.845
Carret. Locales	4.907.507	14.498.762	32.586.156	993.006	2.359.478	2.913.434
Carret. Regional	244.854	733.637	1.694.474	49.215	117.378	145.032
Carret. Nacional	268.972	784.626	1.718.908	54.798	129.700	160.093
Autopista	41.564	126.189	296.514	8.183	19.770	24.661
Total	5.596.818	16.530.670	37.131.262	1.132.550	2.544.864	3.323.065

Según se muestra en la Tabla 7.18, las mayores pérdidas promedio (por metro lineal o por píxel) para los distintos escenarios considerados corresponden a la carretera nacional, seguida de cerca por las carreteras locales y el ferrocarril. Esto, que a primera vista pudiera parecer sorprendente, se debe a que dicho valor promedio es el resultado de combinar los daños potenciales por cada evento, para cada tipo de estructura, con la probabilidad de que los píxeles que contienen dichas infraestructuras se vean afectados (por término medio) por futuros deslizamientos. Así, aunque los costos unitarios de reparación en las carreteras locales o en el ferrocarril sean relativamente bajos, la probabilidad de que los píxeles que contienen dichos elementos sufran deslizamientos en el futuro es bastante mayor que en el caso de las otras infraestructuras.

Si las estimaciones de riesgo se hacen para un periodo más corto, por ejemplo 10 años, las diferencias relativas entre los distintos escenarios se reducen. En el caso del escenario A el

riesgo sería, lógicamente, la quinta parte del correspondiente a 50 años. En los otros escenarios, B y C, sin embargo, dado que se contemplan tasas de aumento lineal y exponencial respectivamente, se obtiene una reducción más acusada. Esto es, el riesgo total para los próximos 10 años sería de 1.132.550 € para el escenario A, 2.691.060 € para el escenario B y 3.323.065 € para el escenario C (Tabla 7.17). Las pérdidas por metro de infraestructura para el periodo de 10 años se muestran en la Tabla 7.18; no se incluye la representación gráfica de esta situación ya que es similar a la mostrada en la Figura 7.36, sólo varían las cifras.

Tabla 7.18. Riesgo específico medio, en Euros por metro de infraestructura, de acuerdo con los escenarios de peligrosidad propuestos para los periodos de 50 y 10 años.

50 años				
Infraestructura	Longitud (m)	Pérdidas (€/m) Escenario A	Pérdidas (€/m) Escenario B	Pérdidas (€/m) Escenario C
Ferrocarril	21.794	6,14	17,78	38,32
Carreteras Locales	762.678	6,43	19,01	42,73
Carreteras Regionales-B	62.278	3,93	11,78	27,21
Carretera Nacional	34.995	7,69	22,42	49,12
Autopista	51.403	0,81	2,45	5,77
10 años				
Infraestructura	Longitud (m)	Pérdidas (€/m) Escenario A	Pérdidas (€/m) Escenario B	Pérdidas (€/m) Escenario C
Ferrocarril	21.794	1,25	2,97	3,66
Carreteras Locales	762.678	1,30	3,09	3,82
Carreteras Regionales-B	62.278	0,79	1,88	2,33
Carretera Nacional	34.995	1,57	3,71	4,57
Autopista	51.403	0,16	0,38	0,48

Esto significa, evidentemente, que las pérdidas anuales promedio deberían aumentar con el tiempo en el caso de los escenarios B y C, muy especialmente en el segundo. Dicho de otro modo, en el caso del escenario C, la mayor parte de las pérdidas contempladas para el conjunto de los 50 años considerados se deberían producir en la parte final del periodo, ya que la frecuencia de los deslizamientos sería mucho mayor en ese momento (si la tendencia citada se confirma).

Dado que existen incertidumbres importantes, por un lado, con respecto a la frecuencia futura de los deslizamientos y, por otro lado, sobre la futura distribución de los elementos vulnerables, parece prudente que las proyecciones se hagan para periodos del orden de una década, ya que a medida que se amplía el periodo de predicción se incrementa la incertidumbre y el error.

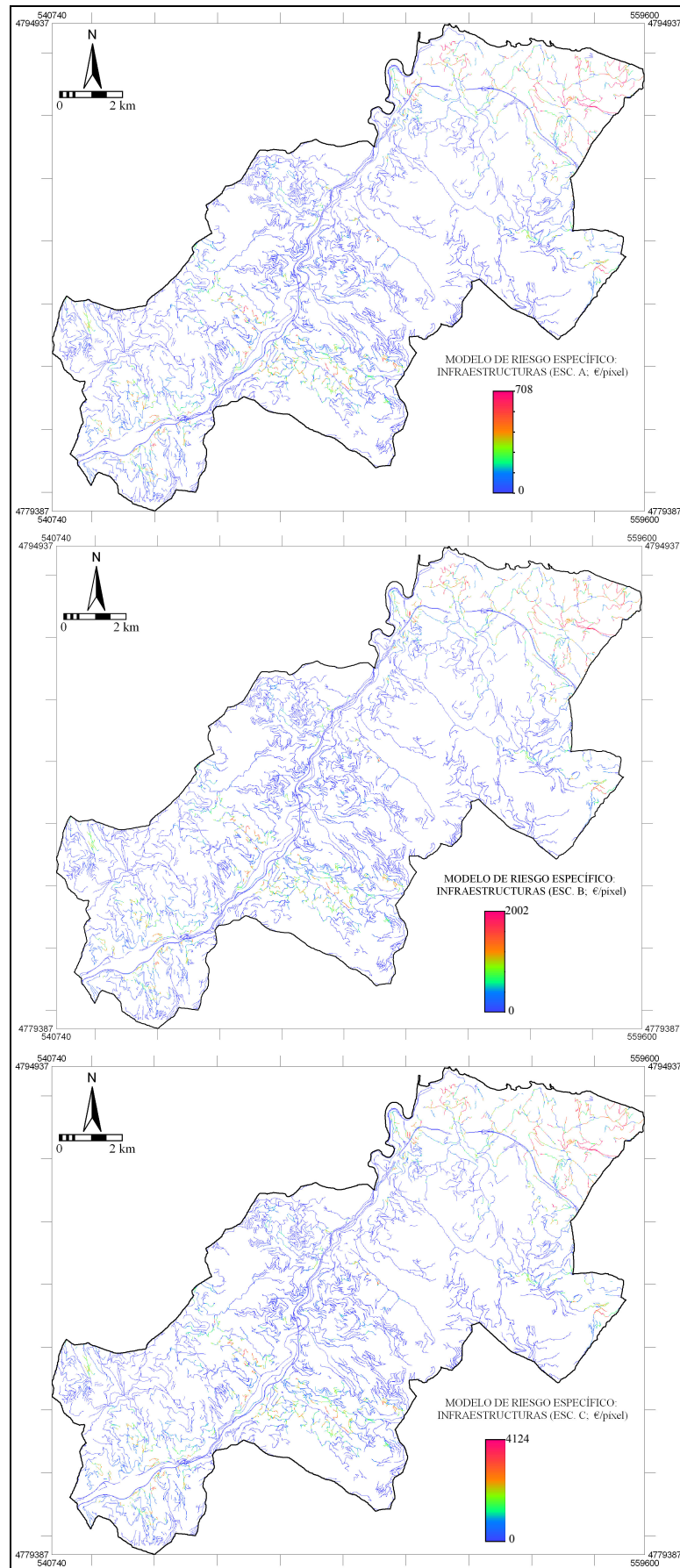


Figura 7.36. Modelo de riesgo específico por deslizamientos en infraestructuras para cada uno de los escenarios de peligrosidad propuestos para el periodo de 50 años.

7.5.1.2 Modelos de riesgo específico para edificios

El riesgo específico en edificios o construcciones es muy bajo, principalmente debido, como anteriormente se ha comentado, a su baja vulnerabilidad. Las pérdidas esperadas en los próximos 50 años son de 7.851 € en el escenario A, 23.304 € en el escenario B y de 52.809 € según el escenario C. Estas cantidades son insignificantes si se comparan con las presentadas para las vías de comunicación. A pesar de mostrar un riesgo muy bajo, entre un 20 y un 35% de los edificios podrían sufrir daños por deslizamientos durante el periodo de tiempo analizado, ya que se sitúan en áreas que muestran cierta peligrosidad.

Las estimaciones de riesgo específico para el periodo de los 10 años próximos, como es lógico, son aún menores: 1.586 € en el escenario A, 3.768 € en el escenario B y 4.656 € en el escenario C. Dichas cifras indican que las pérdidas anuales en edificios son mínimas.

No se incluye una representación gráfica de este modelo de riesgo dado que su visualización es dificultosa (salvo si se selecciona una pequeña zona) a consecuencia del corto rango de variación de tonos que tiene la escala de color.

7.5.1.3 Modelos de riesgo específico para usos del suelo

En el caso del riesgo específico para los diferentes tipos de usos del suelo se observa como varía el riesgo en función del escenario de peligrosidad considerado (Figura 7.37). Los valores obtenidos oscilan entre un valor máximo de riesgo por píxel de 3,6 € en el escenario A, a un valor máximo de 21,3 € en el escenario C. Las zonas que en la figura aparecen en blanco son aquellas con pérdidas por píxel nulas o muy pequeñas (este es el caso, por ejemplo, de algunos tipos de usos a los cuales se les asignó un valor de 0 €, dado que desde el punto de vista agrícola o productivo, su valor es nulo).

La Tabla 7.19, muestra la distribución del riesgo por tipo de uso del suelo y escenario. El riesgo específico esperable a lo largo de los próximos 50 años, de acuerdo con los escenarios A, B y C, es de 256.494 €, 862.746 € y 1.906.750 €, respectivamente. Estas cifras son muy inferiores a las obtenidas para el riesgo de infraestructuras. Según se desprende de la tabla, las mayores pérdidas, o el riesgo más elevado, se produce en las zonas de praderías, seguidas a gran distancia por las zonas con repoblaciones y frutales. Sin embargo, cuando se representan las pérdidas por píxel en cada clase o tipo de uso (Tabla 7.20) se observa que las mayores pérdidas se producen en los usos dedicados a frutales y viñedos, con pérdidas por píxel (1 píxel = 100 m²) entre 3,2 y 19,2 €, esto es así por ser mayores la vulnerabilidad y el valor económico de éstas unidades; sin embargo, las pérdidas por píxel en los prados son menores, debido a que éstos ocupan una mayor extensión en la zona.

La estimación del riesgo específico para los usos del suelo, que se ha obtenido para el periodo de 10 años es de 59.843 € en el escenario A, de 141.892 € en el escenario B y de 175.131 € en el escenario C.

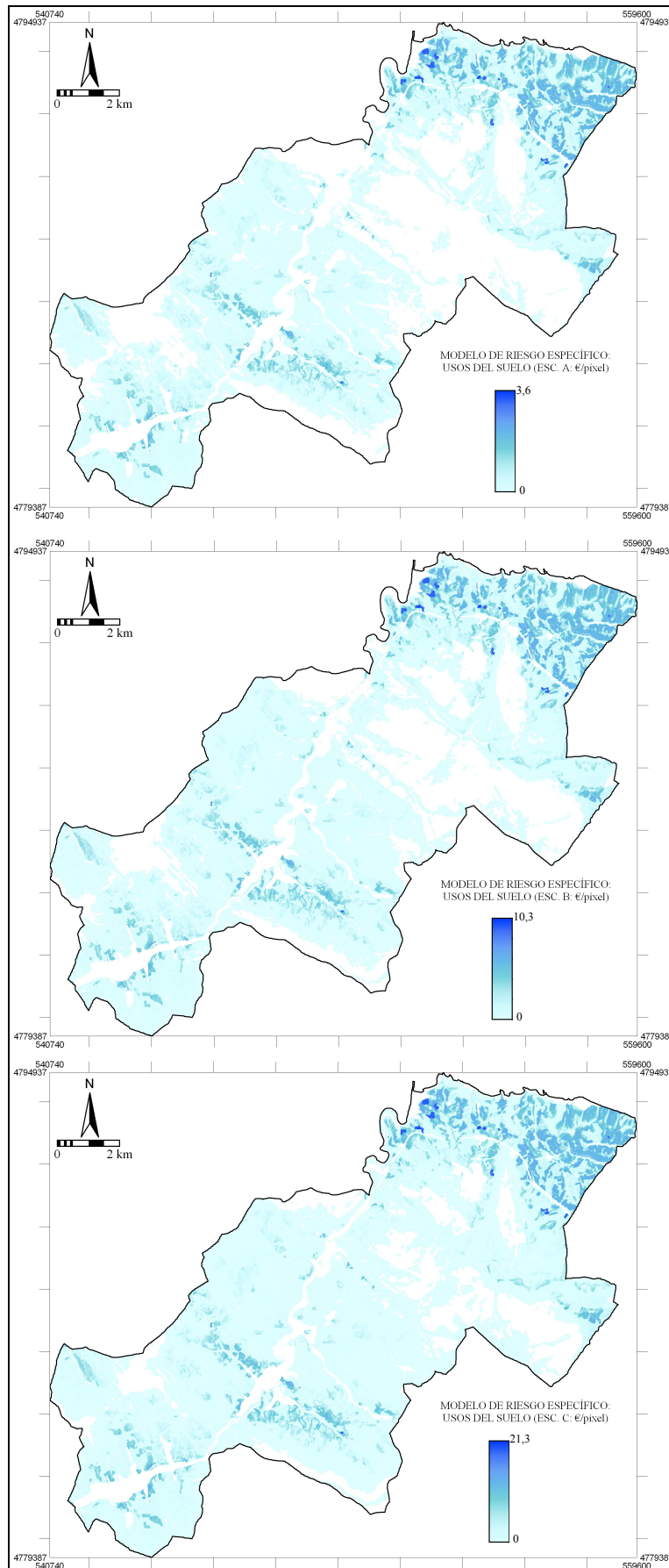


Figura 7.37. Modelo de riesgo específico por deslizamientos en los usos del suelo para cada uno de los escenarios de peligrosidad propuestos para el periodo de 50 años.

Tabla 7.19. Riesgo específico, en Euros, para cada tipo de uso del suelo en los diferentes escenarios considerados para el periodo de 50 años y para el conjunto de la zona de estudio.

Tipo de uso	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C
Prado	244.042	711.828	1.559.255
Forestal arbolado	42.771	128.973	301.423
Frutales y viñedos	7.429	21.181	44.317
Matorral	239	717	1.654
Espinos	10	36	75
Pastizal	3	11	26
Urbano	0	0	0
Roquedo	0	0	0
Cantera	0	0	0
Agua	0	0	0
Total	256.494	862.746	1.906.750

Tabla 7.20. Pérdidas, en Euros por píxel, en cada tipo de uso del suelo de acuerdo con los escenarios considerados para los próximos 50 años. (1 píxel = 100 m²).

Tipo de uso	Superficie (píxel)	Pérdidas (€/píxel) Escenario A	Pérdidas (€/píxel) Escenario B	Pérdidas (€/píxel) Escenario C
Prado	319.584	0,76	2,23	4,88
Forestal arbolado	849.306	0,05	0,15	0,35
Frutales y viñedos	2.310	3,22	9,17	19,18
Matorral	81.433	0,00	0,01	0,02
Espinos	1.133	0,01	0,03	0,07
Pastizal	19.588	0,00	0,00	0,00
Urbano	98.936	0,00	0,00	0,00
Roquedo	12.581	0,00	0,00	0,00
Cantera	3.406	0,00	0,00	0,00
Agua	5.830	0,00	0,00	0,00

7.5.2 Modelos de riesgo directo

Una vez obtenidos los modelos de riesgo específico para cada elemento afectado, queda por obtener el modelo de riesgo directo o de pérdidas totales esperables para los periodos de 50 y 10 años, como consecuencia de la actuación de los deslizamientos en la zona de estudio. La suma de los diferentes modelos de riesgo específico (infraestructuras, edificios y usos del suelo) ha permitido obtener los modelos de riesgo directo para cada escenario considerado. La Figura 7.38 muestra los modelos de riesgo directo obtenidos de acuerdo con los distintos escenarios para el periodo de 50 años. En este caso, se presenta un detalle de una subzona para facilitar su visualización, dado que existe un gran número de píxeles con valores muy bajos y un pequeño número con valores altos.

En la Tabla 7.21 se presentan las cifras de riesgo directo para cada uno de los riesgos específicos y escenarios considerados en los próximos 50 años. El riesgo directo (RD) alcanza cifras que oscilan entre 5.861.163 € y 39.090.821 €, sobre todo debido al impacto de los deslizamientos sobre las infraestructuras (fundamentalmente, carreteras locales).

En cuanto al riesgo directo esperable en los próximos 10 años, en el escenario A será de 1.193.981 €, en el escenario B de 2.836.720 € y de 3.502.652 € en el escenario C, lo cual supone una media por año de 120.000 €, 283.000 € y 350.000 €, respectivamente. Dichas

cifras difieren bastante de las obtenidas de acuerdo con la predicción a 50 años, ya que, de acuerdo con lo comentado anteriormente, el lapso temporal es mayor y por lo tanto habrá un mayor número de deslizamientos, y porque hay una tendencia de aumento en la frecuencia de tipo lineal/exponencial.

Tabla 7.21. Riesgo específico y directo, en Euros, en el área de estudio, de acuerdo con los tres escenarios, para el periodo de 50 años.

Tipo de Riesgo	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C
Riesgo específico: Infraestructuras	5.596.818	16.530.670	37.131.262
Riesgo específico: Usos del suelo	256.494	862.746	1.906.750
Riesgo específico: Edificios	7.851	23.304	52.809
Riesgo Directo	5.861.163	17.416.720	39.090.821

El análisis presentado pone de manifiesto que, incluso en el caso del escenario más pesimista (C), las pérdidas totales esperables son relativamente bajas, inferiores a un millón de Euros por año para el conjunto de la zona de estudio (evidentemente, de ser ciertas las previsiones relativas al proceso que se contemplan en dicho escenario, las pérdidas anuales hacia el final del periodo superarían claramente la citada cifra). Esto es, la estrategia de mitigación más adecuada para la zona sería una de tipo correctivo o de reparación de daños “a posteriori”, puesto que el nivel de pérdidas esperable se puede asumir fácilmente por parte de las administraciones. Obviamente, esta estimación, para toda la zona del Bajo Deva, sólo incluye el riesgo debido a un tipo concreto de deslizamiento

Se muestra así la importancia que tiene el desarrollo y aplicación de herramientas de análisis como la que aquí se presenta pues, a pesar de las incertidumbres existentes, permiten hacer previsiones sobre las consecuencias de los riesgos naturales en términos cuantitativos, que proporcionan bases sólidas para la toma de decisiones. Si los resultados del análisis hubieran mostrado, por ejemplo, que las pérdidas potenciales en el caso del escenario más optimista fueran del orden de 5×10^6 €/año, es evidente que una estrategia de mitigación de tipo preventivo resultaría más adecuada. Además, indicaría las zonas del territorio analizado en las cuales la intervención debería ser prioritaria, por presentar valores de riesgo más elevados.

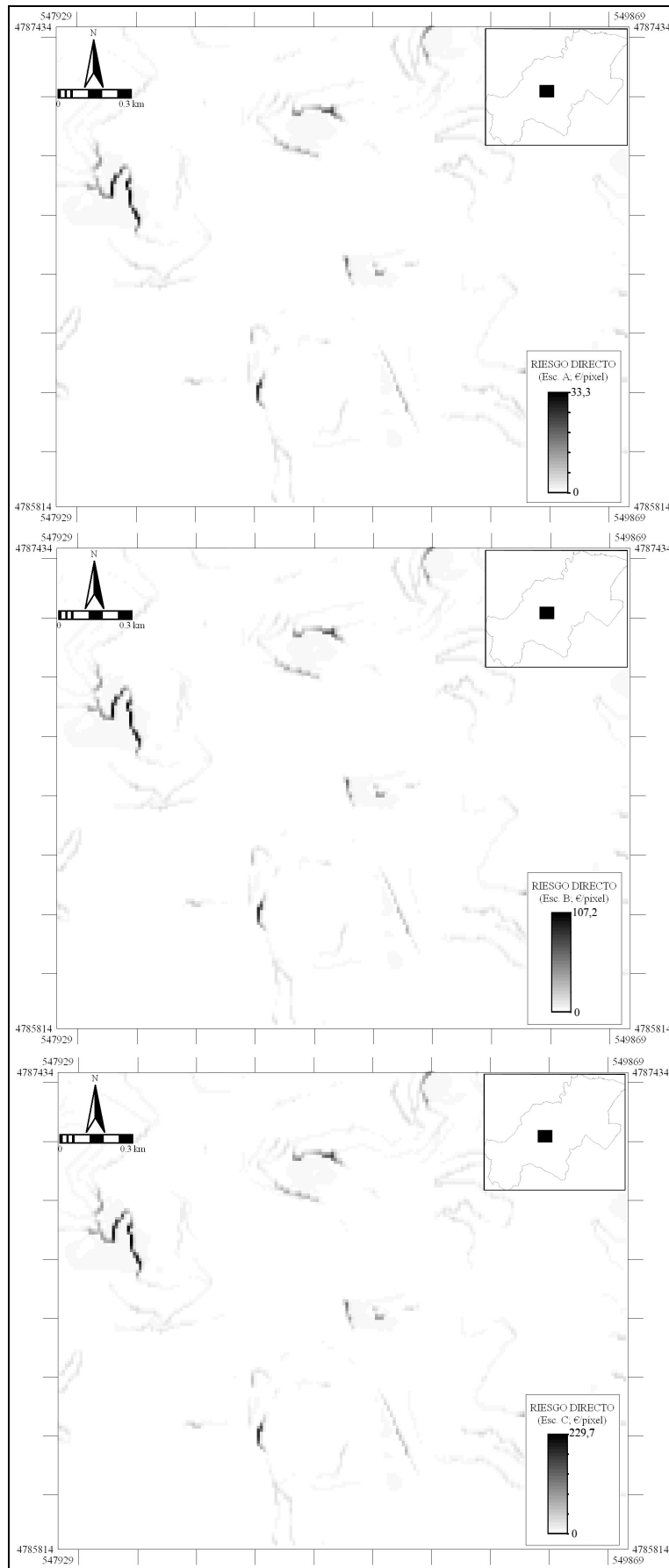


Figura 7.38. Modelo de riesgo directo por deslizamientos para cada uno de los escenarios de peligrosidad propuestos, en una pequeña subzona del área de estudio ampliada a mayor detalle.

7.5.3 Modelos de riesgo indirecto

Las pérdidas indirectas máximas que pueden ocasionar los deslizamientos sobre la actividad económica, derivadas de la interrupción del tráfico en las infraestructuras viarias (suponiendo que se dieran las condiciones anteriormente comentadas), multiplicadas por la probabilidad de que se produzcan deslizamientos en cada uno de los puntos de la red, permiten obtener el modelo de riesgo indirecto para el área de estudio. En función del escenario de peligrosidad considerado, cada sector de vía presenta un riesgo indirecto, en los periodos estudiados, el cual viene representado por la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo indirecto} = \text{peligrosidad} \times \text{pérdidas indirectas}$$

Las cifras de riesgo indirecto (expresadas en Euros por píxel) obtenidas para el periodo de 50 años se muestran en la Tabla 7.22. De acuerdo con esa tabla, es en el ferrocarril donde cabe esperar las mayores pérdidas indirectas durante ese periodo. Las pérdidas en otras infraestructuras son relativamente pequeñas, si se tiene en cuenta que se abarca un periodo de 50 años.

Tabla 7.22. Riesgo indirecto, en Euros, en infraestructuras, de acuerdo con los escenarios de peligrosidad propuestos, para el periodo de 50 años.

Infraestructura	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C
Ferrocarril	1.020.397	2.952.165	6.363.763
Carreteras Locales	12.742	37.864	85.681
Carreteras Regionales	9.971	29.908	69.240
Carretera Nacional	69.426	203.700	451.326
Autopista	19.124	58.061	136.420
Total	1.131.660	3.281.698	7.106.430

Los valores totales de riesgo indirecto para el periodo de 50 años oscilan entre 1.131.660 € (escenario A), 3.281.698 € (escenario B) y 7.106.430 € (escenario C). Esas cantidades son relativamente pequeñas comparadas con otros procesos o gastos que deben afrontar las administraciones correspondientes.

La comparación de esta tabla de riesgo indirecto con la tabla de riesgo específico para las infraestructuras (Tabla 7.17), muestra que:

- El riesgo indirecto (estimado para las infraestructuras) es casi 5 veces menor que el riesgo específico en infraestructuras. Esto significa que, en la zona de estudio, el riesgo directo es mucho más importante que las pérdidas indirectas debidas a interrupciones en el tráfico por los deslizamientos.
- El ferrocarril representa la mayor parte de las pérdidas correspondientes al riesgo indirecto, siendo aquéllas escasas en el caso del riesgo específico. Los retrasos sufridos por los trabajadores, en el caso de que se produzca un deslizamiento, son de mayor entidad económica que los daños producidos a la propia estructura.
- En la autopista, carretera nacional, regional y local, el riesgo específico es mayor que el riesgo indirecto. Las pérdidas indirectas tienen poca importancia dada la facilidad de tomar vías alternativas, por lo que los retrasos son reducidos.

- Es en las carreteras locales donde se concentra el mayor riesgo específico, mientras que el riesgo indirecto en este tipo de vías es muy pequeño. La gran diferencia entre uno y otro tipo de riesgo se debe a que existe un gran entramado de infraestructuras de este tipo, que hacen que las pérdidas directas sean muy grandes, mientras que la posibilidad de que se queden cortadas y ocasionen retrasos importantes a los trabajadores es pequeña.

En la Figura 7.39 se presentan en detalle los modelos de riesgo indirecto de una subzona comprendida dentro del área de estudio, para el periodo de 50 años, y para cada uno de los escenarios considerados. La Tabla 7.23 proporciona las cifras para el periodo de 10 años.

Tabla 7.23. Riesgo indirecto, en Euros, en infraestructuras, de acuerdo con los escenarios de peligrosidad propuestos, para el periodo de 10 años.

Infraestructura	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C
Ferrocarril	208.378	493.235	608.364
Carreteras Locales	2.545	6.092	7.534
Carreteras Regionales	1.998	4.781	5.908
Carretera Nacional	14.114	33.427	41.280
Autopista	3.761	9.097	11.254
Total	230.796	546.632	674.340

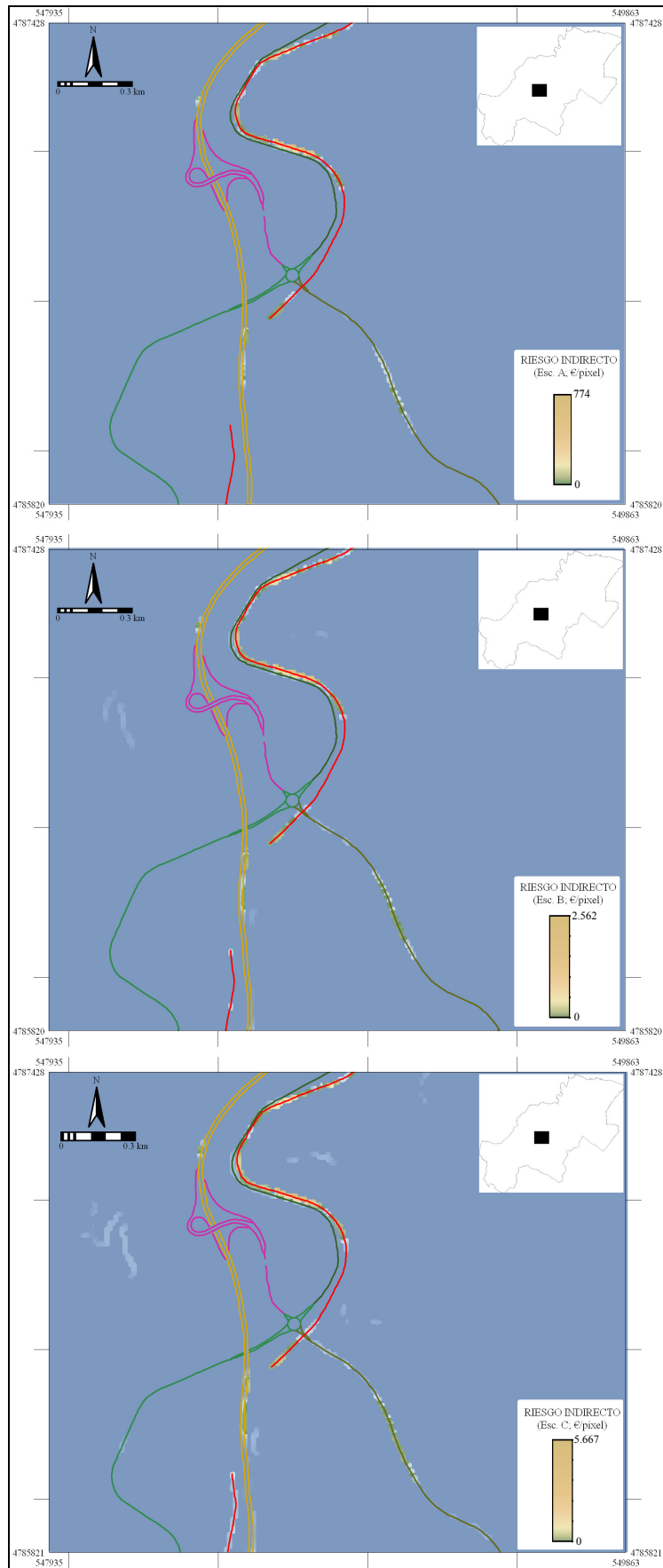


Figura 7.39. Modelo de riesgo indirecto por deslizamientos, en infraestructuras, para el periodo de 50 años, de acuerdo con los escenarios de peligrosidad propuestos, en una pequeña subzona del área de estudio ampliada a mayor detalle.

7.5.4 Modelos de riesgo total

A pesar de que el significado del riesgo directo (representan la localización de las pérdidas) y del riesgo indirecto (representan la localización donde se originan las pérdidas aunque se manifiesten en otras zonas) es diferente, los modelos de riesgo total por deslizamientos son de utilidad puesto que identifican las áreas donde se producen las mayores pérdidas, lo cual permite definir las zonas donde la actuación debe ser prioritaria con el fin de reducir los daños.

Los modelos de riesgo total se pueden obtener mediante la simple adición de los modelos de riesgo directo y de riesgo indirecto en función del escenario considerado para periodos de 10 y 50 años. La Figura 7.40 muestra los modelos de riesgo total de una subzona (con el fin de obtener una fácil visualización), correspondientes a los 3 escenarios de peligrosidad y para un periodo de 50 años.

Las cifras de riesgo total correspondientes al área de estudio, para ambos periodos, se muestran en la Tabla 7.24. En dicha tabla se puede observar que el riesgo directo es aproximadamente cinco veces superior al riesgo indirecto aquí considerado. Si se incluyese en el análisis el conjunto de todos los efectos indirectos que pueden ocasionar los deslizamientos (pérdidas de productos perecederos, pérdidas de mercado, etc.), es probable que estas cifras alcanzaran o, incluso, superaran a las debidas al riesgo directo.

Tabla 7.24. Valor del riesgo directo, indirecto y total en Euros producidos por los deslizamientos en el área de estudio, de acuerdo con los tres escenarios considerados, para los periodos de 50 y 10 años.

Riesgo	50 años			10 años		
	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C	Riesgo (€) Escenario A	Riesgo (€) Escenario B	Riesgo (€) Escenario C
R. Directo	5.861.163	17.416.720	39.090.821	1.193.981	2.836.720	3.502.652
R. Indirecto	1.131.660	3.281.698	7.106.430	230.796	546.632	674.340
R. Total	6.992.823	20.698.418	46.197.251	1.424.777	3.383.352	4.176.992

Tal como se ha comentado antes, es preciso tener presente que, caso de ser correcta la previsión contemplada en el escenario C, la mayor parte de las pérdidas totales se produciría hacia el final del periodo considerado, cuando el proceso sería más activo. Por el contrario, si el escenario A es el correcto, las pérdidas anuales serían relativamente uniformes a lo largo de todo el periodo.

Los valores de riesgo por deslizamiento presentados para la zona de estudio no son tan enormes como para no poder ser afrontados por las administraciones correspondientes (otros tipos de riesgo como las inundaciones pueden ocasionar en un único evento pérdidas económicas muy superiores), por lo que se puede considerar que el riesgo por deslizamientos en esta zona es reducido. Sin embargo, los modelos de riesgo obtenidos consideran un único escenario de distribución de elementos vulnerables, que es el correspondiente a la situación actual, pero es evidente que la cantidad, tipo y distribución de elementos vulnerables (y de las actividades económicas) no serán iguales dentro de 10 o de 50 años, por lo que también sería conveniente considerar otros escenarios de ocupación humana del territorio, con el fin de obtener valores de riesgo más realistas. Por otro lado, dentro de los procesos de planeamiento territorial y urbanístico, es posible formular distintos escenarios, correspondientes a diferentes modelos de planeamiento, que se plasmarían en otras distribuciones de infraestructuras y usos del territorio. Se podría así

hacer análisis de riesgos, como los aquí descritos, para cada uno de dichos escenarios. Se tiene así que el procedimiento que aquí se ha desarrollado puede representar una valiosa herramienta para la SEIA (Evaluación de Impacto Ambiental de tipo Estratégico, para planes o políticas), pues permitiría comparar las consecuencias que las distintas alternativas de planeamiento tendrían en lo referente a los riesgos naturales. La formulación de ese tipo de escenarios queda fuera del ámbito de este trabajo, pero abriría interesantes posibilidades.

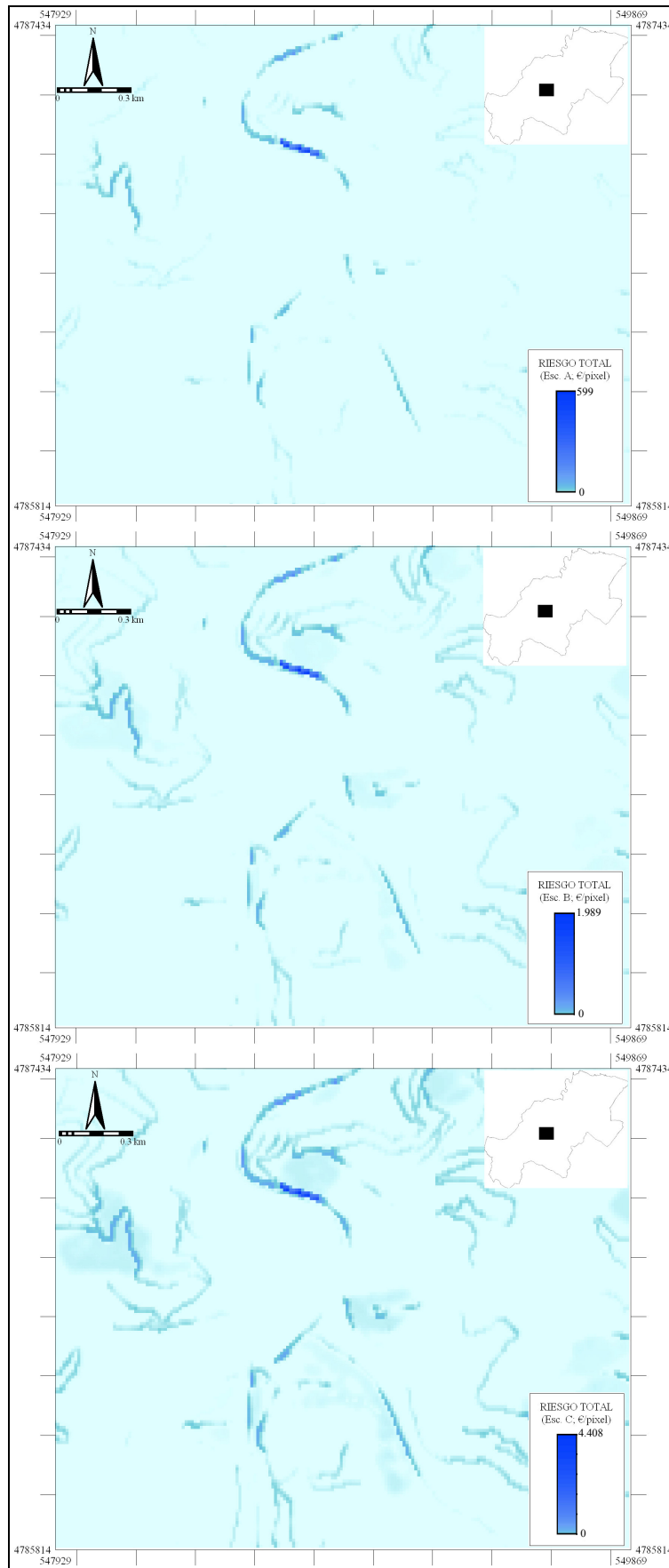


Figura 7.40. Modelo de riesgo total por deslizamientos para el periodo de 50 años, de acuerdo con los escenarios de peligrosidad propuestos, en una pequeña subzona del área de estudio ampliada a mayor detalle.

7.5.5 Evaluación de los modelos de riesgo

Como ya se ha comentado anteriormente, la evaluación de los modelos generados es indispensable con el fin de determinar su capacidad de predicción. En apartados anteriores del presente capítulo se han presentado los resultados relacionados con la evaluación de los modelos de susceptibilidad. Igualmente se ha mostrado que la evaluación de la peligrosidad está condicionada por las previsiones que se pueden hacer con respecto al comportamiento futuro del proceso. El análisis realizado ha mostrado que no es probable que la peligrosidad se mantenga constante, sino que seguramente aumentará con el tiempo. Es necesario hacer nuevas observaciones a lo largo de los próximos años para comprobar dicha previsión.

La evaluación de los modelos de riesgo presenta dificultades apreciables. Por un lado, es difícil obtener cifras reales de daños. Por otro lado, dichas cifras se refieren, lógicamente, al pasado, pero la comprobación de la validez del modelo de riesgo requiere la obtención de datos sobre las pérdidas futuras. El modelo utilizado es de tipo empírico, por lo que supone que los daños ocurridos en el pasado permiten predecir los daños futuros. Esa suposición es razonable, pero es preciso buscar procedimientos para comprobar su validez.

Existen algunas vías para intentar evaluar la calidad de los modelos presentados.

- *Comparación de resultados con los obtenidos mediante otros métodos.* El IGME (1988b) hizo una estimación de las pérdidas esperables por deslizamientos en el País Vasco, para un periodo de 30 años (1986-2016), estableciéndolas en unos 210 y 120 millones de Euros (de esa época), según las hipótesis de riesgo alto y riesgo medio, respectivamente. Teniendo en cuenta que la superficie total del País Vasco es de 7.234 km², y suponiendo que toda la zona se comporta homogéneamente frente a los deslizamientos (lo cual, por supuesto no es cierto), las cifras que corresponderían al área de estudio equivaldrían a 4 y 2,32 millones de Euros (7,83 y 4,54 millones de Euros a 2005), respectivamente, en 30 años. Las cifras de riesgo directo estimadas en este trabajo para el periodo de 50 años, oscilan entre los 6 y 39 millones de Euros, que para un intervalo de 30 años equivaldrían a 3,6 y 23,4 millones de Euros respectivamente. Esto significa que las cifras de riesgo estimadas en este trabajo, considerando los escenarios A y B, son parecidas a las calculadas por el IGME, si bien en ese estudio se consideran todos los tipos de movimientos, mientras que en el presente trabajo sólo se han considerado los movimientos superficiales. La cifra correspondiente al escenario C, claramente superior, sería válida si las tendencias de aumento en la frecuencia del proceso se confirmaran.

Del Val et al., (1986) estiman las pérdidas debidas a deslizamientos en el País Vasco, para un periodo de 15 años (1980-1995) en 150 millones de Euros (326 millones de Euros de 2005). Esta última cantidad equivaldría, para los 140 km² del área de estudio, a 6,3 millones de Euros. Esto equivale a 21 millones de Euros en 50 años, cifra también similar a las obtenidas en este trabajo. Al igual que en el trabajo del IGME, en este trabajo también se han considerado todos los tipos de movimientos en masa existentes en el País Vasco.

Como se puede apreciar, las estimaciones de daños presentadas en los dos trabajos citados arrojan cifras comparables a las obtenidas en el presente estudio. Los análisis anteriores se realizaron a una escala menos detallada (1/50000) y utilizando

procedimientos y datos diferentes. La coincidencia (aproximada) en los resultados representa un refuerzo y, en cierto modo, una validación de los tres procedimientos descritos.

Según la memoria anual de Euskotren, en 2004 se han dedicado 1,2 millones de Euros a actuaciones frente a riesgos geológicos. Si la longitud total de la red ferroviaria es de 181 kilómetros, lo correspondiente a los 21,8 km. existentes en la zona es de 144.000 Euros aproximadamente. Esta cantidad se aproxima a la que se ha obtenido en este trabajo para los próximos 50 años, lo que sugiere que esta zona no se ve tan afectada por deslizamientos como otras del País Vasco por las que discurre la línea de ferrocarril, o bien que nuestro análisis infravalora el riesgo específico para el tren.

Aunque todas estas cifras conviene tomarlas con cautela, se puede observar que los rangos en que se mueven son similares y, por tanto, podrían ser indicativos del riesgo directo ocasionado por los deslizamientos en la zona.

Se ha podido realizar una especie de comprobación de carácter grosero a partir de los datos relativos al deslizamiento que afectó a la autopista de la zona en diciembre de 2005.

El volumen deslizado durante este episodio fue bastante superior al escenario promedio considerado en nuestro análisis, aproximándose a las dimensiones de los mayores deslizamientos incluidos en el inventario realizado en la zona de estudio. Esto es, unas diez veces superior al tamaño promedio. Aunque el supuesto de partida implica asumir una proporcionalidad directa entre volumen del material desplazado y daños producidos (sin duda, una simplificación), se pueden establecer algunas comparaciones:

Los daños directos totales causados por este movimiento (BIDEGI, comunicación personal) fueron de 600.000 €, una cifra claramente superior a la obtenida en nuestro análisis, aunque hay que tener en cuenta las diferencias en la magnitud del movimiento.

En lo que se refiere al riesgo indirecto, la autopista permaneció cortada durante unas 30 horas. Considerando la diferencia de volumen entre este deslizamiento y el promedio utilizado para el análisis (y siempre con las reservas indicadas), el tiempo de interrupción del tráfico no es incoherente con el utilizado para la elaboración de nuestros modelos.

Evidentemente, este episodio sólo proporciona una información parcial y grosera que no es suficiente para establecer la validez del modelo, pero señala una posible vía para mejorar la estimación de las pérdidas. Un trabajo sistemático de entrevistas con responsables de los ayuntamientos y de la DFG, así como con los habitantes de la zona, probablemente permitiría obtener datos adicionales sobre episodios de menor entidad que hayan afectado a vías de comunicación menos importantes y sobre los cuales no se dispone en la actualidad de datos.

- *Por otra parte, la comparación con daños reales de episodios no utilizados para la construcción de los modelos, sería la alternativa más adecuada para su validación.*

Sin embargo, la escasez de registros sobre daños impide su aplicación en la evaluación de los modelos, puesto que no se pueden distribuir los escasos datos en varias muestras, unas para el análisis y otras para la evaluación, como sería lo deseable.

- *El análisis del comportamiento futuro*, sería, evidentemente, la mejor forma de evaluar el modelo, pero requiere esperar un tiempo considerable y establecer un mecanismo de recogida sistemática de información sobre el proceso a partir del momento actual, lo cual no es sencillo.

En resumen, se ha podido llevar a cabo una evaluación independiente, razonablemente satisfactoria de los modelos de susceptibilidad (el deslizamiento antes citado de 2005 tuvo lugar en una zona clasificada dentro del 5% más susceptible de la zona de estudio, lo que refuerza las validaciones descritas en apartados anteriores). También se han podido hacer previsiones de peligrosidad (frecuencia futura) basadas en datos sobre el comportamiento actual y pasado del proceso. Sin embargo, la comprobación independiente de los modelos de riesgo (previsiones de daños) que se ha podido llevar a cabo hasta el momento ha sido limitada, indirecta y con un valor meramente orientativo. Los datos obtenidos no son incoherentes con el modelo, pero a falta de comprobaciones ulteriores, los modelos de riesgo presentados han de considerarse, por el momento, como “hipótesis razonables pendientes de confirmación”.

7.6 Aplicación de los métodos probabilísticos a la predicción de dolinas por disolución de evaporitas

En lo que antecede se ha puesto de manifiesto que las técnicas de análisis de datos espaciales utilizadas permiten elaborar modelos de susceptibilidad de deslizamientos con validez contrastable de manera independiente.

Tal como se ha comentado en el capítulo 5, la hipótesis de partida en la que se apoya el método propuesto es que es posible establecer correlaciones entre la distribución de los deslizamientos y un conjunto de factores relativos a distintas características susceptibles de expresión espacial, relacionados con la inestabilidad potencial del terreno, a partir de las cuales se puede clasificar el territorio en función de su mayor o menor propensión a experimentar nuevos deslizamientos. Los resultados obtenidos, así como los previamente presentados por otros autores (Chung & Fabbri, 1999; Remondo et al., 2003a; 2005c), han puesto de manifiesto que esa suposición de partida es esencialmente correcta. Además, se ha puesto en evidencia que los citados modelos de susceptibilidad proporcionan una base para la obtención de modelos de peligrosidad y de riesgo.

De lo anterior se desprende que cabría esperar que el mismo tipo de técnicas estadísticas debería permitir la elaboración de modelos de susceptibilidad para otros tipos de procesos geológicos condicionados también por variables con expresión espacial. Uno de esos procesos es la aparición de cavidades debidas a procesos de disolución y/o colapso en terrenos sometidos a karstificación.

La comprobación de la validez del método para el análisis de estos procesos se puede llevar a cabo de manera especialmente favorable en terrenos evaporíticos, donde la intensidad del proceso es mayor y la frecuencia de aparición de las formas de disolución o colapso resultantes también es mucho mayor (Klimchouk et al., 1996).

La bibliografía existente pone de manifiesto que la generación de dolinas por disolución de evaporitas puede producir daños en todo tipo de estructuras (edificios, infraestructuras lineales, presas) causando cuantiosas pérdidas económicas, e incluso puede llegar a provocar víctimas mortales cuándo éstas se generan de manera catastrófica (Cooper & Calow, 1998; Gutiérrez, 2004).

En España, este proceso se produce fundamentalmente por la karstificación de formaciones triásicas y terciarias, las cuales abarcan aproximadamente un 7% de la superficie del país (Macau & Riba, 1962). La mayor parte de estas formaciones están compuestas por yeso y anhidrita o yeso, anhidrita y halita. Las zonas más problemáticas, en general, son aquellas en las que los sedimentos evaporíticos terciarios se encuentran cubiertos por depósitos cuaternarios de origen aluvial (karst aluvial) (Gutiérrez et al., 2004a). España es muy probablemente el país europeo en el que el riesgo de subsidencia por disolución de evaporitas tiene una mayor repercusión económica (Gutiérrez et al., 2004a). Los sectores donde la subsidencia produce pérdidas materiales más cuantiosas incluyen las áreas urbanas de Madrid, Calatayud y Zaragoza. En el sureste de Madrid la subsidencia ha causado daños en edificios en la zona de Rivas-Vaciamadrid (Durán et al., 1989), entre otras, y ha planteado problemas en la M-45. La gran mayoría de las construcciones históricas de Calatayud (provincia de Zaragoza), declarada conjunto histórico-monumental en 1967, se encuentran severamente afectadas por la subsidencia (Gutiérrez, 1996, 1998; Gutiérrez & Cooper, 2002). La formación súbita de un colapso el 10 de noviembre de 2003

daño seriamente la estructura de un edificio de cinco plantas, siendo precisa su posterior demolición (Gutiérrez et al., 2004b). El valle del Ebro, en el entorno de Zaragoza, es la zona donde las dolinas de hundimiento tienen un mayor impacto socio-económico. Algunas vías de comunicación como la N-232, la antigua línea de ferrocarril Madrid-Barcelona, o recientemente el AVE (marzo, 2003), han sido afectadas por colapsos repentinos sin causar afortunadamente daños personales (Gutiérrez et al., 2005b; Guerrero et al., 2004). En este sector, la aparición súbita de colapsos por la karstificación aluvial de la Formación Zaragoza (yesos, halita y glauberita) es un fenómeno relativamente frecuente (Benito et al., 1995; Soriano & Simón, 1995; Gutiérrez & Gutiérrez, 1998; Gutiérrez et al., 2005a, b; Guerrero et al., 2004).

Desde épocas pasadas, la actividad, reactivación y aparición de dolinas a lo largo del valle del Ebro, tanto aguas arriba como aguas abajo de Zaragoza, ha ocasionado graves problemas a la agricultura y a todo tipo de construcciones e infraestructuras. Las zonas más susceptibles de sufrir procesos de subsidencia son la terraza inferior y la llanura de inundación, sector donde precisamente se concentra la actividad humana (Gutiérrez & Gutiérrez, 1998; Gutiérrez et al., 2005a). Por otra parte, generalmente se constata una mayor concentración de dolinas en las proximidades de canales y acequias de riego. En los últimos años, la percepción de la población ante la peligrosidad y el riesgo por este proceso se ha incrementado notablemente, quizás por el gran impacto mediático que tuvo el socavón que afectó a la línea de Alta Velocidad en las cercanías de Zaragoza (Gutiérrez et al., 2004a). El abandono del Canal Imperial en 1790, la demolición de edificios y colapsos súbitos en líneas de ferrocarril, carreteras y redes de riego, son algunos ejemplos de los daños provocados por este proceso en la zona mencionada.

7.6.1 Los procesos de disolución y hundimiento en evaporitas

Los procesos de disolución de evaporitas están controlados por factores como la composición, estructura y textura de las evaporitas, la cantidad de agua en contacto con el material soluble y sus propiedades físico-químicas (grado de saturación, temperatura), el tipo de flujo (laminar o turbulento, freático o vadoso), o las variaciones del nivel freático (White, 1998). Por otro lado, y como consecuencia de la disolución, se producen hundimientos, los cuales están condicionados principalmente por el espesor y las propiedades mecánicas de los materiales situados por encima de la zona donde actúa la karstificación y por la posición del nivel freático y sus variaciones. Con frecuencia, determinadas actividades humanas activan o aceleran los procesos que intervienen en la generación de las dolinas de subsidencia, favoreciendo o desencadenando su formación. Algunos de los factores humanos que pueden contribuir en la generación de dolinas inducidas son las pérdidas y fugas en canales y conducciones, los descensos del nivel freático, la aplicación de cargas estáticas o dinámicas, o determinadas excavaciones superficiales y subterráneas (Lamoreaux & Newton, 1986; Beck, 1988; Gutiérrez, 1998; Guerrero et al., 2004).

7.6.2 Hipótesis de trabajo

Atendiendo al problema planteado por la subsidencia en terrenos evaporíticos se ha planteado la siguiente hipótesis de trabajo:

“La correlación entre la distribución espacial de las dolinas existentes y los factores que condicionan su generación (se supone que son conocidos), debería permitir la elaboración

de modelos que sirvan para pronosticar la distribución espacial de futuras dolinas. Además, la obtención de datos sobre la distribución temporal de las dolinas en el pasado, permitiría hacer pronósticos sobre la frecuencia de los mismos en el futuro. Mediante la aplicación de métodos de validación podría cuantificarse el grado de fiabilidad de dichas predicciones”.

Para contrastar dicha hipótesis, se ha seleccionado una zona afectada por este proceso y se ha recogido toda la información relativa a las dolinas existentes (número y tipología) y la referente a aquellos factores que pueden condicionar su aparición y sobre los cuales ha sido posible obtener datos. La correlación entre la distribución de las dolinas existentes y los factores que se supone condicionan su aparición, permitirá generar modelos de probabilidad espacial que muestren la futura distribución de dolinas. Con el fin de establecer de forma cuantitativa su capacidad de predicción, los resultados obtenidos serán evaluados con alguna de las estrategias propuestas anteriormente, como en el caso de los deslizamientos (ver apartado 6.5.1.1.3).

7.6.3 Características del área de estudio

7.6.3.1 Marco geográfico

La zona donde se han aplicado estas técnicas corresponde a un tramo del valle del Río Ebro, situado aguas abajo de la ciudad de Zaragoza (Figura 7.41). La superficie que se pretende estudiar ocupa un área de unos 62 km², comprendida entre las coordenadas rectangulares UTM:

$$X_{min} = 686.100; Y_{min} = 4.602.500; X_{max} = 692.600; Y_{max} = 4.612.000$$

que forman parte del municipio de El Burgo de Ebro.

7.6.3.2 Marco geológico-geomorfológico

El valle del Ebro atraviesa en esta zona una formación evaporítica de edad Oligo-Miocena, formada fundamentalmente por yeso secundario con intercalaciones de margas en superficie, yeso, anhidrita, halita y glauberita (Ortí & Salvany, 1997). Estos sedimentos presentan una disposición subhorizontal cuya tendencia es a acuñarse aguas abajo, y están afectados por sistemas de fracturas subverticales con direcciones dominantes NW-SE y N-S.

El encajamiento y la migración hacia el noreste sufrida por el río Ebro durante su evolución ha generado un valle asimétrico con un escarpe formado por yesos en el margen NE y una secuencia de terrazas fluviales hacia el SO. Los depósitos aluviales cuaternarios presentan un espesor muy variable y localmente rellenan cubetas de disolución de más de 50 metros de profundidad, generadas por fenómenos de subsidencia sinsedimentaria. El estudio de las estructuras de subsidencia aflorantes demuestra que los fenómenos de subsidencia pueden ser debidos a procesos de karstificación interestratal y aluvial (Guerrero et al., 2004; Gutiérrez et al., 2005a).

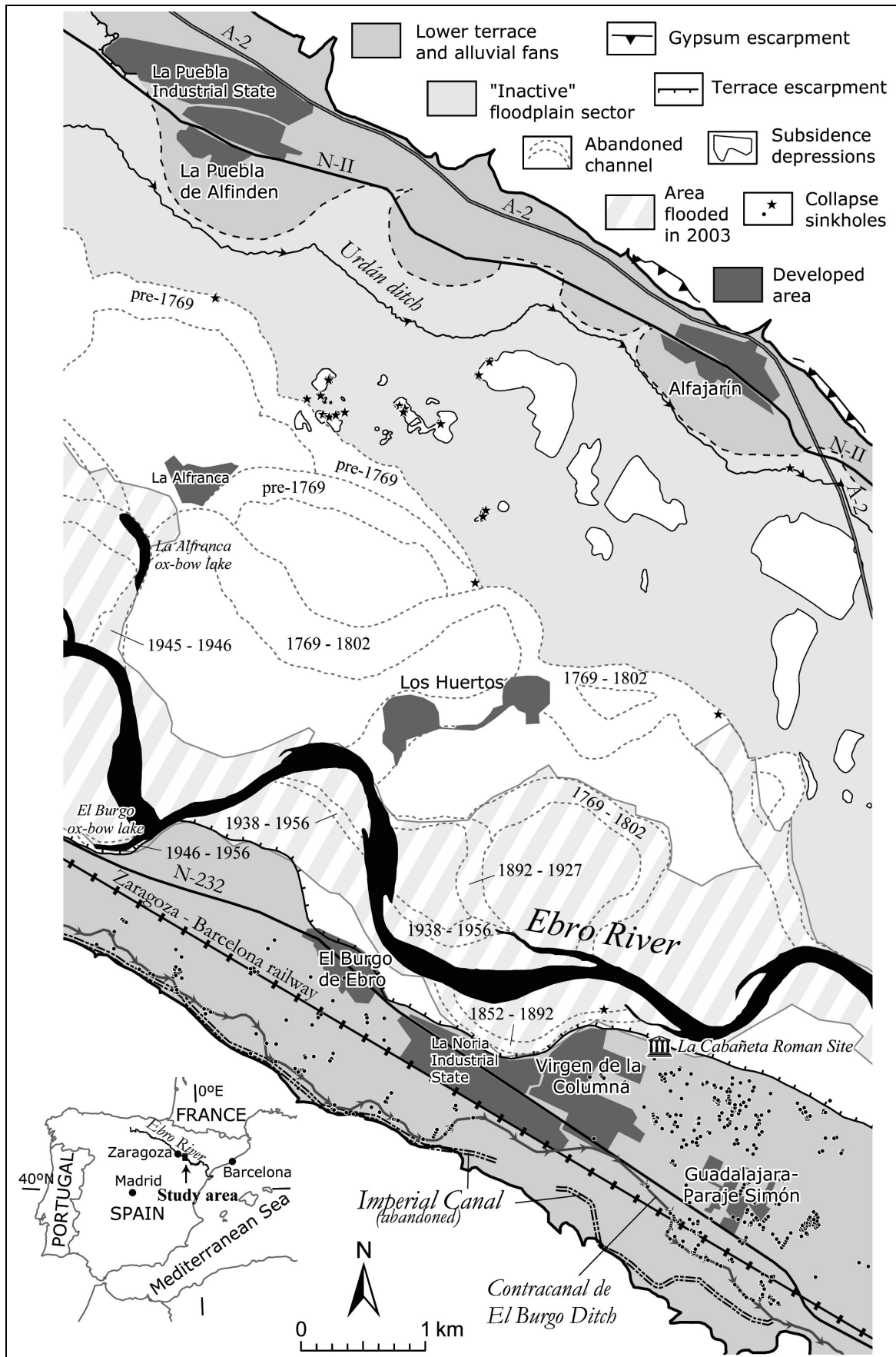


Figura 7.41. Localización geográfica del área de estudio y principales ambientes geomorfológicos. Se han representado los distintos tipos de dolinas existentes (Gutiérrez et al., enviado).

Desde un punto de vista geomorfológico se pueden diferenciar tres grandes sectores en la zona de estudio (Fig. 7.41):

1. Terraza inferior del río Ebro y abanicos aluviales, en la zona norte. No se han observado evidencias de subsidencia reciente.

2. La llanura de inundación, en la que se diferencian dos ambientes (Gutiérrez et al., 2005a):

A) El canal del río Ebro y su cinturón de meandros. Se trata de un canal meandriforme con barras de meandro (*point bars*) de gravas y diversos canales abandonados en tiempos históricos. Esta es la zona de la llanura de inundación que se ve afectada por inundaciones con mayor frecuencia. La densidad de dolinas aquí es mucho menor que en el resto de la llanura aluvial.

B) El sector relativamente inactivo de la llanura de inundación. Es la zona existente entre el cinturón de meandros y la terraza inferior del margen nororiental. En este sector, con una dinámica morfosedimentaria mucho menos activa, el potencial de preservación de las dolinas es muy superior, tal y como refleja su mayor densidad.

3. Terraza superior del río Ebro y abanicos aluviales del margen sur. La secuencia estratigráfica tipo en este sector está constituida por una unidad de gravas fluviales ligeramente cementadas cubiertas por depósitos de abanico aluvial, constituidos fundamentalmente por limos yesíferos con clastos tamaño grava. Ambas unidades presentan interdigitaciones en el margen del valle. La mayoría de las dolinas cartografiadas en este sector corresponden a colapsos de 1,5-2 metros de diámetro con márgenes subverticales.

7.6.4 Toma y preparación de datos

Para llevar a cabo el análisis de susceptibilidad se ha realizado un inventario de las dolinas existentes en el área de estudio (aunque hay que tener en cuenta que muchas de ellas desaparecen rápidamente al ser modificado el terreno por los agricultores) y se han identificado los distintos tipos de variables o factores que pueden condicionar su aparición.

7.6.4.1 Identificación y cartografía de dolinas

Mediante la interpretación de fotografías aéreas de diferentes fechas, un detallado trabajo de campo y la consulta a personas del lugar se han identificado las dolinas más recientes presentes en la zona de estudio. La gran cantidad de información recopilada ha sido tratada e incorporada a un SIG.

De acuerdo con las características de las dolinas identificadas, se han definido 3 clases “genéticas” de dolinas (Figura 7.42):



Figura 7.42. Detalle de los distintos tipos de dolinas identificadas en el área de estudio.

- Dolinas de colapso en la zona sur (*Tipo 1*): en la zona sur se han identificado 443 dolinas de colapso. Se caracterizan por ser dolinas de pequeño tamaño (1,5-2 metros de diámetro), con márgenes subverticales. Generalmente, aparecen ligadas a canales, acequias de riego o a conducciones que presentan pérdidas de agua.

- Dolinas de colapso en la llanura de inundación (*Tipo 2*): se han identificado 24 dolinas de entre 30 y 40 metros de diámetro y profundidades de 4 a 6 metros. Buena parte de ellas albergan aguas freáticas con una elevada concentración iónica en facies clorurado sódicas. Este tipo de dolinas aparecen sólo en el sector aguas arriba de la llanura de inundación, probablemente debido a que en este sector la secuencia evaporítica es lo suficientemente potente como para permitir el desarrollo de grandes cavidades. La secuencia de yesos en esta zona es más potente que en el resto y, por tanto, es capaz de desarrollar cavidades.

- Grandes depresiones en la llanura de inundación (*Tipo 3*): en el sector menos activo, situado al norte del cinturón de meandros, se han identificado 22 grandes depresiones someras, con límites difusos y hasta 0,8 kilómetros de longitud, generadas por mecanismos de flexión. Estas zonas, frecuentemente encharcadas, suelen estar colonizadas por vegetación de tipo palustre y halófila y en algunos casos se utilizan como vertederos.

7.6.4.2 Identificación y cartografía de factores condicionantes

Teniendo en cuenta el tipo de proceso, se han considerado las variables más representativas que podrían influir en la distribución y desarrollo de dolinas por disolución de evaporitas:

- **Geomorfología (*geomor*):** Representa las diferentes unidades geomorfológicas cartografiadas en la zona de estudio; estas unidades son:

1. Relieves en sedimentos terciarios
2. Abanicos aluviales
3. Glacis
4. Llanura de inundación
5. Paleocanales
6. Cauce actual del río Ebro
7. Terraza T1
8. Valles de fondo plano

- **Gradiente litológico (*grad_lito*):** Gradiente de distancia según la dirección del valle que pretende reflejar el cambio lateral de facies evaporítica a arcillosa, que experimenta el sustrato valle abajo. Está relacionado con la variación de facies dentro de la formación evaporítica subyacente.

- **Espesor (*espe*):** Corresponde al espesor del aluvial, según un mapa de isopacas elaborado a partir de sondeos eléctricos verticales y registros de sondeos.

- **Distancia a paleocauces (*dist_cauces*):** Representa la distancia continua, en metros, desde los paleocanales hacia el resto de la zona de estudio.

- **Distancia a acequias (*dist_aceq*):** Representa la distancia continua, en metros, desde los canales de riego hacia el resto de la zona de estudio.

- **Modelo digital del terreno (dem)**: Modelo digital de elevaciones obtenido a partir de la cartografía del Gobierno de Aragón realizada a escala 1/5000 (equidistancia 5 m.). Los intervalos de altura van de 173 a 270 metros.

- **Modelo digital de orientaciones (aspect)**: Se ha obtenido a partir del anterior. Está expresado en valores de 0 a 360°.

- **Modelo digital de pendientes (slope)**: Se ha obtenido a partir del modelo digital de elevaciones. Está clasificado en valores de 0° a 88°, aunque los valores superiores a 15° son muy poco frecuentes.

- **Dirección de flujo (dir_flujo)**: Representa las direcciones de flujo del acuífero aluvial generadas a partir de la superficie piezométrica.

- **Superficie piezométrica (sup_piezo)**: Superficie obtenida a partir de las isopiezas interpretadas en el estudio del Aluvial del Ebro de la Diputación General de Aragón.

- **Gradiente piezométrico (grad_piezo)**: Representa la pendiente de la superficie piezométrica.

- **Índice de saturación en yeso (satu_yeso)**: Interpolación de los índices de saturación en yeso obtenidos a partir de los análisis de sulfatos recogidos en la base de datos IPA (Inventario de Puntos de Agua) de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

- **Conductividad eléctrica (ce)**: Es una interpolación de la medida de la capacidad que tiene el agua para conducir la corriente eléctrica. Tiene una relación directa con la concentración de sales disueltas. Esta obtenida a partir de la información contenida en la base de datos IPA citada anteriormente.

- **Concentración de sulfatos (conc_sulf)**: Interpolación de la concentración de sulfatos a partir de los análisis recogidos en la base de datos IPA de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

- **Total de sólidos disueltos (solid_dis)**: Interpolación de la concentración de sólidos disueltos a partir de los datos recogidos en la base de datos IPA de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

7.6.5 Análisis y elaboración de los modelos de susceptibilidad

Una vez obtenida la información sobre las citadas variables (que en principio deben influir en la aparición de las dolinas de hundimiento identificadas en el área), y aplicando la misma metodología que para los deslizamientos, se han elaborado los modelos de probabilidad espacial o susceptibilidad con un tamaño de píxel de 5 x 5 metros.

7.6.5.1 Problemas planteados en la elaboración de los modelos de susceptibilidad

En la generación de dichos modelos se deben tener en cuenta una serie de limitaciones o problemas:

- 1) Existen diferentes tipos de dolinas: en la zona de estudio se pueden diferenciar tres tipos genéticos de dolinas. Esto implica que sus condiciones de formación o desarrollo son probablemente diferentes y, por tanto, las variables que condicionan su aparición pueden ser distintas para cada tipo de dolina.
- 2) Existen diferentes tamaños de dolinas: las dolinas inventariadas tampoco tienen la misma extensión; por un lado se dispone de depresiones cartografiadas como polígonos, mientras que otro tipo de dolinas se han representado, debido a su escasa extensión, como puntos. Esta diferencia plantea un problema a la hora de incorporar dichos elementos al análisis. Si se analizan por igual los diferentes tipos de dolinas (puntos y polígonos), las superficies tendrán más peso que los puntos en el modelo de susceptibilidad final. Sin embargo, si los polígonos son transformados a puntos, dando así el mismo peso a todos los elementos, la capa de información relativa a las dolinas tampoco refleja la realidad existente, ya que dolinas de gran extensión son asimiladas a extensiones de 25 m².
- 3) Existen incertidumbres en las variables consideradas: la mayor parte de ellas son una extrapolación de escasos puntos de muestreo o de sondeos (por ejemplo, la variable índice de saturación en yeso), con lo cual la incertidumbre en cada una de ellas es grande.
- 4) Algunas de las variables son redundantes: esto es, están muy relacionadas entre sí, por lo que pueden introducir redundancias en el análisis.
- 5) Las estrategias de validación: en algunos casos se conoce la distribución temporal de los colapsos, pero no es lo suficiente detallada como para hacer grupos temporales. Las grandes depresiones se forman de forma gradual durante largos periodos de tiempo, con lo cual sería muy difícil establecer grupos temporales.

Algunos de estos problemas se podrían ir solucionando (mejora de variables, inventarios temporales, etc.), lo que previsiblemente permitirá generar modelos de susceptibilidad de mayor calidad en fases más avanzadas del trabajo.

7.6.5.2 Obtención de modelos de susceptibilidad de dolinas

Según se ha indicado, cada tipo de dolina debe formarse bajo unas determinadas condiciones y, por tanto las variables que actúan como factores condicionantes serán seguramente diferentes. Con objeto de determinar cuáles de las variables presentadas anteriormente pueden influir en el desarrollo y aparición de dolinas, es decir, aquellas que mejor explican la distribución espacial de esas formas, se ha seguido el siguiente procedimiento. En primer lugar, se ha realizado un análisis visual de los tres tipos de dolinas definidos con las distintas variables consideradas y, posteriormente se han analizado las distribuciones de frecuencia normalizadas de cada tipo de dolina con respecto a cada una de las variables consideradas (siguiendo el proceso descrito en el apartado 7.1.2). Mediante estos análisis comparativos se han identificado las variables más significativas para cada tipo genético de dolina (Figura 7.43):

Tipo 1: dist_aceq; geomor; grad_lito

Tipo 2: satu_yeso; dist_aceq; espe; ce

Tipo 3: satu_yeso; dist_aceq; espe; ce; geomor

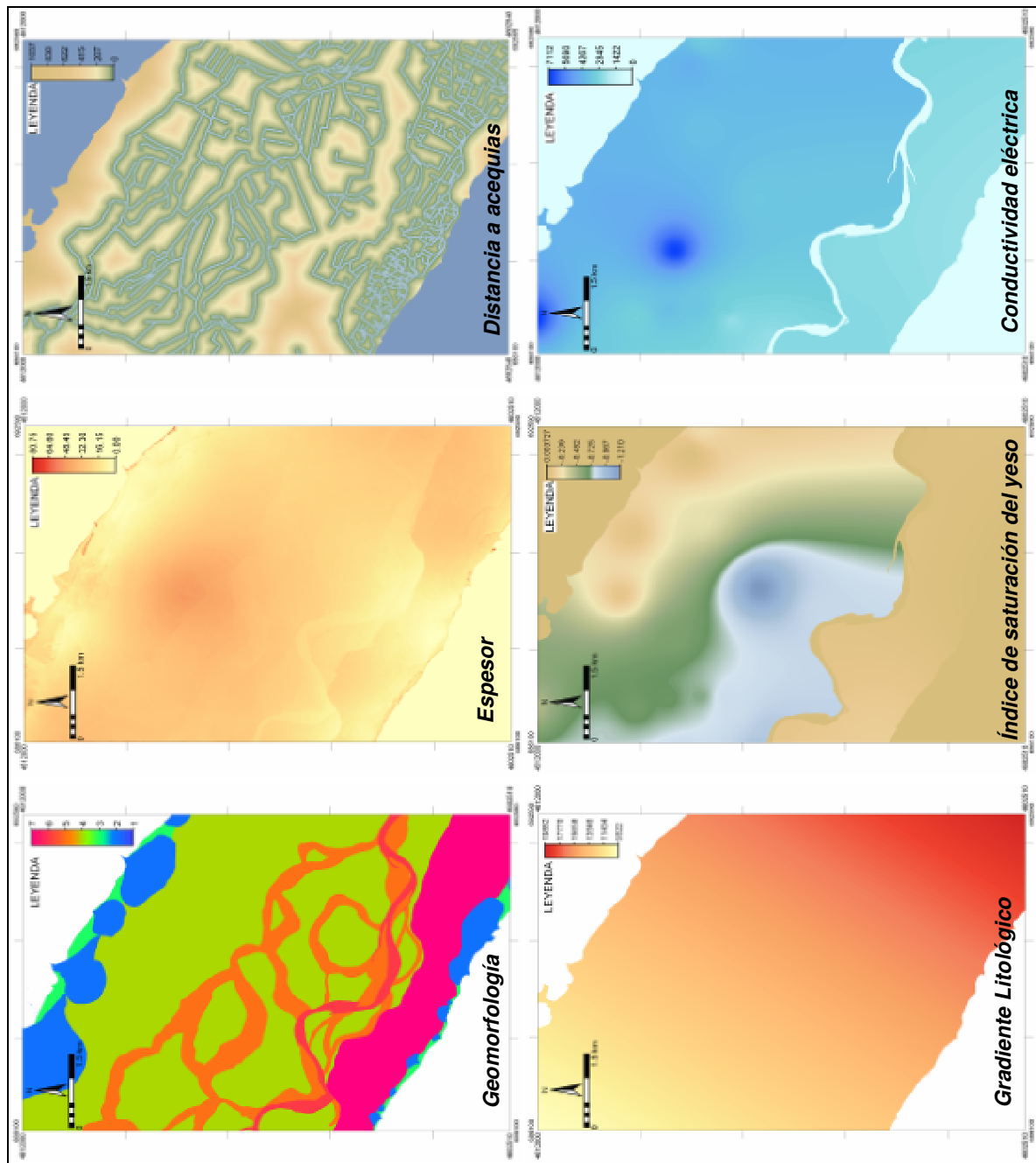


Figura 7.43. Representación de las principales variables utilizadas en la generación de modelos de susceptibilidad de dolinas en terrenos evaporíticos.

La relación entre variables y las dolinas inventariadas ha permitido generar diversos modelos de susceptibilidad. Los modelos generados son los siguientes:

- Modelo A: incluye los tres tipos de dolinas y el conjunto de las seis variables citadas anteriormente (Figura 7.44). Los puntos han sido transformados a un píxel, mientras que los polígonos se asimilan a un conjunto de píxeles.

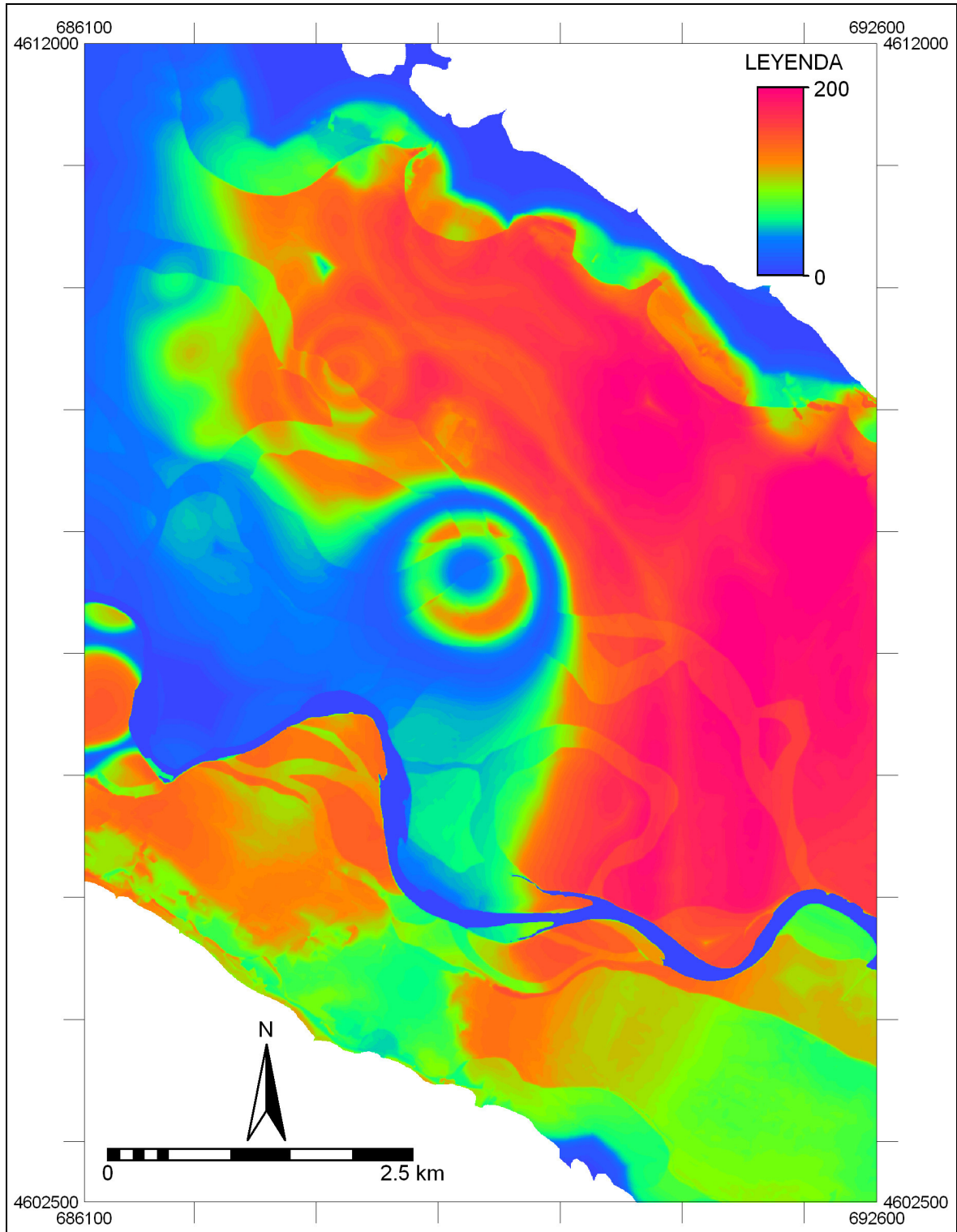


Figura 7.44. Modelo A: generado con los tres tipos de dolinas, tanto puntos como polígonos, y con las variables: Geomorfología, Espesor, Distancia a acequias, Gradiente, Índice de saturación en yeso y Conductividad eléctrica. (0: mínima susceptibilidad; 200: máxima susceptibilidad).

- Modelo B: generado con los tres tipos de dolinas transformados a puntos y con las seis variables (Figura 7.45).

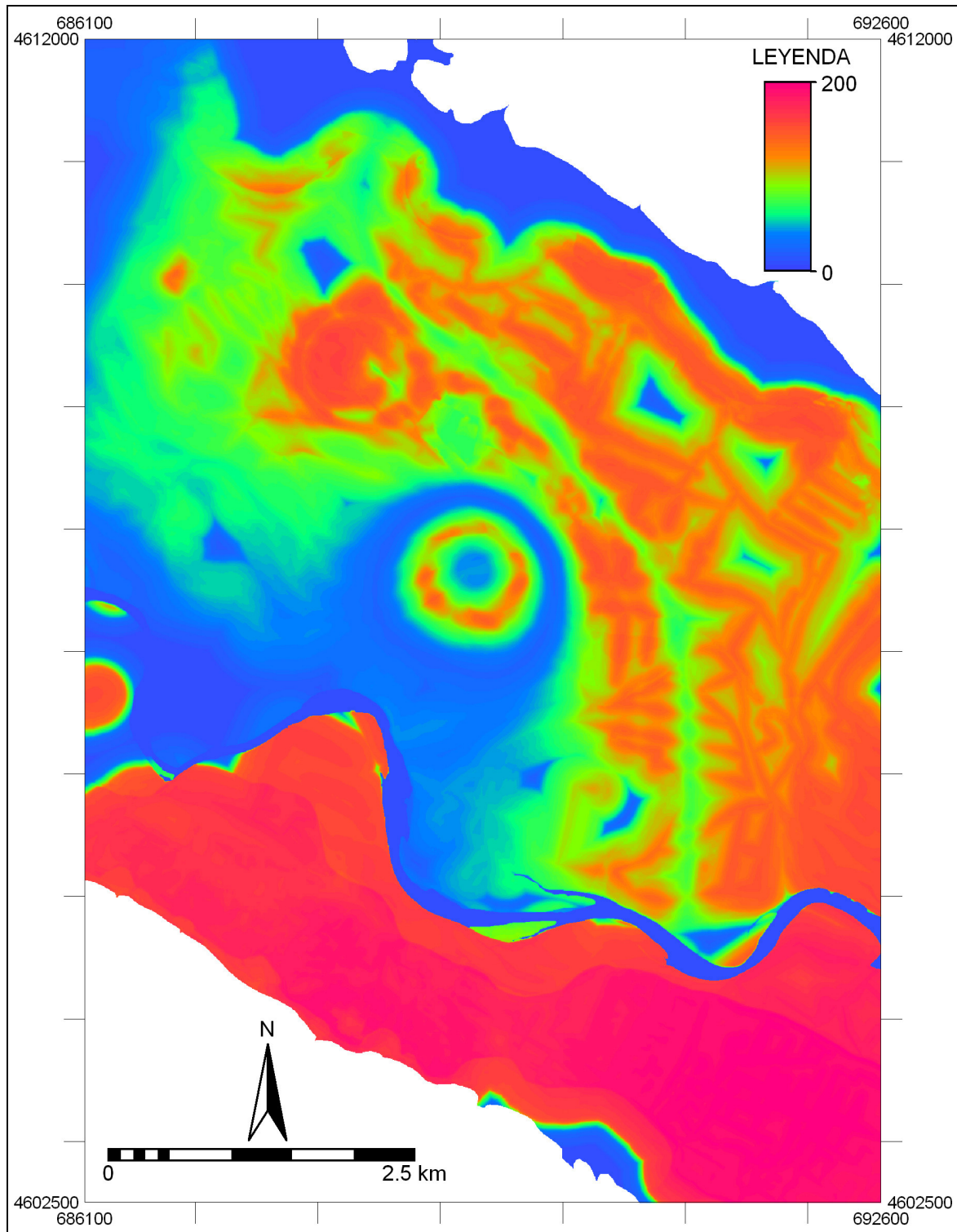


Figura 7.45. Modelo B: generado con los tres tipos de dolinas, transformados a puntos, y con las variables: Geomorfología, Espesor, Distancia a acequias, Gradiente, Índice de saturación en yeso y Conductividad eléctrica. (0: mínima susceptibilidad; 200: máxima susceptibilidad).

- Modelo C: incluye a las dolinas de tipo 1 (representadas por un píxel) y sus variables más significativas: Geomorfología, Distancia a acequias y Gradiente (Figura 7.46).

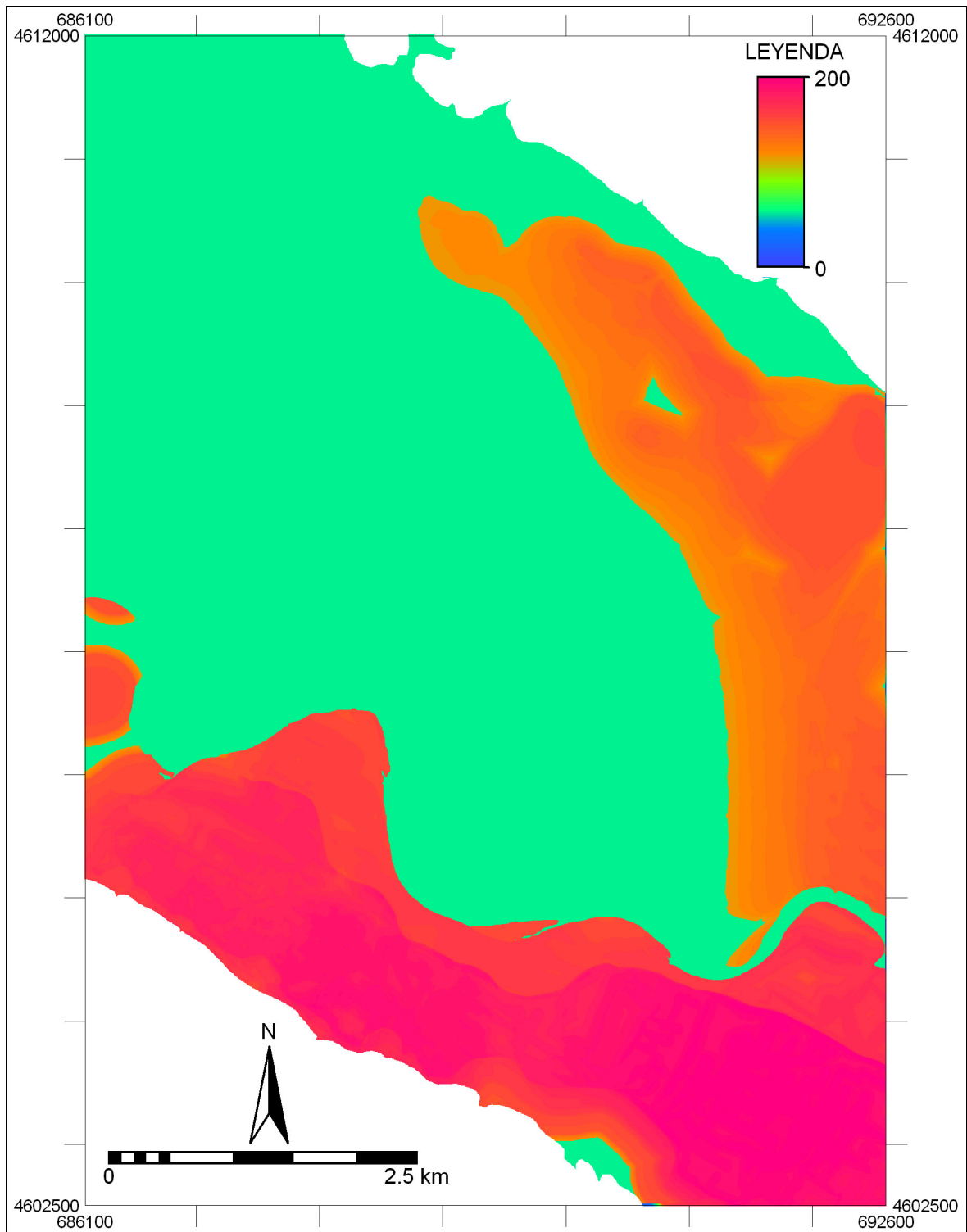


Figura 7.46. Modelo C: generado con las dolinas tipo 1 y sus variables más significativas: Geomorfología, Distancia a acequias y Gradiente. (0: mínima susceptibilidad; 200: máxima susceptibilidad).

- Modelo D: generado con las dolinas tipo 2 (representadas por un píxel) y las variables que influyen en su formación: Índice de saturación en yeso, Distancia a acequias, Espesor y Conductividad eléctrica (Figura 7.47).

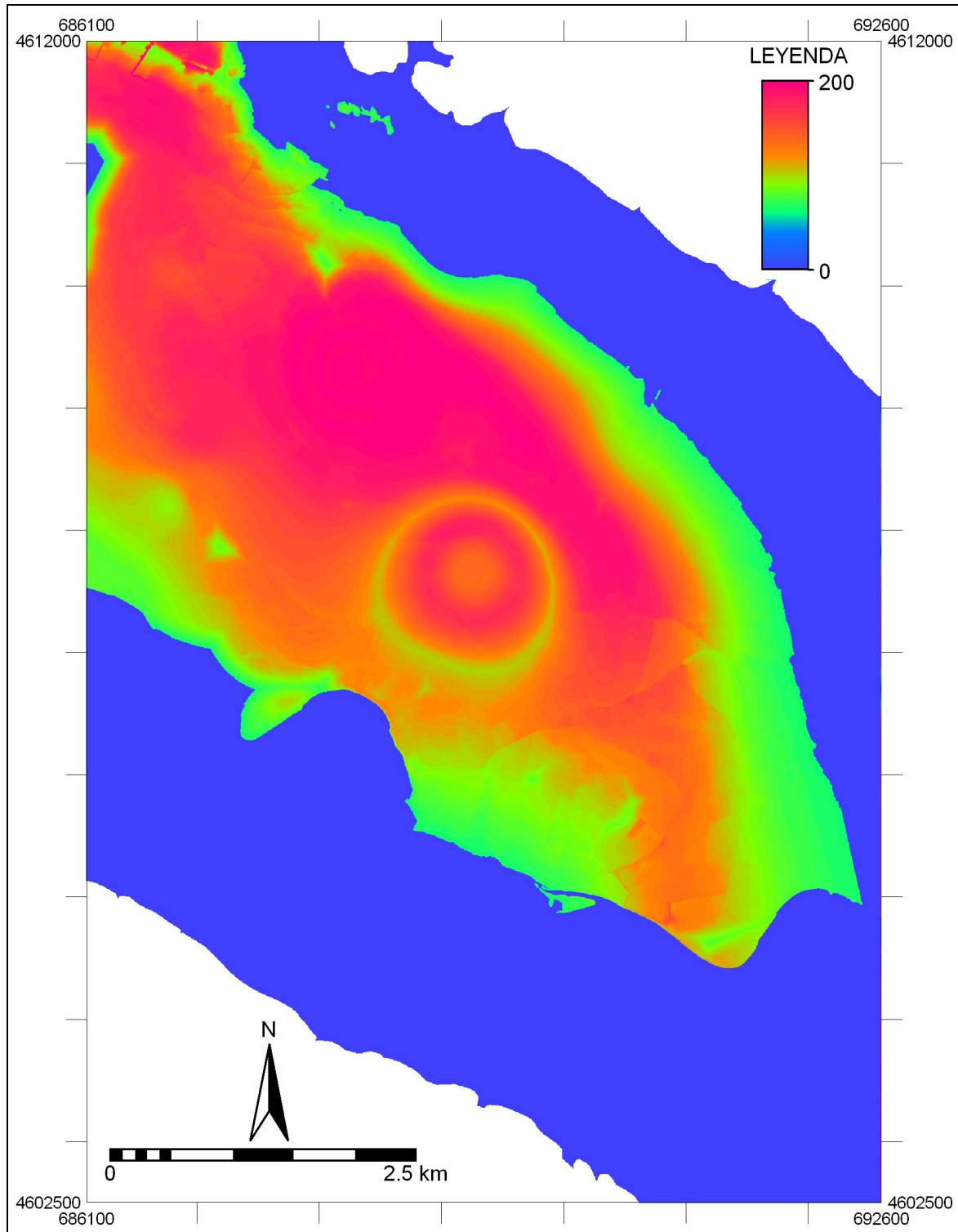


Figura 7.47. Modelo D: generado con las dolinas tipo 2 y sus variables más significativas: Índice de saturación en yeso, Distancia a acequias, Espesor y Conductividad eléctrica. (0: mínima susceptibilidad; 200: máxima susceptibilidad).

- Modelo E: incluye a las dolinas tipo 3 (transformadas a píxeles) y sus variables más significativas: Índice de saturación en yeso, Distancia a acequias, Espesor, Conductividad eléctrica y Geomorfología (Figura 7.48).

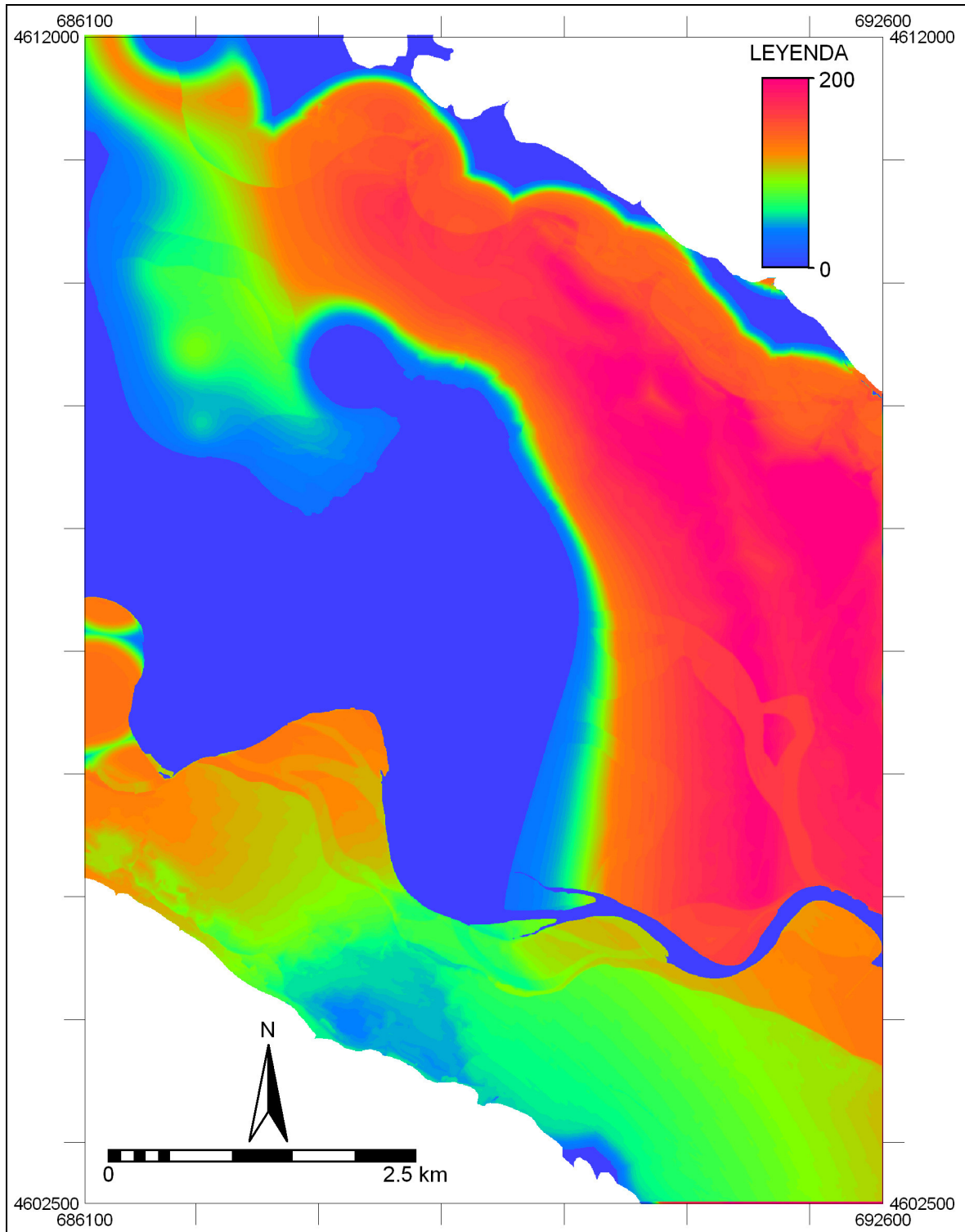


Figura 7.48. Modelo E: generado con las dolinas tipo 3 y sus variables más significativas: Índice de saturación en yeso, Distancia a acequias, Espesor, Conductividad eléctrica y Geomorfología. (0: mínima susceptibilidad; 200: máxima susceptibilidad)

La representación gráfica de los cinco modelos de probabilidad espacial o susceptibilidad presentados se ajusta bastante a la distribución de las dolinas inventariadas; esto es, discretiza bastante bien las zonas con alta densidad de dolinas. La representación de las diferentes curvas de ajuste de los modelos obtenidos se muestra en la Figura 7.49, donde se puede observar que el mejor ajuste lo ofrece el modelo D, generado con las dolinas de Tipo 2; mientras que el modelo A es el que se ajusta peor a sus propios datos. Este modelo es claramente inapropiado, pero el resto de los modelos aporta predicciones bastante buenas, de forma que con aproximadamente el 10% del área se explican más del 75% de las dolinas.

La escasa e incorrecta capacidad de predicción que se obtiene con el modelo A, probablemente se deba a que se da mucho peso a las grandes dolinas (polígonos con gran número de píxeles), mientras que las dolinas de tipo 1 sólo están representadas por un píxel, ocupando, en conjunto, una superficie muy pequeña a pesar de ser muy abundantes.

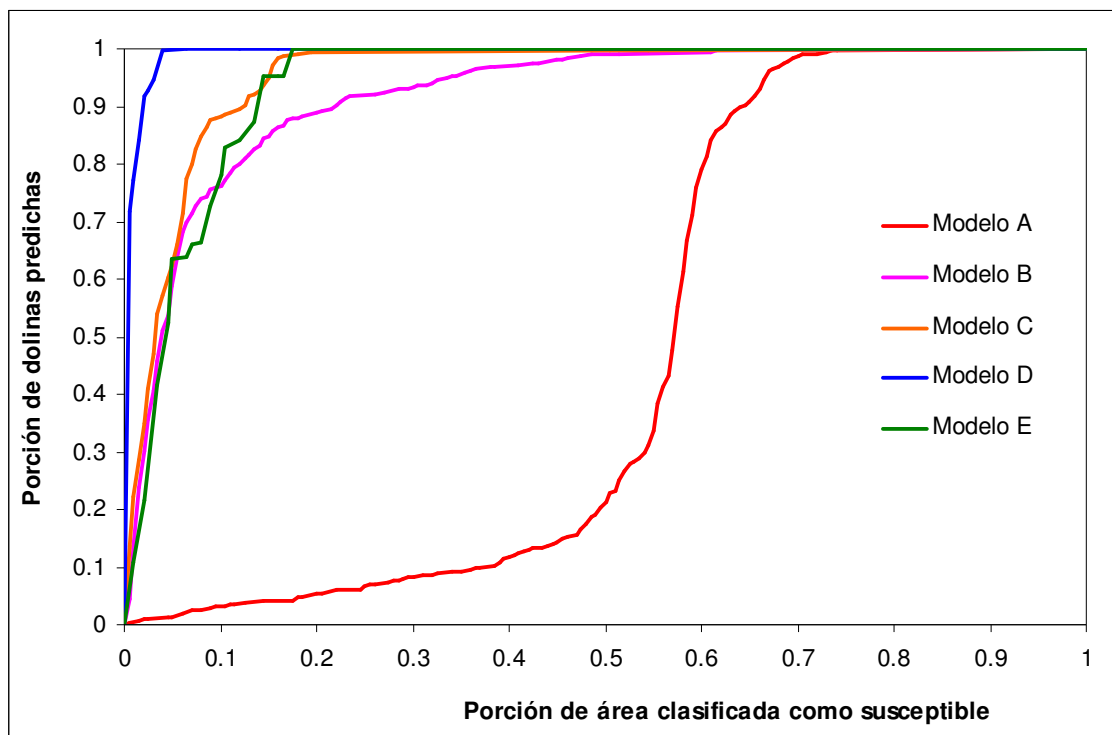


Figura 7.49. Curvas de ajuste de los 5 modelos de susceptibilidad obtenidos.

Los restantes modelos, por el contrario, muestran una alta capacidad de predicción, sobre todo cuando se tratan independientemente los diferentes tipos de dolinas, si bien el modelo elaborado para el conjunto de todas ellas (modelo B) empeora ligeramente la predicción respecto a los anteriores. En el caso del modelo D, el mejor de todos, puede haber un efecto de concentración de dolinas en una zona con características muy concretas.

A modo de resumen, los modelos generados presentan buenos ajustes (bastante mejores que para los deslizamientos), esto es, una predicción aproximada del 80% en el 10% del área de estudio.

En la Figura 7.50 se han superpuesto el modelo B y las dolinas (puntos) que se utilizaron para generarlo, y se puede observar como la mayoría de las dolinas existentes se sitúan en las zonas clasificadas como más susceptibles.

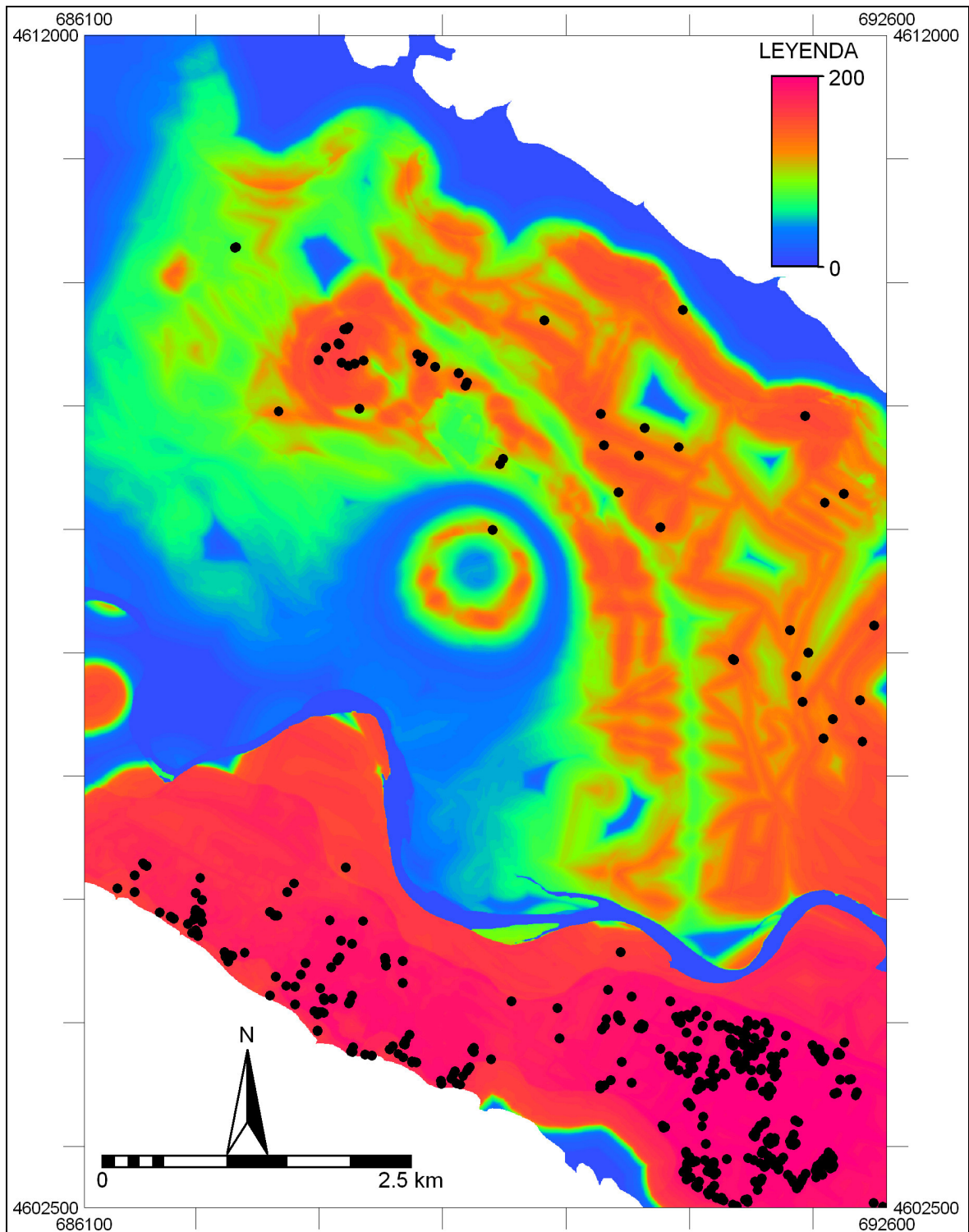


Figura 7.50. Superposición del Modelo B y el conjunto de todas las dolinas en forma de puntos (0: mínima susceptibilidad; 200: máxima susceptibilidad).

7.6.5.3 Evaluación de la capacidad predictiva de los modelos de susceptibilidad de dolinas

La técnica de validación o evaluación de resultados, en esta etapa preliminar de análisis del proceso de karstificación, sólo se ha aplicado a uno de los modelos obtenidos con el fin de observar el grado de fiabilidad que pueden llegar a proporcionar, y así obtener unos resultados iniciales. En esta etapa del trabajo no es estrictamente necesario validar todos los modelos, dado que aún se requiere generar otros nuevos y probar nuevas variables.

Para ello se ha seleccionado uno de los modelos anteriormente obtenidos (modelo B) y se ha procedido a evaluar su capacidad de predicción. La estrategia de evaluación/validación llevada a cabo ha sido la de dividir de forma aleatoria el número de dolinas en dos grupos, dado que no se dispone de series temporales de dolinas.

En la Figura 7.51 se presentan las curvas de validación correspondientes. Ambas curvas son similares y muestran que con un 10% del área de estudio se predicen en torno al 75% de las dolinas. Por otro lado, se aprecia en la figura que aproximadamente el 45% de la zona de estudio se puede considerar como “segura”.

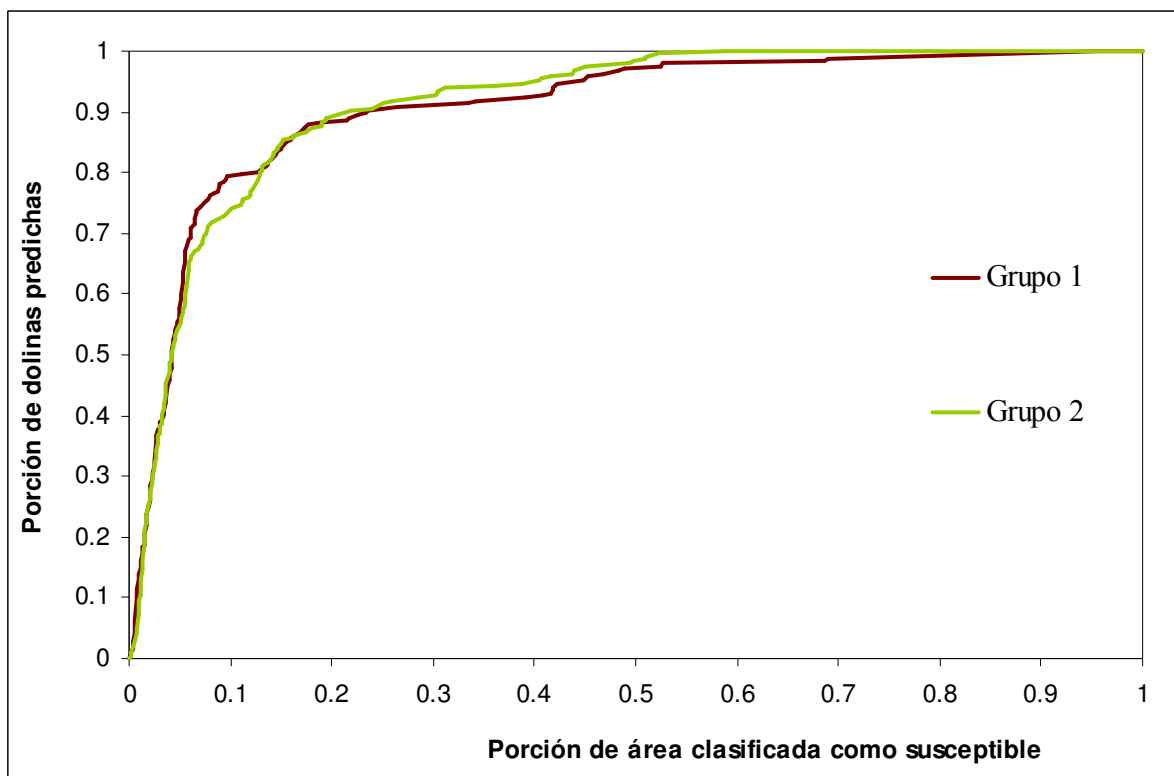


Figura 7.51. Curvas de validación obtenidas para el Modelo B. La muestra de dolinas ha sido dividida, de forma aleatoria, en 2 grupos; el modelo generado con el grupo 1 de dolinas es validado con las dolinas del segundo, y viceversa.

7.6.6 Consideraciones finales

Aunque los resultados preliminares obtenidos no son todavía concluyentes, ya que se necesita un mayor conocimiento sobre el funcionamiento de los diferentes tipos de dolinas y de las variables que condicionan su aparición (así como incluir otras nuevas, por ejemplo los usos del suelo), se puede considerar que son bastante satisfactorios, sobre todo si se tienen en cuenta las limitaciones que presentan las variables consideradas.

La mejora en las predicciones de este tipo de proceso está fuertemente condicionada por la mejora de las variables o factores condicionantes utilizados en los análisis, la mayoría de ellos relacionados con las características del subsuelo. El desarrollo de campañas de geofísica y de sondeos permitiría mejorar la calidad de esas variables y, por tanto, la capacidad de predicción de los modelos de susceptibilidad.

Los datos disponibles hasta el momento no han permitido llevar a cabo una evaluación del modelo utilizando una estrategia de tipo temporal. Sin embargo, dada la actividad del proceso, un nuevo inventario que facilite la recogida de datos relativos a la aparición de nuevas dolinas en un periodo de aproximadamente un año, haría posible la comprobación de la capacidad del modelo para predecir la aparición de futuros hundimientos y, eventualmente, la obtención de modelos de peligrosidad.

En resumen, aunque la aplicación del procedimiento para el análisis de este tipo de proceso tiene todavía carácter preliminar, se puede decir que la hipótesis de partida parece esencialmente correcta y que el método ofrece interesantes posibilidades para la evaluación de este tipo de riesgo.

7.7 Metadatos

Como se ha mostrado a lo largo de todo el trabajo, la calidad de los modelos elaborados y la fiabilidad de los resultados (predicciones) obtenidos depende de la calidad de los datos utilizados.

El uso de los modelos de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, como herramientas de planificación y gestión, debe hacerse teniendo en cuenta las incertidumbres existentes, dependientes en gran medida de la calidad de los datos. Por ello, es importante que el proceso de elaboración de los modelos y de obtención de resultados incluya, como una parte intrínseca del mismo, una detallada descripción del origen, naturaleza, forma de obtención, precisión, etc. de los distintos datos utilizados como variables, así como de los relativos a los resultados obtenidos a partir de los mismos. Eso no solamente permitirá conocer las potencialidades y limitaciones de dichos resultados, sino que también ayudará a identificar aquéllas variables en las cuales puede ser más importante la introducción de mejoras (actualización, aumento de la precisión, etc.). Por otro lado, una correcta explicación de los metadatos, garantiza la reproducibilidad de los resultados por parte de diferentes operadores, algo esencial en cualquier procedimiento científico. Además, es importante que los modelos elaborados sean dinámicos (tanto ellos como las variables en las que están basados, esto es, que puedan ser actualizados a medida que se incorpora nueva información. Para ello es necesario disponer en sus metadatos de un registro detallado sobre su linaje.

De acuerdo con lo anterior, se ha concebido y creado una estructura de base de metadatos (basada en los diferentes estándares internacionales) sobre la zona de estudio, que cubre todas las variables utilizadas, así como los distintos tipos de modelos obtenidos a lo largo del proceso presentado.

Para cada capa de información utilizada y obtenida se aporta información sobre los siguientes grandes epígrafes: Identidad del modelo, Calidad de los datos, Referencia espacial, Organización espacial y Distribución de los datos.

La citada base de metadatos, que constituye una de las aportaciones al proyecto europeo ALARM, se presenta de manera detallada en el Anexo II.