

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA CREAR MAPAS DE PELIGROS NATURALES EN GUIPÚZCOA UTILIZANDO SIG

PAULO ETXEBERRIA RAMÍREZ¹, JOSÉ MIGUEL EDESO FITO y
ADOLFO BRAZAOLA ROJO

¹ Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Minera y de Obras Públicas. Universidad del País Vasco. Colina de Beurko, s/n. 48902-Barakaldo (Vizcaya), España
paulo.etxeberria@ehu.es

RESUMEN

Se propone una metodología para generar mapas de peligro en la provincia de Guipúzcoa, a escala comarcal, como primer paso en la evaluación de los riesgos naturales. La metodología incluye los tres peligros naturales más habituales en dicho territorio: los movimientos de ladera, los incendios forestales y las inundaciones fluviales. Se ha evaluado de manera independiente la susceptibilidad a estos fenómenos naturales y, posteriormente, los mapas de peligro obtenidos han sido combinados para obtener un mapa de peligro natural múltiple. En la metodología se emplean diversos modelos matemáticos, SIG *raster* y vectoriales, y otras herramientas informáticas.

La metodología ha sido ensayada en una zona concreta del territorio guipuzcoano: el valle de Oiartzun. Se presentan y comentan los mapas obtenidos para dicha zona.

Palabras clave: Peligros naturales, cartografía de peligro, SIG, Guipúzcoa (España).

ABSTRACT

A methodology to create hazard maps in the province of Guipúzcoa is proposed, at local scale, as a first stage of natural risk evaluation. Methodology involves three most frequent hazards in that territory: mass-movements, forest fires and river-floods. The susceptibility to these natural phenomena has been evaluated independently, and then hazard maps have been combined in order to obtain the natural multi-hazard map. In the methodology we employ mathematical models, raster and vector GIS, and other computer-based tools.

The methodology has been tested in an area of Guipúzcoa: the valley of Oiartzun. We present and comment maps obtained for this zone.

Keywords: Natural hazards, hazard maps, GIS, Guipúzcoa (Spain).

1. Introducción. Cartografía de riesgos naturales. Definiciones básicas

Los desastres naturales producen todos los años miles de víctimas mortales e importantes pérdidas económicas. Estas pérdidas han seguido una tendencia ascendente durante los últimos años debido tanto al aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos atmosféricos extremos (lluvias torrenciales, períodos de sequía, etc.) como a la cada vez mayor ocupación de áreas de peligro por parte del ser humano.

Los desastres son, en la mayoría de los casos, previsibles, ya que es posible definir a priori cuáles son los lugares con un mayor riesgo. Para ello debe calcularse la probabilidad de que ocurra un fenómeno natural peligroso y la exposición y la vulnerabilidad del ser humano frente a dicho peligro. Esta necesidad de conocer la distribución espacial del riesgo obliga a contar con mapas de riesgo, herramienta imprescindible en la gestión de emergencias.

Con este fin se propone una metodología para generar mapas de peligros naturales en el territorio histórico de Guipúzcoa. Esta provincia no puede calificarse de muy alta peligrosidad en comparación con otros territorios, pero en ella tienen lugar cíclicamente eventos de origen natural que provocan apreciables daños sociales y económicos. Es el caso de las avenidas que tienen lugar en los ríos guipuzcoanos, originadas por precipitaciones considerables y una orografía que favorece las inundaciones, los incendios forestales que provocan cada año pérdidas de cientos de hectáreas, los deslizamientos que originan todos los años daños en las carreteras, la erosión hídrica y los temporales de viento y nieve.

Las catastróficas inundaciones de agosto de 1983 llevaron a las distintas Administraciones Públicas del País Vasco a plantearse la necesidad de conocer el territorio para prevenir o corregir los desequilibrios naturaleza-humanidad. De esta forma, se han desarrollado diversos trabajos cartográficos, y de otros tipos, acerca de los riesgos naturales.

En esa dinámica se ha desarrollado una metodología para evaluar espacialmente, a escala comarcal, la susceptibilidad a los riesgos naturales más frecuentes en Guipúzcoa. La evaluación se realiza de manera independiente en cada riesgo y, posteriormente los peligros son superpuestos para obtener un mapa de peligro natural múltiple. La metodología propuesta hace un uso intensivo de SIG vectorial y *raster* y de otras herramientas.

En el apartado 2 de este artículo se resume la metodología que se ha desarrollado. En su primer apartado, el 2.1, se citan los antecedentes en relación con el estudio de los riesgos naturales en la provincia de Guipúzcoa y las líneas generales de la propuesta metodológica. En los apartados 2.2, 2.3 y 2.4 se desarrollan las metodologías de evaluación espacial de los tres fenómenos naturales considerados. En el apartado 2.5 se expone la combinación de dichos mapas para obtener el mapa de peligro natural múltiple. En el apartado 3 se exponen los aspectos más relevantes de la aplicación del método en el valle de Oiartzun, y los principales resultados que se han obtenido. Finalmente, en el apartado 4 se citan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo.

2. Propuesta metodológica

2.1. Antecedentes. Líneas generales

En el territorio guipuzcoano se han llevado a cabo en los últimos veinte años varios trabajos relacionados con los riesgos naturales. Algunos de estos estudios consisten en el inventario e interpretación de diversos datos fisiográficos que tienen relación con la interacción naturaleza-sociedad: relieve, vegetación, geología, geomorfología, hidrometeorología, suelos, etc. (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1985-91). También se han elaborado mapas de peligrosidad de algunos de los fenómenos naturales más dañinos en dicho territorio: inundaciones fluviales, movimientos de ladera, erosión costera, etc. (Diputación Foral de Guipúzcoa, 1985-87; 1988).

Sobre la base de los datos disponibles, se ha elaborado una metodología para zonificar el territorio, a escala comarcal, en relación a su peligrosidad natural. En la metodología propuesta se incluyen aquellos fenómenos naturales peligrosos que producen, con frecuencia, daños importantes en el territorio de Guipúzcoa: los movimientos de ladera, los incendios forestales y las inundaciones producidas por desbordamiento de los cauces fluviales. No se incluye la erosión hídrica, por considerarlo un fenómeno dañino a largo plazo.

La metodología se limita a la fase de análisis de la probabilidad o susceptibilidad de los fenómenos naturales catastróficos. Se obtienen, por tanto, mapas de peligro, no mapas de riesgo. La escala de los mapas generados es de tipo comarcal, en concreto 1:25.000. Esta escala resulta muy apropiada en los estudios de ordenación territorial, y además se adecua a la mayor parte de los datos cartográficos disponibles. En el estudio del peligro de inundación se ha empleado una escala más detallada (1:5.000); el mapa obtenido se ha generalizado posteriormente a la escala común.

Dada la necesidad de introducir, tratar, analizar y presentar los datos cartográficos, en la aplicación de la metodología propuesta se han empleado Sistemas de Información Geográfica. Estas herramientas vienen utilizándose en el análisis de los riesgos naturales con diferentes niveles de desarrollo. En el caso más sencillo, los SIG han sido utilizados como simples sistemas de cartografía automatizada, esto es, como herramientas para introducir, gestionar y representar datos cartográficos. Hoy en día, sin embargo, se aprovechan cada vez más todas las funciones de los SIG –en particular, las funciones de análisis espacial– en el análisis de los riesgos.

Los SIG pueden emplearse con diferentes niveles de profundidad en el campo de los riesgos naturales: 1) utilización de los SIG para estudiar acontecimientos catastróficos, 2) empleo de los SIG para alimentar modelos de evaluación de riesgos (limitar el uso del SIG al cálculo de alguna de las variables, de tipo espacial, necesarias en el análisis), 3) implementación de alguna de las fases de la evaluación del riesgo (habitualmente la peligrosidad) en un SIG, y 4) implementación del proceso completo de la evaluación del riesgo en un SIG (determinación de la peligrosidad, la exposición, la vulnerabilidad y el riesgo consiguiente).

En el caso que nos ocupa, la mayor parte de las metodologías que se proponen en este artículo han sido implementadas en un SIG (nivel 3). También se ha empleado esta herramienta

para alimentar los modelos hidrológico e hidráulico, y para mostrar los resultados obtenidos tras la ejecución de estos (nivel 2).

Dada la influencia que tienen los datos cartográficos de tipo continuo o *raster* (fundamentalmente las diferentes características topográficas) en la definición de la peligrosidad natural, se ha optado por una representación de tipo *raster* (con un tamaño de píxel de 20 x 20 m). En consecuencia, se ha empleado un SIG *raster* como herramienta central para el cálculo de los índices de peligro y otros cálculos intermedios. Por este motivo, los datos de tipo vectorial (puntual, lineal y poligonal) son revisados en un SIG vectorial y se convierten a formato *raster*. Además de los SIG, se han empleado diversas herramientas informáticas: sistemas de gestión de bases de datos, herramientas CAD, modelos hidrológicos e hidráulicos y otros programas auxiliares.

La metodología se estructura en cuatro partes, una por cada mapa de peligro generado ([figura 1](#)):

1. Creación del mapa de peligro de movimientos de ladera (apartado 2.2)
2. Creación del mapa de peligro de incendios forestales (apartado 2.3)
3. Creación del mapa de peligro de inundación (apartado 2.4).
4. Obtención del mapa de peligro natural múltiple como superposición de los mapas de peligro individual (apartado 2.5).

2.2. Peligro de movimientos de ladera

En los últimos veinte años se han llevado a cabo diversos estudios acerca de los factores que condicionan y desencadenan los movimientos de ladera en el territorio guipuzcoano (Remondo, Díaz y Zafra, 1995). Según estos estudios, los tipos de movimiento más habituales son los deslizamientos planos y los deslizamientos rotacionales, involucrando fundamentalmente a derrubios y roca. Las litologías menos estables se corresponden con depósitos superficiales de diferente tipo, arcillas, materiales detríticos alternantes, ofitas (asociadas a materiales triásicos arcillosos) y diversos materiales calcáreos. Los movimientos ocurren, en su gran mayoría, en laderas cubiertas por pastizales y, en menor medida, por matorrales.

La lluvia es el factor desencadenante más importante en el territorio estudiado, junto con las actividades humanas. Los movimientos ocurren, en su mayor parte, tras la saturación del suelo debida a la infiltración de la lluvia caída; en algunos casos se pueden producir por la elevación del nivel freático.

Estos factores principales se ven ayudados por la erosión que se produce en laderas en las que la vegetación tiende a desaparecer, bien debido a la construcción de infraestructuras, bien debido a tratamientos agresivos del terreno (relacionados con la explotación forestal).

En la metodología que se propone para evaluar espacialmente este peligro natural, se incluyen únicamente los factores condicionantes. Se ha optado por realizar un mapa de susceptibilidad al movimiento de ladera. Se propone, por tanto, un análisis espacial pero no temporal de la peligrosidad.

Se ha elegido un método de tipo cualitativo que ya ha sido ensayado en diferentes zonas de la cornisa cantábrica (González Lastra *et al.*, 1980; Diputación Foral de Guipúzcoa, 1985-87). Dicho método evalúa tres factores primarios: la litología subyacente, la vegetación y la pendiente topográfica; y varios factores secundarios. De entre estos últimos se han incluido en la propuesta los siguientes: la coincidencia entre la estratificación y la ladera, y la cercanía de fracturas geológicas ([figura 2](#)).

La asignación del grado de peligro primario se lleva a cabo mediante una tabla de tres entradas que contempla los factores principales (litología, pendiente y vegetación). Las clases litológicas son agrupadas en relación a su estabilidad / inestabilidad siguiendo los criterios utilizados hasta ahora en diferentes estudios cualitativos y estadísticos realizados en Guipúzcoa y territorios cercanos. La pendiente, obtenida a partir del MDE de 20 x 20 m, es reclasificada en intervalos significativos. Finalmente, los polígonos de vegetación son clasificados en función de su aportación a la estabilidad de las laderas.

Una vez calculado el peligro debido a los tres factores principales, se añade la posible coincidencia geométrica de los estratos y la forma de la ladera situada sobre ellos. Esta coincidencia ha sido evaluada únicamente en aquellas litologías que suelen presentar estos fenómenos, bien de estratificación, bien de esquistosidad. El cálculo se lleva a cabo a partir de los datos puntuales de dirección y buzamiento existentes en el *Mapa Geológico del País Vasco* (Ente Vasco de la Energía, 1987-92): estos valores son interpolados y comparados con la orientación y la pendiente del MDE.

Por último, del mapa geológico se extraen aquellas discontinuidades en las que la fracturación puede ser más intensa: las fallas y los cabalgamientos (se ha considerado conveniente definir un área de influencia de 20 m a ambos lados de las líneas de fractura).

Todas las operaciones descritas (la asignación del valor de peligro primario a las diferentes combinaciones de tres variables, el cálculo de la coincidencia de la estratificación y la ladera, y la combinación final de todos los factores) han sido implementadas en un SIG *raster*. El mapa resultante representa la susceptibilidad del terreno a sufrir movimientos de ladera. Este mapa se presenta con dos graduaciones: una más detallada de 9 valores, y otra, más fácil de leer, de 5 valores.

2.3. Peligro de incendios forestales

Los incendios forestales son un peligro natural (aunque con un alto componente de origen humano) bastante frecuente en Guipúzcoa en períodos de tiempo bastante breves y concretos, fundamentalmente en invierno.

Diferentes estudios realizados en dicha provincia, y en territorios cercanos, acerca de la influencia de la climatología en la frecuencia de los incendios forestales llegan a las mismas conclusiones. Al contrario de lo que ocurre en la zona mediterránea de la Península Ibérica, en el Cantábrico oriental son los meses invernales, de diciembre a abril, los más propicios para la generación de incendios, sobre todo con situaciones de viento S y SO. Es en esta época del año

cuando la vegetación está en su período de latencia, y, debido a la acción del viento sur, ésta se seca rápidamente y alcanza altos valores de inflamabilidad y combustibilidad. Los incendios se dan también, aunque en menor medida, en los meses de verano debido, sobre todo, a períodos prolongados de sequía que compensan el verdor estacional de la vegetación.

El ser humano es el causante principal, si no el único, de los incendios en el territorio estudiado, bien a través de actividades negligentes (quemadas de pastos y matorrales realizadas sin guardar medidas de seguridad, trabajos forestales, cigarrillos o fuegos, etc.), bien debido a motivaciones psicológicas concretas (pirómanos, etc.).

Los incendios que se originan en este territorio suelen ser de reducida extensión, debido a la distribución de la vegetación en forma de mosaico de varios tipos de ocupación (bosque autóctono, repoblaciones, prados y cultivos, asentamientos humanos), lo que dificulta la propagación de los mismos.

La metodología que se propone para evaluar espacialmente el peligro de incendios tiene en cuenta los factores permanentes que afectan a los incendios y los peores casos de los factores transitorios (las condiciones de viento). Dicha metodología se fundamenta en tres fases ([figura 3](#)).

En primer lugar se crea un mapa de peligro de ignición de tipo local, asignando un índice de peligro de manera cuantitativa. Después se crean diversos mapas que representan la velocidad de propagación del incendio de superficie. Finalmente, se designan focos de fuego a partir del mapa de peligro de inicio, y, mediante técnicas de difusión anisotrópica, se modela el movimiento del fuego sobre el terreno, obteniéndose así las áreas quemadas. Tras realizar múltiples simulaciones con diferentes escenarios de peligro (focos aleatorios de inicio del fuego), se determina la probabilidad que tiene cada área de resultar quemada.

El peligro de inicio del fuego es evaluado mediante un modelo de tipo local que comprende cuatro variables: el tipo de vegetación, las acciones humanas que pueden originar incendios, la radiación solar recibida y la altitud (Salas y Chuvieco, 1992; Dagorne *et al.*, 1994). La vegetación es distribuida en cuatro grupos en función de su inflamabilidad. Las causas humanas son caracterizadas por elementos espaciales a los que se les asigna un grado de peligro en relación a las estadísticas de causalidad humana existentes en Guipúzcoa. Algunos de estos elementos son carreteras y caminos, áreas de trabajos forestales, áreas de quemadas agrícolas y de pastos, áreas de recreo, ferrocarriles, etc. En algunos casos se han definido áreas de influencia (*buffers*) a partir de los elementos originales. La radiación solar es evaluada, de manera simplificada, a partir de la orientación y la pendiente de cada píxel en el MDE. El factor relacionado con la altitud es obtenido por reclasificación de los valores del MDE. El mapa resultante representa la susceptibilidad a la ignición.

La capacidad de propagación del fuego es calculada de manera vectorial (magnitud y dirección) a partir de una extensión a dos dimensiones del modelo clásico de Rothermel (1972; 1983). Este modelo tiene en cuenta diversas características de los combustibles, la pendiente y la velocidad del viento. En la metodología que se propone, se suman vectorialmente los factores con dirección definida (la interacción viento-topografía), y se añade, de manera escalar, el factor relacionado con la combustibilidad de la vegetación. Se obtienen así parejas de mapas que

representan la magnitud y la dirección de la capacidad de propagación del fuego para las condiciones de viento más habituales en el inicio y el desarrollo de los incendios en Guipúzcoa: de manera simplificada, vientos de 10, 30 y 50 Km/h del S y del SO, y vientos de 10 Km/h del NE. Dada la escala a emplear y los datos disponibles, se han diferenciado cinco tipos de combustibles: pasto, matorral, sotobosque, hojarasca y áreas sin combustibles.

Finalmente, se generan escenarios de peligro situando focos aleatorios en el mapa de peligro de inicio del fuego, y se lleva a cabo una simulación del alcance de los incendios para las diferentes situaciones de peligro. El alcance de los incendios es evaluado mediante una función de difusión anisotrópica, basada en el cálculo de fricciones que dependen de la magnitud del vector de propagación y del ángulo formado por la dirección de propagación en cada punto en relación a la dirección desde el punto de inicio.

Las simulaciones se han llevado a cabo sobre la base de múltiples focos de fuego, distribuidos de forma aleatoria estratificada. La extensión de los incendios ha sido fijada en función de la magnitud del viento, de manera que para vientos suaves (del S, SO y NE) se ha estimado una extensión de 1 ha, y para vientos medios y fuertes (del S y SO) se ha estimado que los incendios afectan a superficies de 10 y 100 ha, respectivamente.

Tras realizar un número suficiente de simulaciones (1.000 en concreto) se obtiene un mapa en el que cada píxel refleja el número de veces que ha resultado afectado por el fuego. Una vez reclasificado este mapa, se obtiene el mapa de peligro de incendios.

La metodología descrita ha sido implementada en su totalidad en un SIG *raster*, que ha demostrado ser una excelente herramienta en el campo del análisis espacial. De entre las diferentes funciones de análisis empleadas en esta metodología pueden destacarse las de reclasificación, superposición lógica y matemática, proximidad y difusión espacial.

2.4. Peligro de inundaciones fluviales

Las inundaciones ocasionan de manera cíclica (siete en los últimos 20 años) en Guipúzcoa pérdidas de millones de euros y varias víctimas mortales (este último número es, desde el trágico suceso de 1983, bastante reducido, afortunadamente). Este territorio tiene, por tanto, un elevado grado de peligrosidad.

Las conclusiones de diferentes estudios acerca de este fenómeno en el territorio guipuzcoano (Ibisate *et al.*, 2000) indican una incidencia significativa de las avenidas fluviales, debida a la elevada frecuencia de precipitaciones que pueden producir intensidades diarias importantes, a la conversión de buena parte de la precipitación en escorrentía superficial debido a los elevados coeficientes de escorrentía (ocasionados por la litología y suelos de transmisión hidráulica reducida, la orografía montañosa y la alta densidad urbana), a la baja regulación natural y artificial de los ríos guipuzcoanos y al alto grado de ocupación de los fondos de los valles por parte del ser humano.

Se propone una metodología para zonificar la probabilidad de inundaciones fluviales a escala local. Esta metodología se basa en tres grandes pasos (figura 4). En primer lugar se realiza un modelado hidrometeorológico con el que se calculan los caudales máximos instantáneos de escorrentía superficial para diferentes probabilidades de retorno. Este primer paso se realiza a escala comarcal (1:25.000), la empleada en la evaluación de los peligros de movimientos de ladera e incendios forestales. Después, se lleva a cabo un modelado hidráulico de la llanura de inundación, donde se calcula la altura que alcanzaría el agua. Dado que las inundaciones constituyen fenómenos muy localizados, el estudio hidráulico se limita al fondo del valle, empleándose una escala más detallada, concretamente 1:5.000. Finalmente, a partir de la altura del agua se delimitan los mapas de peligro de inundación a escala local, 1:5.000 (tamaño de píxel de 5 x 5 m).

El modelado hidrometeorológico que se propone necesita tres tipos de variables. Por un lado, mapas de precipitación para diferentes períodos de retorno (se han elegido períodos de 10, 100 y 500 años; o, lo que es lo mismo, probabilidades anuales del 10%, 1% y 0,2%, respectivamente), un mapa de cuencas de drenaje y una tabla de tiempos característicos de cuencas y tramos fluviales, y, finalmente, un mapa de umbral de escorrentía obtenido por combinación de los mapas de tipo de cobertura vegetal, pendiente topográfica y tipo de suelo hidrológico.

A partir de los mapas de la precipitación máxima esperable en 24 horas (para períodos de retorno de 10, 100 y 500 años) existente en formato *raster* con un tamaño de píxel de 500 x 500 m, que cubre toda la provincia de Guipúzcoa, y, siguiendo las recomendaciones en relación con la reducción por área de cuenca y por duración de la tormenta, y en relación con la definición de hietogramas (diez intervalos), ofrecidas por los últimos trabajos realizados en este territorio (IKAUR, 1999), se generan mapas de precipitación de diseño para las tres probabilidades mencionadas, en formato *raster*, con un tamaño de píxel de 20 x 20 m. Se ha elegido una duración de tormenta de 24 horas con un doble fin: representar las lluvias intensas de tipo orográfico y frontal y homogenizar los datos de partida para todas las cuencas que se pudieran analizar.

La conversión de la precipitación en escorrentía es evaluada mediante el método del SCS, adaptado al territorio español (MOPU, 1987). En primer lugar se calcula el umbral de escorrentía, combinando el mapa de vegetación clasificada según su tipo hidrológico, el mapa de clases hidrológicas de suelo y el mapa de pendiente topográfica. Las agrupaciones se llevan a cabo siguiendo las recomendaciones de diferentes trabajos realizados en España. La combinación se lleva a cabo en un SIG *raster*, a escala comarcal (tamaño de píxel de 20 x 20 m).

La escorrentía generada se calcula de manera distribuida (se calcula la escorrentía generada por cada píxel y se obtiene la suma de todas ellas), aprovechando varias herramientas de análisis espacial incorporadas en los SIG *raster*. Puede destacarse la función que permite calcular, a lo largo del tiempo, diferentes funciones estadísticas de una serie de píxeles pertenecientes a un grupo. En el caso que nos ocupa se calcula el valor medio de la escorrentía generada por cada cuenca a lo largo de los diez intervalos temporales, es decir, se calcularán los caudales generados en cada cuenca. Se ha elaborado un algoritmo para realizar estos cálculos. Los hidrogramas son extraídos en formato tabular para alimentar posteriormente el modelo hidrológico.

Se calculan asimismo dos variables temporales asociadas a las cuencas que generan los caudales de escorrentía: el tiempo de concentración de la cuenca (mediante la fórmula de Témez) y el tiempo de viaje de la avenida a lo largo del tramo fluvial (según el método de Muskingum).

El modelado hidrológico propiamente dicho se efectúa con el modelo HEC-HMS, que es alimentado con los hidrogramas de escorrentía de cada cuenca, el esquema hidrológico del sistema de drenaje (definido manualmente) y sus tiempos característicos. De esta forma se obtienen hidrogramas en puntos determinados de la red fluvial, de los que se extraen los caudales máximos instantáneos para cada probabilidad de retorno.

Para realizar el modelado hidráulico resulta necesario crear un esquema hidráulico del cauce y sus márgenes. Este esquema está constituido por secciones transversales y los tramos fluviales que las unen, extraídos todos ellos del mapa topográfico a escala 1:5.000. Se utiliza, para ello, un programa CAD, desde el que la geometría de las secciones es exportada al modelo hidráulico en forma de tabla de valores, manteniéndose en todo momento, la referencia geográfica (el sistema de referencia es el UTM).

El modelado hidráulico se realiza con el modelo HEC-RAS (US Army Corps Of Engineers, 2001), que es alimentado con el esquema hidráulico generado en el paso anterior, además de con los obstáculos existentes en la red fluvial (puentes fundamentalmente, definidos tras un trabajo de campo). Conocidos los caudales máximos instantáneos en varios nudos de la red de drenaje obtenidos en el modelado hidrometeorológico, se obtienen las alturas que alcanzaría el agua en cada una de las secciones y para cada probabilidad de retorno, de manera tabular y manteniendo las coordenadas UTM.

Posteriormente la altura del agua es interpolada entre las secciones transversales, generándose mapas de la lámina de agua. La topografía de la llanura de inundación es definida, por su parte, mediante un MDE con un tamaño de píxel de 5 x 5 m obtenido por interpolación a partir de las curvas de nivel del mapa topográfico a escala 1:5.000, complementadas, en su caso, con los resultados de una restitución fotogramétrica. Puede emplearse para ello un programa de modelado de superficies. Los mapas de la superficie del agua son comparados con la topografía (superposición de mapas, resta de alturas y reclasificación de valores), para obtener las áreas que resultarían inundadas para cada período de retorno.

2.5. Peligro natural múltiple

Uno de los objetivos principales del trabajo desarrollado consiste en generar un mapa de peligro múltiple natural, esto es, combinar los tres mapas individuales para obtener un único mapa que contemple el peligro natural completo, es decir, el originado por los tres fenómenos mencionados.

Esta combinación puede llevarse a cabo de varias maneras. Existe la posibilidad de combinar dichos mapas en función de la probabilidad de cada peligro, en función de la probabilidad y la intensidad asociada, o combinarlos de manera cualitativa. En el caso que nos ocupa, las representaciones espacio-temporales de los peligros considerados son las siguientes:

1. Peligro de movimientos de ladera: se ha creado un mapa de susceptibilidad del terreno a sufrir un movimiento de ladera. La evaluación del peligro es de tipo cualitativo y se obtiene como producto de una combinación subjetiva de diversos factores.
2. Peligro de incendios forestales: el mapa generado es de tipo probabilístico (número de veces que resulta incendiada cada área sobre 1.000 simulaciones). Sin embargo, las simulaciones se inician en un mapa de peligro de ignición no probabilístico, y además se tienen en cuenta unas condiciones meteorológicas significativas y uniformes.
3. Peligro de inundaciones: este mapa sí puede considerarse un mapa de probabilidad, ya que se origina a partir de tormentas de período de retorno o probabilidad conocida (10, 100 y 500 años). Si bien la probabilidad asociada a cada tormenta no es exactamente la probabilidad de inundación (otros factores como la duración de la tormenta, su distribución espacial, temporal, etc. pueden variar esta relación), los períodos de retorno de las lluvias de diseño representan de manera bastante ajustada la probabilidad de este peligro natural.

Dado que los mapas de peligro individual generados utilizan graduaciones de origen y extensión diferentes, éstos han sido finalmente combinados de manera cualitativa. Esta combinación se hace sobre la base de una graduación de valores de peligro entre 1 y 5, desde "Muy bajo" hasta "Muy alto". En la combinación cualitativa que se propone se da un mayor peso al peligro de inundación.

Previamente a dicha combinación, es necesario realizar una generalización de la escala del mapa de peligro de inundación (paso de escala local a escala comarcal, agrupando píxeles) y una reclasificación de sus valores de peligro ([figura 5](#)). La combinación de los tres peligros se lleva a cabo a través de una tabla de tres entradas. El procedimiento ha sido implementado en su totalidad en un SIG *raster*.

3. Aplicación en el área de Oiartzun. Resultados obtenidos

Con el objeto de probar la metodología de generación de cartografía de peligros naturales que se propone, ésta ha sido aplicada en una zona concreta del territorio histórico de Guipúzcoa. La zona elegida pertenece al valle de Oiartzun ([figura 6](#)). Se ha elegido esta zona por su variedad en cuanto al relieve, la vegetación, la geología y la ocupación humana. Además constituye una zona en la que se han llevado a cabo pocos estudios relacionados con los peligros naturales.

Este valle se sitúa en el NE de Guipúzcoa y está formado por los territorios regados por el río principal que da nombre al valle y sus afluentes. El río Oiartzun nace en el macizo de Aiako Harria y desemboca en el Mar Cantábrico.

La cabecera del río se desarrolla sobre los materiales graníticos de Aiako Harria, presentando unas pendientes elevadas y unos valles encajados en forma de V. En el curso medio-bajo, el río discurre sobre materiales fundamentalmente detríticos del Cretácico, suavizándose las pendientes y creándose una llanura de inundación

Las zonas altas del valle se encuentran cubiertas por robledales, hayedos, plantaciones de coníferas, matorrales y pastos, mientras que los prados ocupan mayoritariamente los fondos de los valles. La ocupación humana es relativamente importante en el fondo del valle, bajo la forma de núcleos rurales (barrios del municipio de Oiartzun) y polígonos industriales a lo largo del río

Los datos disponibles son muchos y variados. Se cuenta, al igual que en el resto de Guipúzcoa, con datos cartográficos en formato vectorial a escala 1:25.000 (topografía, vegetación, geología, suelos, geomorfología, hidrografía, etc.), el MDE de Guipúzcoa (tamaño de píxel de 20 x 20 m) y diversos datos alfanuméricos (recomendaciones acerca de precipitaciones de diseño, etc.). La información vectorial ha sido, en primer lugar, sometida a un proceso de limpieza, se han generado topologías de tipo poligonal y se ha creado una base de datos asociada a dichos mapas. Para ello se ha empleado un SIG vectorial y todos los mapas han sido convertidos a formato *raster*.

La mayor parte de los cálculos han sido realizados en el seno de un SIG *raster*, empleándose para ello algoritmos diseñados específicamente con ese objetivo. Se ha empleado también un programa de CAD para extraer las secciones transversales de la llanura de inundación del río Oiartzun. El modelado hidrológico se ha llevado a cabo con el programa HEC-HMS y el hidráulico con HEC-RAS. Se ha utilizado asimismo un programa de modelado de superficies para generar los mapas de la lámina de agua.

Se han seguido las metodologías descritas en los capítulos anteriores y se han obtenido los mapas que representan la susceptibilidad o la probabilidad de cada uno de los fenómenos naturales considerados y la combinación de los tres (Etxeberria, 2004).

En lo que se refiere al peligro de movimientos de ladera ([figura 7](#)), las áreas con un peligro muy alto se distribuyen por todo el valle, sin llegar a afectar a grandes extensiones. Las laderas que se verían afectadas se asientan mayormente sobre areniscas, arcillas, pizarras y diversos materiales calcáreos, tienen una pendiente apreciable (por encima del 30%) y se encuentran cubiertas por vegetación de porte herbáceo y repoblaciones de coníferas. Los movimientos de ladera podrían afectar, directamente o por alcance, a varias carreteras comarcales y a algunos edificios.

El mayor peligro de incendios forestales ([figura 8](#)), se localiza en áreas cubiertas por repoblaciones forestales, robledales y matorrales situadas en laderas con una pendiente media o alta y no muy alejadas de carreteras y caminos. Se trata de áreas cercanas a puntos probables de inicio del fuego y en las que éste puede propagarse fácilmente. Los incendios afectarían a la parte rural del valle; no existe ninguna concentración de edificios en áreas de alto peligro, únicamente pueden mencionarse algunos caseríos aislados. Sí podrían verse afectados tramos de algunas carreteras comarcales. De cualquier forma, el daño ambiental y económico en los montes puede ser muy elevado.

El peligro de inundación fluvial ([figura 9](#)) se localiza lógicamente en las zonas más bajas del valle. Estas zonas de muy alto peligro son principalmente los márgenes del río Oiartzun desde el barrio Ergoien hasta el paso bajo la autopista A-8 y los márgenes de algunos tramos de sus afluentes principales. Algunas de estas áreas se corresponden con polígonos industrio-comerciales, y otras con barrios residenciales del municipio de Oiartzun. Cabe destacar el barrio de Altzibar situado en

la confluencia del arroyo Karrika y el río Oiartzun, que puede verse afectado por inundaciones producidas por tormentas con un período de retorno de 10 años (probabilidad anual del 10%). Otras zonas de especial peligro son la parte baja de los barrios de Iturriotz y Ugaldetxo, y varios polígonos industriales y comerciales.

En cuanto al peligro natural múltiple ([figura 10](#)), puede apreciarse que las áreas de mayor peligro combinado corresponden al fondo del valle (áreas con un período de retorno de inundación de 10 años) y a varias laderas susceptibles de sufrir tanto movimientos de ladera como incendios forestales. Estas laderas se encuentran cubiertas por repoblaciones forestales y matorrales, tienen una pendiente media-alta y se asientan sobre una litología de estabilidad media o baja.

4. Conclusiones

La metodología que se propone permite evaluar espacialmente los peligros naturales más habituales en la provincia de Guipúzcoa, a escala comarcal, con los datos disponibles. Como resultado de la metodología se obtiene una serie de mapas útiles en diferentes aspectos de la gestión de los riesgos naturales; mapas que pueden utilizarse tanto en su versión de papel, como en su versión digital para realizar operaciones incluidas en los SIG. Los SIG *raster* han demostrado ser una herramienta muy valiosa en el marco de la evaluación espacial de los peligros naturales.

Avanzando en esta línea, puede estudiarse la posibilidad de automatizar todo el proceso o gran parte del mismo en un SIG polivalente (vectorial y *raster*) y potente. Uno de los puntos problemáticos puede ser la implementación del modelado hidráulico. Además, puede tratarse de implementarse la automatización mencionada en algún programa de entorno amigable que pueda ser utilizado en las diferentes instituciones que tienen competencias en la gestión de los riesgos.

En lo que se refiere a los datos disponibles, puede resultar conveniente actualizar la cartografía de uso de suelo (el mapa de vegetación), por su variabilidad a lo largo de los años y por ser utilizado en la evaluación de los tres peligros considerados.

A la metodología descrita podría añadirse el peligro de erosión hídrica, cuya incidencia es apreciable en la provincia de Guipúzcoa. Existen varias metodologías de fácil implementación en un SIG *raster* que utilizan datos ya empleados en la evaluación de los peligros incluidos en este trabajo.

Finalmente, sobre la base de los modelos de peligro o probabilidad, podría estudiarse la posibilidad de extender el trabajo a la evaluación de la peligrosidad (añadiéndose la severidad de los fenómenos) y el riesgo (añadiéndose la exposición y la vulnerabilidad). De esta forma podrían obtenerse mapas de riesgo para cada fenómeno natural y un mapa de riesgo natural múltiple.

Referencias bibliográficas

Dagorne, A. *et al.* (1994): "Protection des forets contre l'incendie & système d'information géographique. Application à la commune d'Auribeau-sur-Siagne (Alpes-Maritimes)", *Forêt Méditerranéenne*, 15, pp. 409-420.

Etxeberria Ramírez, P., Edeso Fito, J. M. y Brazaola Rojo, A. (2005): "Metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 250-267. ISSN: 1578-5157

- Diputación Foral de Guipúzcoa (1985-91): *Estudio geomorfológico y edafológico de Guipúzcoa*. Estudio inédito.
- Diputación Foral de Guipúzcoa (1985-87): *Estudio de riesgos naturales del territorio histórico de Guipúzcoa*. Estudio inédito.
- Diputación Foral de Gipuzkoa (1988): *Estudio hidráulico de los ríos autonómicos del territorio histórico de Guipúzcoa*. Estudio inédito.
- Ente Vasco de la Energía (1987-92): *Mapa Geológico del País Vasco, a escala 1:25.000*. Madrid, Ente Vasco de la Energía.
- Etxeberria, P. (2004): *Metodología para la creación de cartografía de peligros naturales en Gipuzkoa. Aplicación al valle de Oiartzun*. Tesis doctoral inédita, Universidad del País Vasco.
- González Lastra, J. R. et al. (1980): "Ensayo de un método de predicción y cartografía de riesgos geológicos. Aplicación a los deslizamientos superficiales", en *Actas de la I Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Santander.
- Ibisate, A., Ollero, A. y Ormaetxea, O. (2000): "Las inundaciones en la vertiente cantábrica del País Vasco en los últimos veinte años: principales eventos, consecuencias territoriales y sistemas de prevención", en A.M. Camarasa y J.F. Mateu (Coords.): *Las inundaciones en España en los últimos veinte años. Una perspectiva geográfica*. Alcalá de Henares (Madrid), Universidad de Alcalá, pp. 177-186.
- IKAUR (1999): *Estudio de análisis de precipitaciones intensas, tiempos de concentración y caudales de cálculo de las cuencas del territorio histórico de Gipuzkoa*. Estudio inédito.
- MOPU (1987): *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid, MOPU.
- Remondo, J., Díaz de Terán, J. R. y Zafra, P. (1995): *Análisis de los deslizamientos en Gipuzkoa y su relación con los estudios de riesgos existentes*. Informe para la Diputación Foral de Gipuzkoa inédito.
- Rothermel, R. C. (1972): *A mathematical model for predicting fire spread in wild land fuels*. Ogden, Utah (Estados Unidos), USDA Forest Service.
- Rothermel, R. C. (1983): *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. Ogden, Utah (Estados Unidos), USDA Forest Service.
- Salas, J. y Chuvieco, E. (1992): "¿Dónde arderá el bosque? Previsión de incendios forestales mediante un SIG", en *Actas del I Congreso de los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión territorial*, Madrid, pp. 430-446.
- US Army Corps Of Engineers (2001): *HEC-RAS. Hydraulic Reference Guide*. Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/hydref/index.html>

FIGURAS

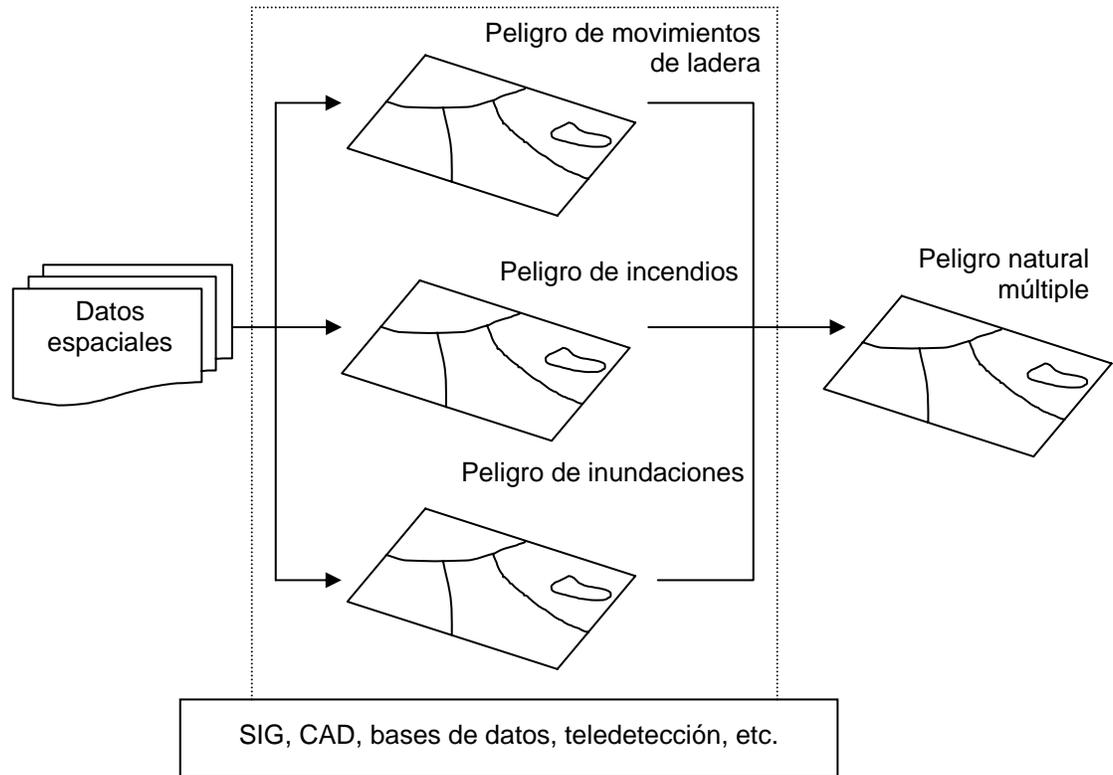


Figura 1. Esquema de la metodología general.

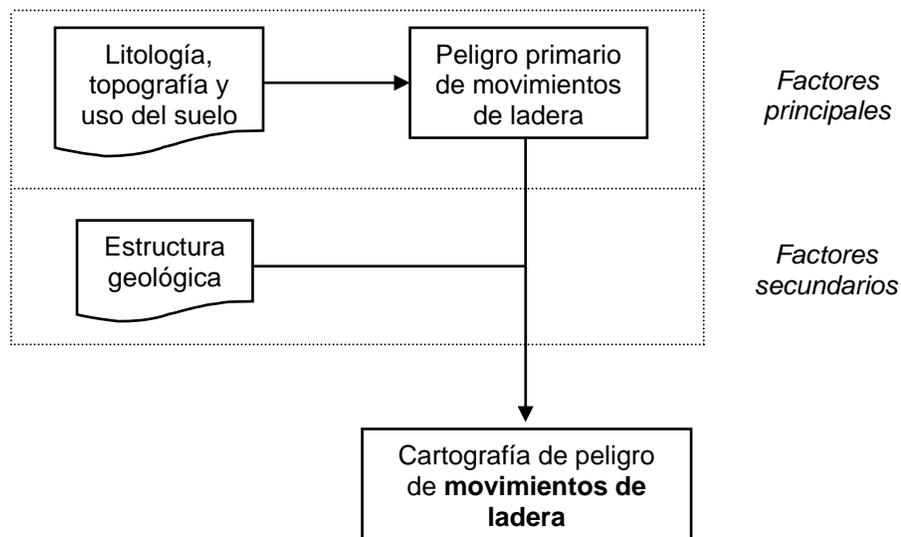


Figura 2. Metodología de la generación del mapa de peligro de movimientos de ladera.

Etxebarria Ramírez, P., Edeso Fito, J. M. y Brazaola Rojo, A. (2005): "Metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 250-267. ISSN: 1578-5157

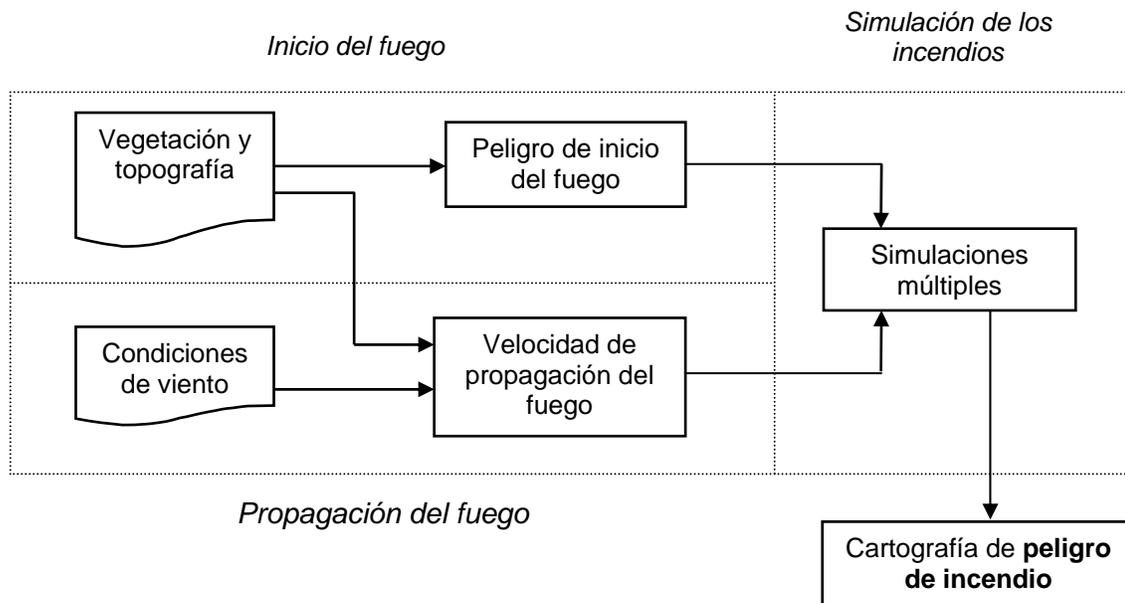


Figura 3. Metodología de la generación del mapa de peligro de incendios.

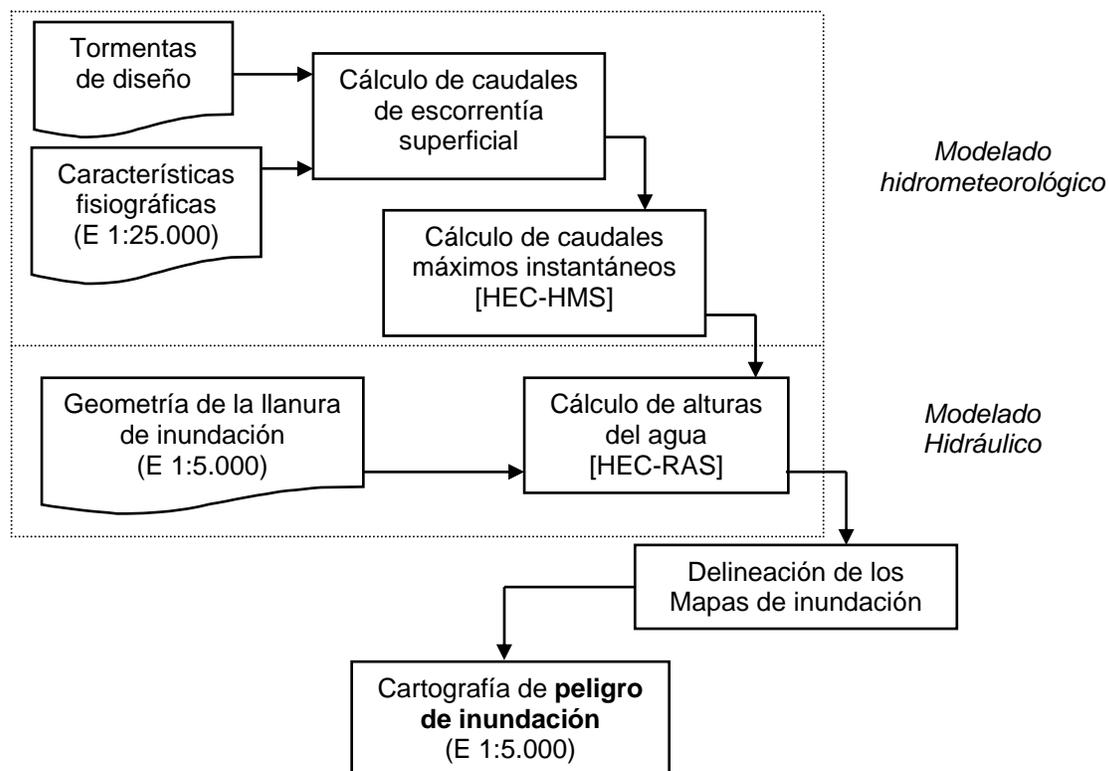


Figura 4. Metodología de la generación del mapa de peligro de inundaciones.

Etxeberria Ramírez, P., Edeso Fito, J. M. y Brazaola Rojo, A. (2005): "Metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n.º 5, p. 250-267. ISSN: 1578-5157

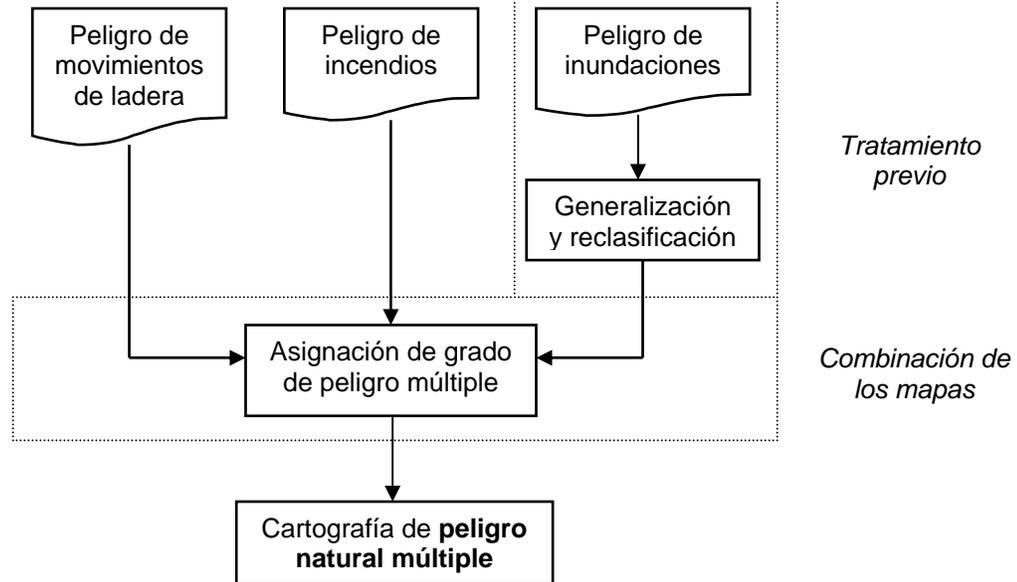


Figura 5. Metodología de la generación del mapa de peligro natural múltiple.



Figura 6. Localización de la provincia de Guipúzcoa y del área de estudio.

Etxeberría Ramírez, P., Edeso Fito, J. M. y Brazaola Rojo, A. (2005): "Metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 250-267. ISSN: 1578-5157

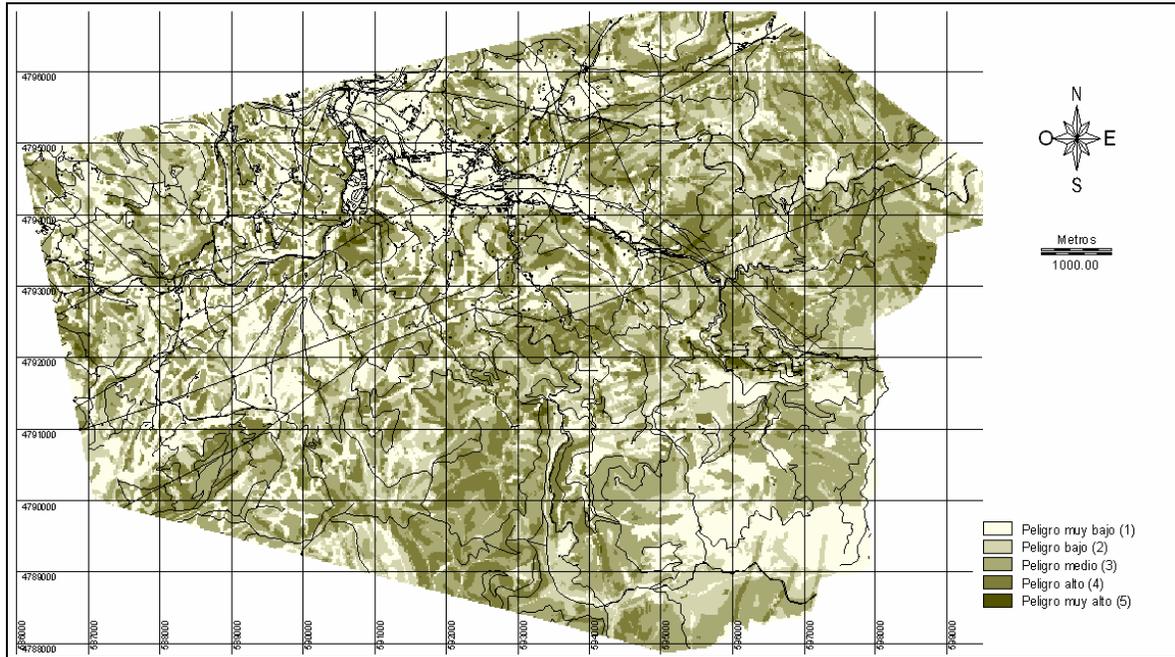


Figura 7. Mapa de peligro de movimientos de ladera del valle de Oiartzun.

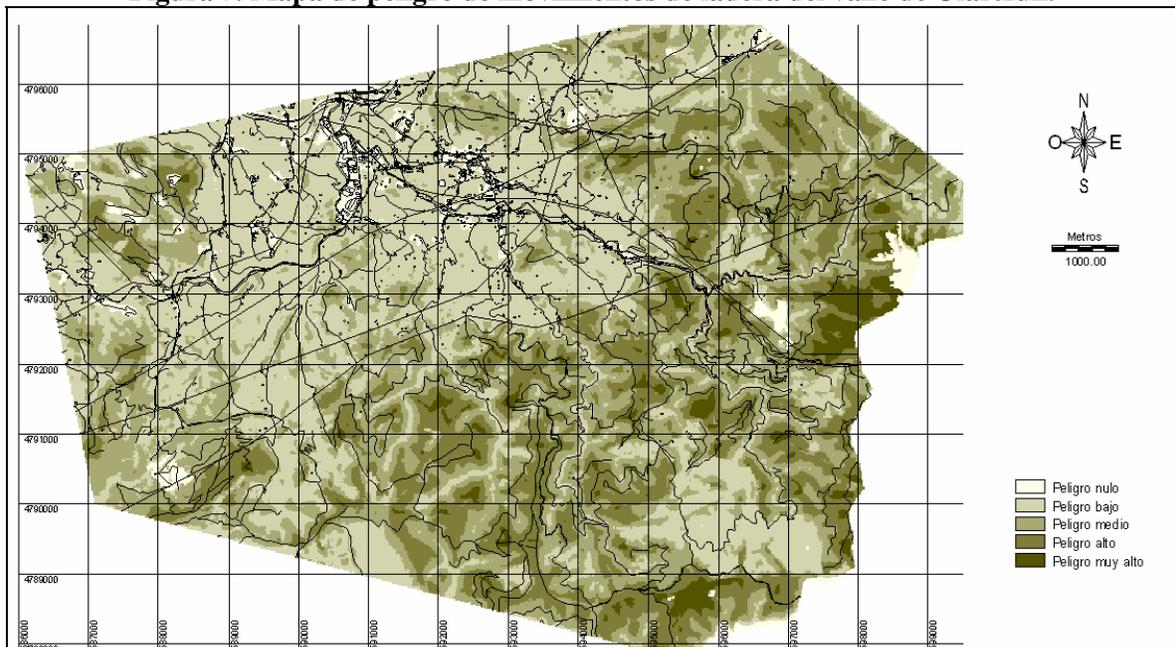


Figura 8. Mapa de peligro de incendios forestales del valle de Oiartzun.

Exteberria Ramírez, P., Edeso Fito, J. M. y Brazaola Rojo, A. (2005): "Metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 250-267. ISSN: 1578-5157



Figura 9. Mapa de peligro de inundaciones del valle de Oiartzun, a escala local (1:5.000).

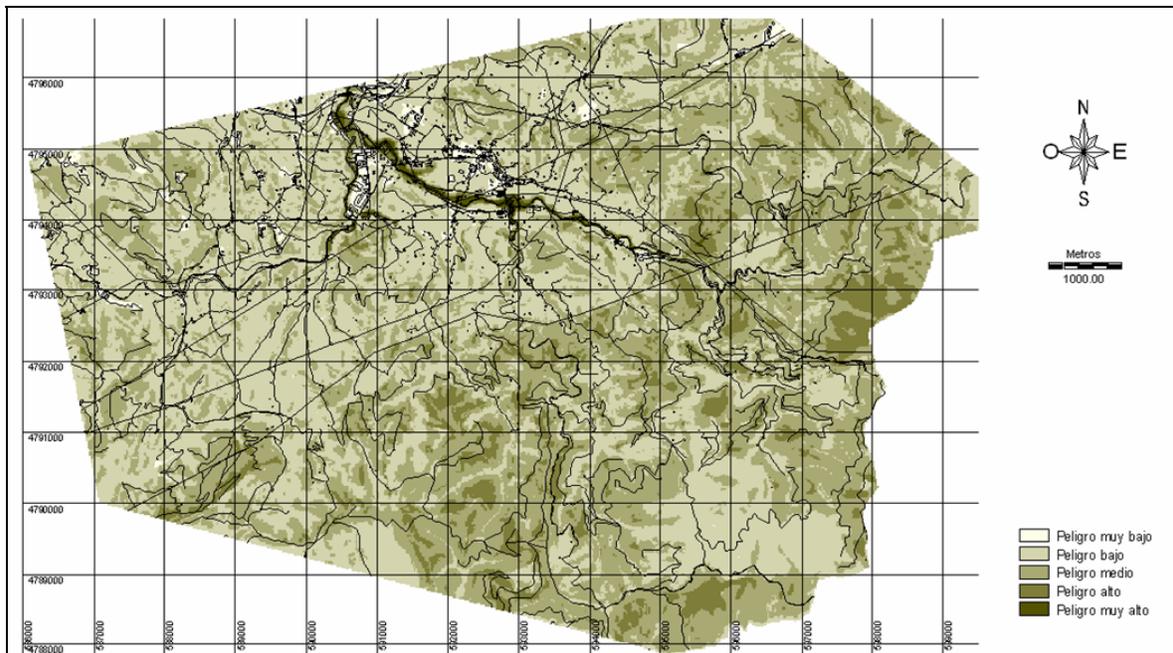


Figura 10. Mapa de peligro natural múltiple del valle de Oiartzun.