



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España



Programa INNPACTO  
del Ministerio de Ciencia  
e Innovación

# HERRAMIENTA AVANZADA PARA GESTIÓN CUANTITATIVA DE RIESGOS GEOLÓGICOS

## RIESGO VOLCÁNICO Y POR INUNDACIONES

### **Equipo de trabajo:**

Luis Laín Huerta (Director del Proyecto)  
José Antonio Fernández Merodo  
Juan Carlos García López-Davalillo  
Mario Hernández Ruiz  
Gerardo Herrera García  
Inés Galindo Jiménez  
María Jesús Mancebo Mancebo  
José María Morales de Francisco  
Celia Rodríguez Delgado  
Roberto Sarro Trigueros

**Madrid 2013**



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España



Programa INNPACTO  
del Ministerio de Ciencia  
e Innovación

# HERRAMIENTA AVANZADA PARA GESTIÓN CUANTITATIVA DE RIESGOS GEOLÓGICOS

## RIESGO VOLCÁNICO

Responsable:  
Inés Galindo Jiménez (IGME)

## Índice

1.- Introducción .....	3
2.- Justificación y objetivos .....	4
3. Descripción de la zona de estudio.....	6
3.1.- Descripción geológica .....	6
Volcanismo de las dorsales .....	7
Volcanismo de relleno de El Golfo .....	8
Emisiones subrecientes.....	11
Volcanismo reciente.....	11
4. – Metodología .....	14
4.1.- Desarrollo de modelo conceptual.....	14
Recopilación y clasificación de información.....	16
Proceso de datos volcánicos .....	16
Modelador de agrupamientos .....	17
Simulación de peligros volcánicos.....	18
Preparación de resultados .....	19
Mapa de riesgo.....	19
4.2.- Construcción de algoritmos de cálculo y relación con software específico .....	20
Proceso de datos volcánicos. ....	20
Modelador de agrupamientos .....	24
Simulación balística de bombas .....	26
Simulación de flujo lavas.....	26
Preparación de resultados .....	28
Mapa de riesgo.....	28
4.3.- Validación del algoritmo de cálculo .....	31
Validación del modelador MOVAM .....	31
Validación del simulador ELAM.....	35
5. Resultados y conclusiones.....	37
6.- Bibliografía .....	38

## 1.- Introducción

El impacto potencial de un peligro natural como el volcanismo depende de la relación que existe entre éste y la población o los bienes que se encuentran expuestos al mismo. Por tanto las consecuencias de una erupción volcánica dependen: en primer lugar, de los fenómenos físicos que se desarrollan durante la misma (ej. coladas de lava, caída de cenizas, coladas de barro, etc.) y de la magnitud, distribución y frecuencia que éstos alcanzan (peligrosidad); y en segundo lugar de la vulnerabilidad de las personas y los bienes frente a estos fenómenos. Aunque conceptualmente resulta simple entender cuáles son los componentes del riesgo, a efectos prácticos su estimación resulta bastante compleja.

A pesar de los esfuerzos dedicados a analizar los fenómenos volcánicos en las últimas décadas, hasta la fecha no se dispone de mapas de riesgos publicados para ninguna región volcánica activa a pesar de que, existe una base metodológica suficiente para llevar a cabo este tipo de estudios, la cual se ha aplicado ya ampliamente para analizar otros riesgos naturales. El motivo fundamental que ha dado lugar a esta situación es la complejidad que reviste el análisis del fenómeno volcánico en comparación con otros peligros y la escasez de datos de que se dispone en muchas ocasiones lo que dificulta la construcción de los modelos de datos.

En general, la modelización física de erupciones volcánicas implica un gran número de procesos acerca de la generación de magma y su ascenso a través de la Litosfera, que requieren el análisis de ecuaciones de continuidad, ecuación de energía y cantidad de movimiento. Esta evidente complejidad plantea diversos problemas como la dificultad en la resolución numérica de ecuaciones de Navier-Stokes, que obliga a simplificaciones en los sistemas de ecuaciones, el elevado coste computacional y la imposibilidad de enlazar todos los sistemas con objeto de darle continuidad al proceso volcánico.

A la complejidad de los modelos y la generación de mapas de peligrosidad, hay que añadir la creación de herramientas que permitan la gestión del riesgo volcánico. Estas herramientas deben manejar la información de los modelos de peligrosidad y relacionarlos con el medio físico, siendo necesario realizar previamente un inventario ambiental y de las infraestructuras. Un aspecto importante para alcanzar el riesgo es conocer la vulnerabilidad de los bienes a cada uno de los peligros volcánicos así como determinar el valor por pérdida de los mismos.

En la actualidad, la enorme dificultad de la evaluación de la vulnerabilidad y el coste de pérdida de los bienes urbanos y naturales, hace inviable la estimación de las pérdidas económicas que puedan producirse por un peligro volcánico. Por lo que actualmente los mapas de riesgo volcánico, están proyectándose como mapas de peligrosidad a la espera que en un futuro, se puedan realizar estimaciones plausibles de la vulnerabilidad y coste de los bienes del medio.

## 2.- Justificación y objetivos

En el presente estudio se realiza un análisis de la peligrosidad volcánica de la isla de El Hierro. En el caso de Canarias y en El Hierro en particular, además de la falta de información sobre las erupciones históricas y sobre el alcance y la caracterización de los fenómenos volcánicos recientes, existe el problema adicional de la estimación de la recurrencia de las erupciones volcánicas debido a una importante escasez de dataciones geocronológicas de erupciones volcánicas. Por lo tanto, la base de la limitación del desarrollo de los mapas de riesgo volcánico está condicionada por la información disponible para la isla de El Hierro.

El riesgo podría definirse (Ortiz, 1996), en términos abstractos, como la expectación de que ciertos eventos produzcan un impacto adverso sobre algunos elementos expuestos. Esta expectación está basada en la racional proyección de experiencias, ocurridas en el pasado, al futuro inmediato. La base metodológica más utilizada para el análisis del riesgo volcánico es la ecuación desarrollada para el Estudio Estadístico de los Peligros Naturales (UNESCO, 1972), que desglosa el riesgo en una función de tres variables: vulnerabilidad, valor y peligrosidad (Figura 1).

La tipología del volcanismo de El Hierro hace que los principales peligros a analizar sean los flujos lávicos, la caída de cenizas y la proyección balística de piroclastos. Sin embargo, para la realización de los mapas de peligrosidad, que constituyen el primer paso en el análisis del riesgo, es necesario tener una base geológica sobre éstos peligros volcánicos que incluyan datos como las áreas cubiertas por las cenizas, las distancias máximas alcanzadas por las bombas o las potencias de las coladas.

La mayoría de estos datos son inexistentes en El Hierro y en la mayoría de las Islas Canarias, lo que limita el análisis de riesgo al emplazamiento de flujos lávicos, ya que es para el único peligro que se dispone de una cartografía que permite conocer su extensión y calcular su volumen, tras la recopilación de algunos datos de potencia, permitiendo construir una base de datos para los modelos numéricos. En el caso del peligro por proyección balística de piroclastos no se dispone de una base de datos que permita conocer su alcance, diámetro de las bombas, etc. Tampoco existen datos de las erupciones históricas canarias que permitan estimar estos parámetros u otros como la velocidad de salida del proyectil. No obstante, aunque los datos no permiten realizar un estudio de peligrosidad por proyección balística, se ha desarrollado un algoritmo para permitir el análisis de riesgo en el futuro. En cambio, para la caída de cenizas, aun teniendo mayor afección al territorio, no se poseen datos sobre su extensión en el pasado ni datos granulométricos y la escala de representación escaparía del ámbito insular. Por todo ello, se ha tenido que limitar el análisis de peligrosidad al estudio de la peligrosidad por invasión de flujos lávicos.

En este Módulo se han desarrollado la metodología y los algoritmos que permiten el análisis del riesgo volcánico en El Hierro mediante el cálculo de la peligrosidad de los flujos

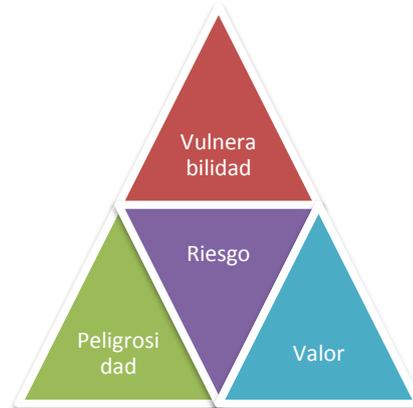


Figura 1. Relación del riesgo con los tres factores que lo conforman.

lávicos y la estimación de la vulnerabilidad de las coladas. La cartografía resultante podrá ser utilizada para el cálculo del riesgo de flujos lávicos una vez se disponga de la cartografía del coste de los bienes.

### 3. Descripción de la zona de estudio

La zona piloto de estudio es la totalidad de la isla de El Hierro (Figura 2) que es la más occidental y meridional de las Islas Canarias (España). Pertenece a la provincia de Santa Cruz de Tenerife. Se halla surcada de oeste a este por una gran línea de relieve con numerosos volcanes y las zonas costeras están constituidas por malpaíses y abruptos acantilados que llegan hasta los 1.000 metros de altura.

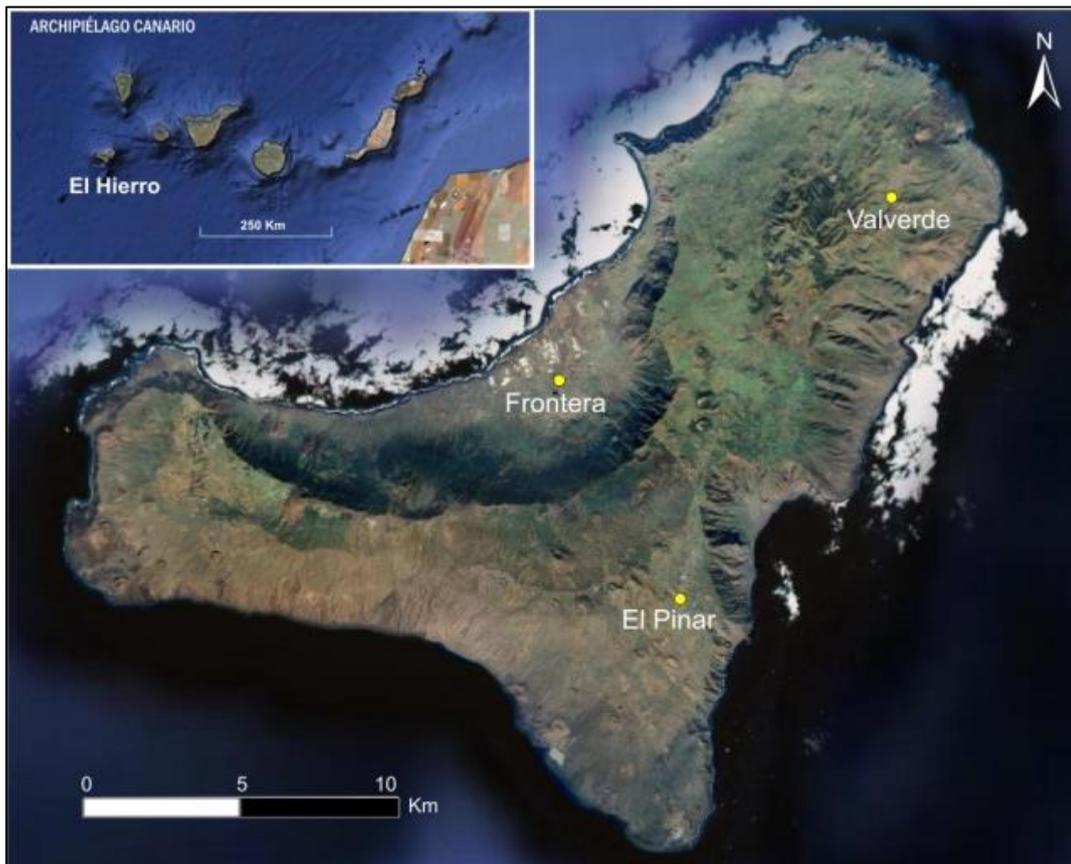


Figura 2. Foto satélite del archipiélago canario y de la isla de El Hierro.

#### 3.1.- Descripción geológica

Geológicamente, El Hierro es la isla con mayor densidad de centros de emisión en relación a su superficie del archipiélago canario y, como puso de manifiesto la erupción submarina que se produjo en el año 2011 en el sur de la isla a 3,5 km de la localidad de La Restinga, es una isla volcánicamente activa.

El primer estudio detallado sobre la volcanología de la isla fue plasmado en la Tesis Doctoral de Pellicer (1975), cuyos resultados geoquímicos y petrológicos serían posteriormente publicados por la misma autora (Pellicer, 1977, 1979, 1980). Trabajos específicos sobre deslizamientos, depósitos submarinos y volcanismo submarino han sido publicados por Holcomb y Searle (1991), Masson (1996), Urgeles *et al.* (1997), Carracedo *et al.*, (1999), Gee *et al.* (2001 a, b), Abratis *et al.* (2002) y Masson *et al.* (2002)

Con el fin de estudiar la historia volcánica de El Hierro, se han analizado las distintas divisiones cronoestratigráficas publicadas (Tabla 1). De todas las clasificaciones, las sucesiones

estratigráficas propuestas por Balcells y Gómez (1997) y Carracedo *et al.*, (1997) son las más completas y de mejor calidad, ya que están basadas tanto en criterios de campo, como geocronológicos, paleomagnéticos y paleontológicos. En la Tabla 1 se observa que el volcanismo reciente de la isla se engloba dentro de una unidad cuyo límite inferior se establece en algún punto entre los 176 ka y los 158 ka (Guillou *et al.*, 1996) y cuyo límite superior se prolonga hasta el Holoceno. Esta unidad ha sido denominada como “Volcanismo de las Dorsales” (Ballcells y Gómez, 1997), y, dentro de ella se incluyen las emisiones de las dorsales propiamente dichas, las emisiones de relleno de la depresión de El Golfo, y las emisiones recientes y subrecientes. Se puede considerar que esta unidad es parcialmente equivalente a la Serie Intermedia de Pellicer (1977) y Fuster *et al.*, (1993), y al Volcanismo de Rift de Guillou *et al.* (1996) y Carracedo *et al.* (1997).

El mapa geológico simplificado de El Hierro se muestra en la Figura 3. La descripción de los materiales que conforman el volcanismo de las dorsales y el volcanismo más reciente de la isla se realiza a continuación siguiendo los episodios que la constituyen.

### Volcanismo de las dorsales

El volcanismo de las dorsales incluye todos los depósitos de erupciones ocurridas sobre los ejes estructurales de la isla, de direcciones NE-SO, E-O y N-S. Es en estas dorsales donde se ha concentrado la actividad eruptiva en los últimos 158.000 años. A lo largo del tiempo la sucesión de erupciones en estos tres ejes ha dado lugar al crecimiento en altura de la isla y a la ampliación de la misma por la llegada de materiales volcánicos al mar.

Las dorsales están representadas en el subsuelo por una gran densidad de intrusiones, que en algunos casos alcanzan la superficie originando conos piroclásticos, que en superficie constituyen el elemento volcánico más característico de estas dorsales. Esta unidad se caracteriza por la presencia mayoritaria de coladas de tipo *aa*, de composición basáltica-traquibasáltica situadas sobre los apilamientos del Edificio El Golfo-Las Playas. Estas coladas presentan disyunción columnar y espesores individuales superiores a los 2 m de espesor, que en conjunto pueden alcanzar los 100 m de potencia en determinados puntos de la isla. Además de la emisión de coladas de lava este episodio se caracteriza por la generación de edificios piroclásticos, que hoy en día se encuentran relativamente bien conservados y se agrupan formando alineaciones estructurales. Estos edificios están formados, en su mayoría, por piroclastos de tamaño lapilli, alternando con niveles de escorias y bombas. Todos estos materiales son de composición basáltica.

Durante este episodio se formaron varios edificios piroclásticos de tipo mixto “Hoya de Fileba y Edificio Venticota”, en los que se produjo la interacción de agua con magma dando lugar a edificios con secuencias de piroclastos de caída y depósitos de oleadas piroclásticas (hidromagmáticos). Otros afloramientos de tipo hidromagmático se reconocen en la zona de Venticota, al SE de la localidad de Taibique, aunque no han podido ser asociados a ningún centro de emisión; y en la carretera entre la Montaña de la Virgen y la de Tembárgena, pudiendo estar el centro de emisión de estos últimos relacionado con la Montaña de los Humilladeros.

Los únicos depósitos piroclásticos de composición sálica de la isla fueron emitidos durante este periodo y localizados en lo alto y alrededores del vértice Malpaso (Pellicer, 1977). Se trata de niveles decimétricos de cineritas de composición traquítica, que se encuentran

laminados y entre ellos aparecen fragmentos de pómez de tamaño lapilli muy vesiculares. El origen de los mismos es incierto atribuyéndolo Pellicer (1977) a un episodio explosivo posterior al volcán Tanganasoga. Sin embargo, Balcells y Gómez (1997), proponen que el volcán Tanganasoga es posterior a la explosión que originó estos depósitos.

Como aspectos morfológicos destacados dentro de esta etapa de volcanismo, es frecuente observar "levees" o paredes laterales de estos lóbulos en la zona SO de la isla (El Julan), además de numerosos tubos volcánicos repartidos por toda la extensión de la isla.

### Volcanismo de relleno de El Golfo

El volcanismo de relleno de El Golfo incluye aquellas emisiones volcánicas que han tenido lugar en el ámbito del valle de El Golfo, originados como consecuencia de la fuerte descompresión litostática que supuso el derrumbamiento de esta parte del edificio insular y la consiguiente formación del valle (Balcells y Gómez, 1997). Estas nuevas emisiones han contribuido no sólo a rellenar la depresión sino también a ganar terreno al mar.

Este volcanismo, predominantemente efusivo, generó emisiones de lava que fluyeron hacia la costa, provocando su avance en más de 3 km (Navarro y Soler, 1995). Las coladas presentan morfologías *aa*, siendo muy escoriáceas a techo y muro, y más masivas y, con cierta vesicularidad en su interior. Los espesores de estas lavas varían generalmente de 2 a 6 m, como se puede observar en las zonas más próximas a la costa. Algunas de estas coladas presentan un fuerte buzamiento hacia el mar. Las lavas de tipo *pahoehoe* son menos frecuentes pero se observan en la carretera de Tigaday a Sabinosa. Se trata de coladas de poca potencia (2 a 20 cm).

Composicionalmente, todas las coladas son basálticas olivínopiroxénicas. Las emisiones debieron sucederse en un período de tiempo relativamente rápido, pues entre ellos no se observan grandes discordancias ni fuertes contrastes morfológicos. Uno de los episodios finales del relleno lávico de El Golfo se corresponde con el edificio Tanganasoga, localizado en la mitad occidental del valle de El Golfo, que según Pellicer (1979), tiene una edad de unos 6,7 ka. De esta forma, se puede considerar la erupción del Tanganasoga como contemporánea a las de edad reciente del resto de la isla, aunque en este caso, confinada al valle de El Golfo. En cuanto a la formación de edificios piroclásticos, la mayoría de los centros de emisión se localizan en las escarpadas laderas de la cabecera del valle, próximos o dentro de los ejes estructurales. Los centros de emisión son de reducido tamaño y están relativamente mal conservados, formando conos de piroclastos constituidos por lapilli y escorias rojizas de composición basáltica, que no alcanzaron un gran desarrollo morfológico.

Edad	Dupuy de Lome y Martín de La Barcena 1964	Hausen 1964	Coello 1971	Pellicer 1977	Fuster <i>et al.</i> , 1993	Guillou <i>et al.</i> , 1996 Carracedo <i>et al.</i> , 1997	Balcells <i>et al.</i> , 1997								
2.500 años <sup>4</sup>		Volcanes adventicios recientes con malpaisés y arenas negras	Serie volcánica superior o moderna	Serie reciente 4000 AÑOS A.C	Serie reciente	VOLCANISMO DE RIFT	Platform forming eruptions	EMISIONES RECIENTES							
¿? 11,7 ka							EMISIONES SUBRECIENTES								
158 ka <sup>2</sup>		PRIMERA GENERACIÓN DE VOLCANES ADVENTICIOS	SERIE VOLCÁNICA MEDIA	SERIE INTERMEDIA	SERIE INTERMEDIA	VOLCANISMO DE RIFT	Cliff-forming eruptions	VOLCANISMO DE RELLENO DE EL GOLFO							
176 ka <sup>2</sup>								Deslizamiento el Golfo	VOLCANISMO DE LAS DORSALES	Deslizamiento de El Julán					
545±11 - 442±5 ka <sup>3</sup>	SERIE BASÁLTICA PRIMITIVA	SERIE MESÉTICA (BASALTOS TABULARES)	SERIE VOLCÁNICA INFERIOR O ANTÍGUA	SERIE ANTÍGUA	SERIE ANTÍGUA	EDIFICIO EL GOLFO	EDIFICIO EL GOLFO	EDIFICIO EL GOLFO-LAS PLAYAS	Tramo Medio-Superior						
500 ka <sup>2</sup>										Tramo Inferior					
1.04±0.01 -										Deslizamiento (Post. Tiñor)					
0.88±0.01Ma <sup>3</sup>										EDIFICIO VOLCÁNICO TIÑOR	Lavas ricas en xenolitos	EDIFICIO TIÑOR	Grupo de Volcanes Ventejís		
1.05±0.02 - 1.04±0.01Ma <sup>3</sup>														Plateau San Andrés	Tramo medio-"Tabular"
1.12±0.02 - 1.05±0.02 Ma <sup>3</sup>														Tramo de coladas con fuerte buzamiento	Tramo Inferior

Tabla 1. Equivalencia Series volcánicas de la isla de El Hierro. Cuadro Volcano-estratigráfico. Dataciones según: <sup>2</sup> Guillou *et al.*, 1996; <sup>3</sup> Day *et al.*, 1997; <sup>4</sup> Carracedo *et al.*, 2001.

## GEOLOGÍA SIMPLIFICADA EL HIERRO

### LEYENDA

#### FORMACIONES SEDIMENTARIAS RECIENTES

#### VOLCANISMO DE LAS DORSALES, ERUPCIONES SUBRECIENTES Y RECIENTES

- Coladas y piroclastos basálticos, basaníticos y foidíticos
- Depósitos sedimentarios
- Coladas y piroclastos traquibasálticos, basaníticos y tefríticos
- Depósitos hidromagmáticos
- Depósitos sedimentarios

#### VOLCANISMO DE RELLENO DE EL GOLFO, ERUPCIONES SUBRECIENTES Y RECIENTES

- Lavas y piroclastos tefríticos y basaníticos
- Depósitos sedimentarios

#### EDIFICIO EL GOLFO-LAS PLAYAS

- Coladas y piroclastos traquibasálticos, basaníticos y tefríticos
- Cuerpos intrusivos básicos
- Piroclastos hidromagmáticos
- Coladas basálticas, traquibasálticas y tefríticas

#### EDIFICIO TIÑOR

- Conos de tefra basálticos con intercalaciones hidromagmáticas
- Coladas y piroclastos basálticos, basaníticos y tefríticos
- Cuerpos intrusivos básicos

#### SÍMBOLOS

- |   |   |
|---|---|
| <span style="color: red;">+</span> Centro de emisión sin cráter           | <span style="color: red;">---</span> Borde de cráter                            |
| <span style="color: red;">v</span> Cantera inactiva                       | <span style="color: red;">---</span> Contacto entre coladas                     |
| <span style="color: red;">^</span> Cantera activa                         | <span style="color: red;">---</span> Falla                                      |
| <span style="color: red;"> </span> Estratificación y buzamiento           | <span style="color: red;">---</span> Contacto intrusivo                         |
| <span style="color: red;">---</span> Contacto discordante                 | <span style="color: red;">---</span> Borde de tubo volcánico                    |
| <span style="color: red;">---</span> Masas de agua                        | <span style="color: red;">---</span> Falla normal con indicación de hundimiento |
| <span style="color: red;">→</span> Dirección de flujo de colada volcánica | <span style="color: red;">---</span> Falla supuesta (oculta)                    |
|   | <span style="color: red;">---</span> Frente de deslizamiento                    |
|   | <span style="color: red;">---</span> Zonas de Rift                              |

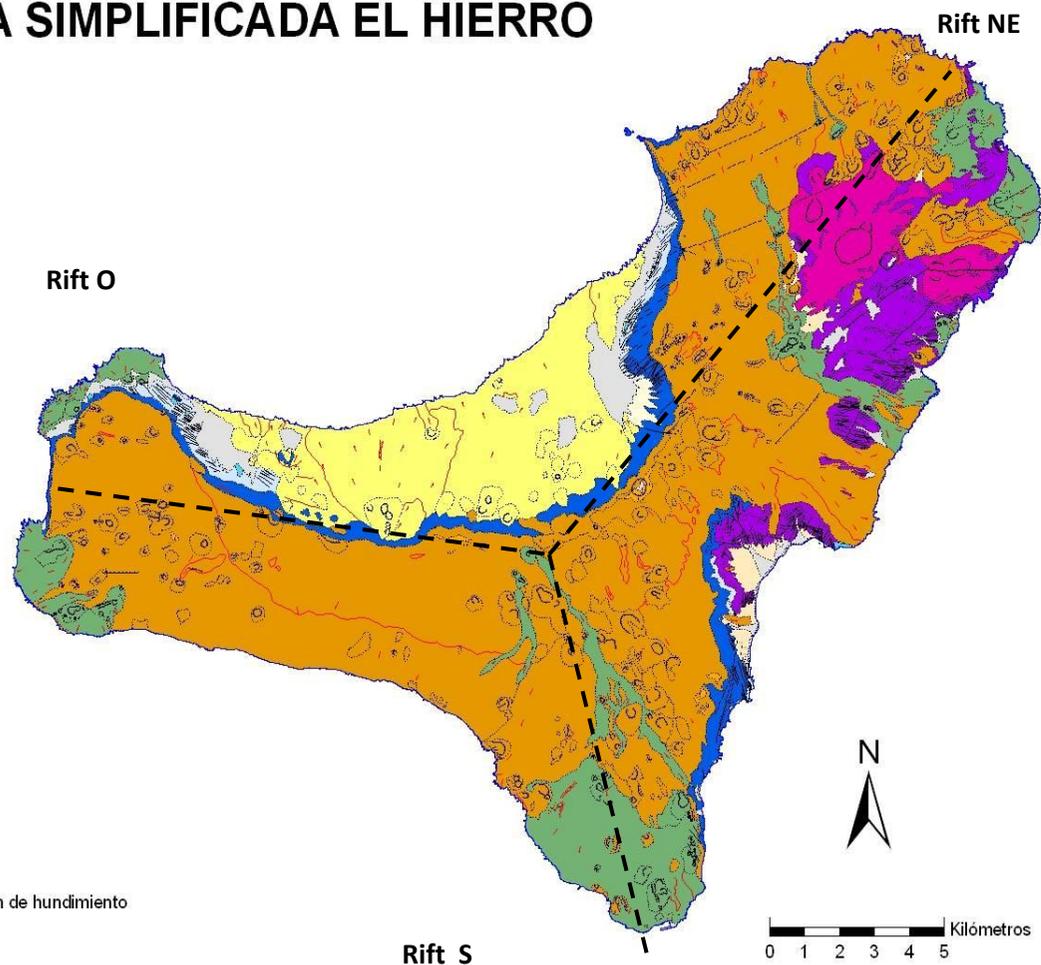


Figura 3. Mapa geológico simplificado de la isla de El Hierro (GEODE, IGME).

## Emisiones subrecientes

La actividad volcánica asociada al sistema de dorsales o ejes estructurales se ha manifestado incluso hasta épocas subrecientes y recientes, con emisiones más localizadas y en la mayoría de los casos perfectamente distinguibles del resto. Los edificios a los que se les asignan una edad subreciente, por tener un grado de conservación y un resalte morfológico intermedio entre las erupciones recientes (holocenas) y los materiales circundantes, se reparten principalmente por toda la isla a excepción de la zona más occidental, donde se reconocen las erupciones más recientes.

Los edificios considerados son algunos conos de tefra con coladas asociadas como el grupo de Montaña Cueva del Guanche y la Montaña del Tomillar. Las coladas del edificio de La Caleta, el edificio piroclástico inmediato a la Playa del Varadero y Playa Tijeretas y las coladas del barranco de Honduras, son también ejemplos del volcanismo subreciente en El Hierro. En todos los casos las emisiones lávicas ganaron terreno al mar. Las coladas de los edificios Las Tabladas-Las Montañetas, las coladas de Montaña Entremontañas, junto con los de Las Charquillas y Montaña de la Fara también corresponden al volcanismo subreciente.

Se han asignado a esta unidad unas coladas relativamente bien conservadas procedentes del Edificio Montaña del Tomillar que llegan hasta el acantilado de la Playa del Pozo. En su recorrido, de unos 7,5 km de longitud, se observa que bordean a los edificios de Tembárgena, Aguachicho, Montaña Cerraja y Montaña de la Lajura. Por tanto son posteriores a los edificios del volcanismo de las dorsales. Sin embargo, su estado de conservación es peor que el de los malpaíses de La Restinga, por lo que podrían asignarse a unos primeros episodios de la Serie Reciente, denominados genéricamente como Serie Subreciente (Balcells y Gómez, 1997).

## Volcanismo reciente

El volcanismo reciente se caracteriza por una actividad estromboliana con emisión de coladas basálticas y formación de conos piroclásticos según directrices fisurales bien definidas, principalmente en las zonas más cercanas a las costas de la isla. Se describen a continuación los principales edificios y coladas asociadas a la actividad más reciente de la isla.

- El edificio La Cancela o Volcán del Tesoro está constituido por lapillis, escorias y bombas basálticas, y presenta una extensa área cubierta por lapillis de dispersión de color negro. Sus lavas, que desbordan el "paleoacantilado" del Edificio Tiñor y cubren la plataforma costera de Tamaduste, son basaltos afaníticos, que dan lugar a un malpaís relativamente bien conservado. Las coladas han producido una superficie de avance sobre la línea de costa, desde la Playa de Adentro hasta el Río de Tamaduste. La población de mismo nombre se asienta sobre estas coladas.

- Asimismo las coladas del edificio Montaña de Aguarijo se han canalizado por un estrecho barranco y desembocan en la Bahía de las Calcosas dando lugar también a una pequeña plataforma costera.

- El edificio Barranco de las Martas es un pequeño centro de emisión de escorias y "spatter" cuyas coladas basálticas se han canalizado por el barranco del mismo nombre.

- Montaña Chamuscada es un edificio compuesto, constituido por lapillis, escorias y bombas de composición basáltica. Las coladas que proceden del cráter NE rodean los relieves del edificio Tiñor y se descuelgan por la zona de la Hoya del Horno hasta la Punta de Timijiraque. Datos radiométricos ( $^{14}\text{C}$ ) aportados por Carracedo *et al.* (2001), dan una edad de 2.500 años para este edificio. Estas emisiones proceden de un salidero o pequeño hornito situado en el sector NE de Montaña Chamuscada, conocido como Volcán Soleimán o Cuevas de Soleimán.

En el sur de la isla de El Hierro, en el rift de dirección N-S, aparecen los edificios de Roque Grande, Roque Pequeño, Hoya de María y Montañas de Julán. Todos estos edificios presentan un buen estado de conservación. En las coladas del conjunto de estos edificios son frecuentes las estructuras cordadas y lavas en tripas que reciben el nombre local de “lajiales”. Composicionalmente se trata de basaltos olivínicos y olivínico-piroxénicos algo vesiculares de tipo *pahoehoe* con espesores individuales de coladas bastante reducidos (0,5-1 m). También se observan coladas de tipo *aa* de similar composición que se caracterizan por presentar zonas escoriáceas a techo y muro y espesores de orden métrico. En algunos casos se observan depósitos piroclásticos en la base de estas coladas que proceden de la propia erupción, o de un pulso inmediatamente anterior. Son habituales los túmulos o hinchamientos de la superficie lávica, así como la presencia de tubos volcánicos y cavernas parcialmente hundidas conocidos como jameos o “juaclos” en la isla de El Hierro.

El edificio de Roque Grande está constituido mayoritariamente por *spatter* de composición basáltica y ha sufrido algunos colapsos que han fragmentado el edificio.

El edificio de las Montañas de Julán está constituido por lapillis, escorias y bombas de composición basáltica.

El edificio Hoya de María se encuentra situado en las proximidades de la Playa del Pozo. Las coladas son de composición basáltica.

Los edificios volcánicos recientes representados en la zona oeste de la isla son los siguientes:

- La Montaña de las Calcosas, que es un edificio piroclástico formado por depósitos de lapilli, escorias, bloques y bombas. Desde este centro de emisión surgieron coladas de lava que cayeron en cascada hacia el mar, formando una extensa plataforma costera o "isla baja", que aumentó la superficie insular. Son coladas *aa*, muy escoriáceas en superficie y en la base, masivas y coherentes en su parte interior, donde exhiben cierto diaclasado columnar. El espesor medio de cada unidad lávica es de 1 a 3 m.

- La Montaña de Orchilla, que constituye junto con otros edificios menores (Montaña Quemada y Montañita Negra), un conjunto volcánico cuyas coladas de lava alcanzaron la línea de costa. La Montaña de Orchilla es un gran edificio constituido por lapilli, escorias, bloques y bombas, relativamente consolidadas y de composición basáltica. Presenta dos cráteres principales, al que se le asocian otras bocas o salideros menores localizados en su perímetro y que en conjunto se disponen alineados según una directriz N80ºE. Montaña Negra, situado en las laderas al norte del anterior edificio, en la Hoya del Faro, es una fisura eruptiva, con una orientación paralela a la de los cráteres de Orchilla. De ella surgieron lavas *pahoehoe*, que se canalizaron hasta el mar rodeando a la Montaña de Orchilla.

- Lomo Negro que ha sido considerado por algunos autores como una erupción histórica. En el año 1793 tuvieron lugar una serie de fenómenos sísmicos, en la zona del Verodal, que fueron recogidos en numerosos documentos de la época. En ninguno de estos documentos se hizo referencia a la existencia de una erupción volcánica. Algunos autores como Bravo (1968), asociaron estos terremotos con una posible erupción volcánica submarina en las inmediaciones de El Golfo. Posteriormente, Hernández-Pacheco (1982), realizó un detallado estudio geológico y volcanológico de la zona de la Hoya del Verodal, localizando el posible punto de emisión que podría haber estado relacionado con los terremotos de 1793, que fue denominado como Lomo Negro. Dicho autor aportó una serie de pruebas y confirmó la erupción con una datación  $^{14}\text{C}$ , en la que obtuvo una edad de 1800 años (d.J.C.). Otros autores ponen en duda la existencia de dicha erupción (Romero, 1991).

La zona de la posible erupción está formada por lavas basálticas de morfologías *aa*, con grandes bloques escoriáceos, vesiculares y a veces poco cohesionadas entre sí. Existen también morfologías *pahoehoe* con características superficies cordadas. Se trata de lavas porfídicas con abundantes fenocristales de olivino y piroxeno. Las coladas de lava se abrieron en abanico desde el salidero principal y se emplazaron sobre otro malpaís reciente anterior. La superficie cubierta por la lava es del orden de 0,36 km<sup>2</sup>. El centro de emisión principal de estas lavas es una fisura eruptiva de orientación N30°E, situada al pie de un edificio de tefra anterior, junto al cruce triple de carreteras a la playa del Verodal, la Dehesa y Sabinosa.

## 4. – Metodología

La metodología seguida en el módulo de riesgo volcánico comprende cuatro fases: (1) el desarrollo del modelo conceptual, donde se ha trazado el esquema conceptual de gestión de la información disponible, su tratamiento y el desarrollo de modelos numéricos para la consecución de los mapas de riesgos; (2) la construcción de algoritmos de cálculo, que ha conducido al tratamiento de la información y a la elaboración de los modelos numéricos; (3) la validación de los algoritmos, durante la que se ha comprobado la fiabilidad de los algoritmos desarrollados; y (4) la elaboración de los mapas cuantificados de peligrosidad volcánica que permitan la elaboración de mapas de riesgo.

### 4.1.- Desarrollo de modelo conceptual

El modelo conceptual se ha confeccionado mediante una organización abstracta de los datos disponibles, estableciendo una relación entre ellos para suministrar la información a distintos modelos numéricos. Para obtener los mapas de riesgo, los mapas de peligrosidad se deben relacionar en el espacio con las valoraciones económicas y la vulnerabilidad de los bienes intersectando los datos entre sí. La secuencia de etapas del modelo conceptual (Figura 4) son las siguientes:

- Recopilación y clasificación de información.
- Proceso de datos volcánicos.
- Simulación de agrupamientos.
- Simulación de peligros volcánicos
- Preparación de resultados.
- Mapa de riesgo.

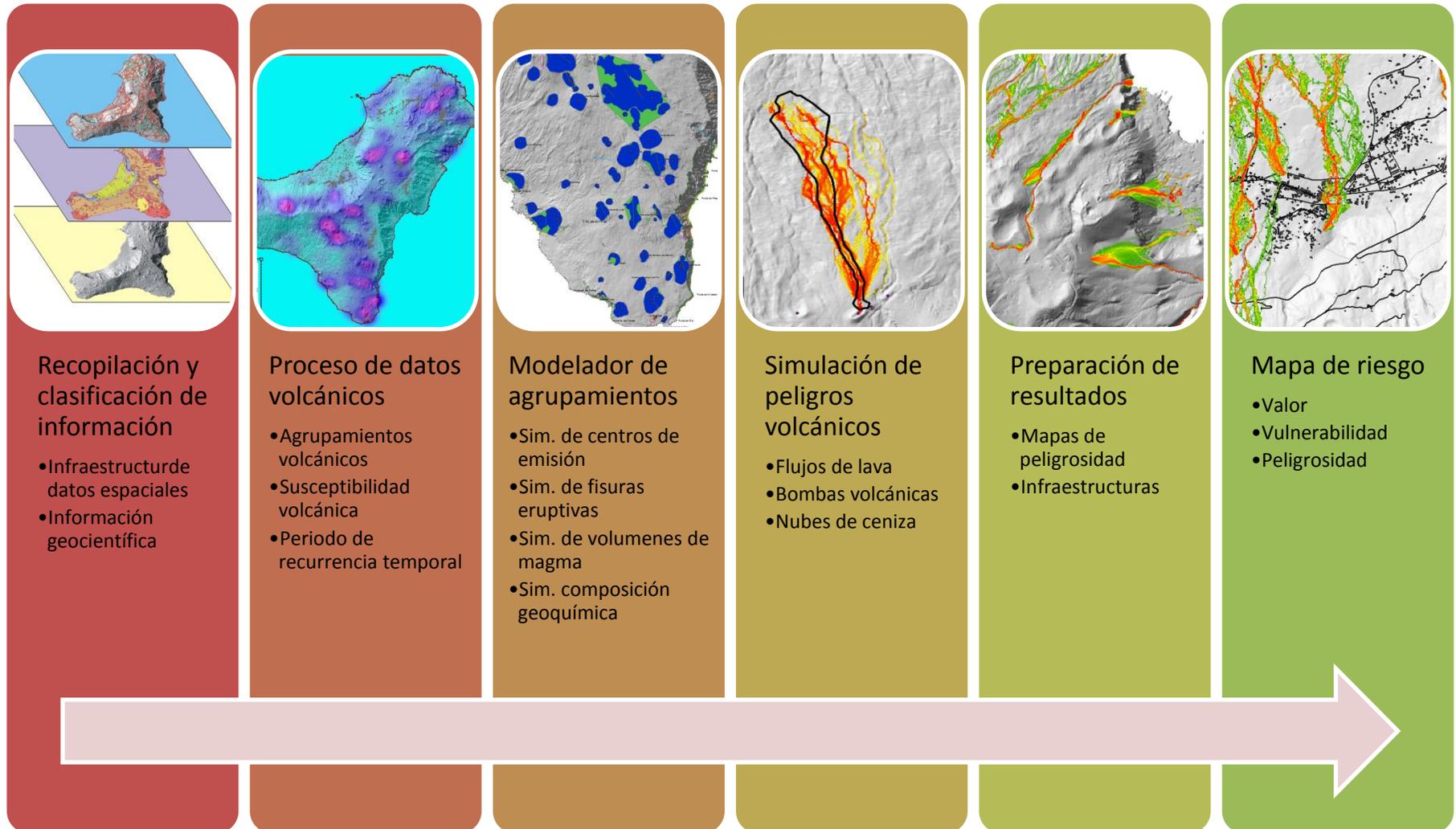


Figura 4. Secuencia de etapas del modelo conceptual de riesgo volcánico.

## Recopilación y clasificación de información

En esta etapa se ha buscado toda la información relacionada con Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) y con cartografía geológica para la isla de El Hierro así como publicaciones científicas y proyectos relacionados con riesgo volcánico.

La información de IDE necesaria para el proyecto incluye: infraestructuras urbanas (edificación, energéticas y transporte), ortofotografías y modelos digitales de elevación para la isla de El Hierro.

La cartografía geológica disponible es la confeccionada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), cartografía geológica continua (GEODE) y los mapas geomorfológicos. Además, se ha compendiado la información bibliográfica y de proyectos concernientes al riesgo volcánico.

La información cartográfica hallada en soporte papel, como han sido las fotografías de vuelos aéreos, se ha transformado en la medida de lo posible a los diversos formatos digitales cartográficos disponibles correctamente georreferenciados. Aquella documentación no cartográfica (bibliografía, proyectos, informes, etc.) se ha almacenado en una base de datos. Los datos espaciales (IDE) se proporcionan en formato digital, en ficheros de tipo *raster* y/o vectoriales que pueden ser exportados fácilmente a un Sistema de Información Geográfica tipo ArcGis® o similar. La cartografía geológica y geomorfológica ha sido almacenada en formato vectorial.

## Proceso de datos volcánicos

Los datos recopilados han sido organizados y procesados como datos de entrada para los distintos modelos de simulación. El procesado y síntesis de los datos queda dividido en tres partes:

- Agrupamientos volcánicos.
- Susceptibilidad volcánica.
- Periodo de recurrencia temporal.

## Agrupamientos volcánicos

Los agrupamientos y análisis *cluster* son técnicas utilizadas en minería de datos para el análisis de un conjunto de datos y su clasificación. Cuando el número de datos es elevado los *cluster* cobran un papel relevante. El *cluster* o agrupamiento podemos definirlo como una clase a la que pertenecen un grupo de miembros. En vulcanología, se han utilizado con cierto éxito algoritmos de *cluster* (Bertino *et al.*, 2006) para separar poblaciones de centros de emisión siguiendo criterios de cercanía.

En línea con este concepto, se ha definido el «agrupamiento volcánico» como un conjunto de elementos volcánicos formados en el mismo evento volcánico y que tienen una relación espacio – temporal.

Los campos volcánicos monogenéticos están conformados por numerosos centros de emisión relacionados espacio-temporalmente por lo que es necesario crear un algoritmo que sea capaz de agruparlos. Como *elementos volcánicos* que son susceptibles de ser agrupados se han seleccionado las fisuras eruptivas y los centros de emisión. La sencillez geométrica de estos elementos (puntos y segmentos), los hace idóneos para el análisis y definición de los agrupamientos volcánicos.

Con estos elementos, los agrupamientos volcánicos se han establecido mediante criterio experto y se ha construido un algoritmo que establece la relación entre los centros de emisión y las fisuras eruptivas. Los resultados son finalmente almacenados en ficheros geoespaciales de tipo *shape*.

## Susceptibilidad volcánica

Los estudios sobre la probabilidad volcánica en las Islas Canarias son escasos, pero son esenciales si se quiere establecer la localización de las erupciones futuras. En el cálculo de la

peligrosidad, una de las variables necesarias es la determinación espacial de la zona más probable de apertura de nuevos centros de emisión (susceptibilidad volcánica). La distribución espacial en la mayoría de los volcanes en campos monogenéticos es aparentemente aleatoria. Sin embargo, se conoce que la mayoría de erupciones aparecen formando agrupamientos cuya distribución está condicionada por campos de esfuerzos locales-regionales (Becerril *et al.*, 2013).

Los modelos clásicos para la determinación de la probabilidad espacial están basados en métodos estadísticos no paramétricos a través de funciones *kernel* para la elaboración de mapas de densidad de probabilidad conocidos como *funciones de probabilidad de densidad* (FPD). Los métodos clásicos basados en *kernel* para describir la distancia de los volcanes cercanos más usadas son: *Epanechnikov*, *Cauchy*, y *Gaussian kernel* (Connor y Hill, 1995; Condit y Connor, 1996). La elección de una u otra función dependerá de las características del campo volcánico a estudiar (Martin *et al.*, 2004). Recientemente, se ha desarrollado una metodología con un cambio de la función *kernel* de tipo Gauss a función elíptica (Connor *et al.*, 2012) con una mejor adaptación estadística a la distribución espacial de los campos volcánicos.

A la vista de los actuales modelos de probabilidad espacial, se ha desarrollado un algoritmo que genera un modelo de susceptibilidad volcánica basado en una función de *kernel* de tipo elíptica para la predicción espacial de la apertura de los centros de emisión. Este algoritmo se adapta a la distribución espacial de los *elementos volcánicos* (fisuras y centros de emisión) y proporciona los resultados a ficheros que pueden ser almacenados en formato *ASCII Grid*.

### **Periodo de recurrencia temporal**

El periodo de recurrencia temporal volcánica es uno de los temas esenciales en volcanismo debido al interés en determinar cuándo se producirá el siguiente evento volcánico. Sin embargo, a pesar de su importancia, los datos cronológicos suelen ser muy escasos. En el caso de la isla de El Hierro, las dataciones disponibles en la bibliografía se limitan a 45 para todo el periodo geológico emergido, lo que en comparación con el enorme número de agrupamientos visibles en la actualidad supone una escasez de datos considerable. Otro inconveniente es el registro geológico, que tiene importantes intervalos sin actividad volcánica registrada a lo largo de la historia geológica de El Hierro. Por todo ello, para la estimación del periodo de recurrencia en la zona piloto se ha estimado la edad de los agrupamientos, utilizando dos criterios: las dataciones absolutas obtenidas mediante métodos radiométricos y las dataciones relativas deducidas del análisis de las relaciones estratigráficas entre los depósitos de los diferentes agrupamientos volcánicos.

La determinación del periodo de recurrencia se ha evaluado para los últimos 145 ka debido a que durante este periodo se estima que la actividad volcánica ha sido continua hasta la actualidad. Para este periodo, sólo hay disponibles 23 dataciones.

### **Modelador de agrupamientos**

La simulación del peligro volcánico de los flujos de lava necesita de un cierto número de variables como la posición geográfica de los eventos volcánicos, volumen de lava, temperatura de emisión y composición geoquímica entre otros. Para obtener estas variables se ha desarrollado un algoritmo que utilizando los datos geológicos recopilados, genera todos los elementos volcánicos (fisuras y centros de emisión) necesarios para la simulación de los peligros volcánicos. Estos agrupamientos deben estar distribuidos en el espacio con arreglo a la geología de El Hierro y ser simulados para los distintos periodos de recurrencia.

El algoritmo final desarrolla todas las variables necesarias de cara a una simulación de peligros volcánicos especialmente volumen, composición y centro de emisión del cual se producirá la emisión de los productos volcánicos que constituyen un peligro volcánico.

## Simulación de peligros volcánicos

### Simulación de flujo de lavas

La simulación de flujos de lavas es uno de los puntos clave en el cálculo de la peligrosidad volcánica. Tradicionalmente, los modelos numéricos que han reproducido los flujos de lava se han aproximado desde dos ópticas bien distintas (Costa y Macedonio, 2005):

- Modelos probabilistas basados en la máxima pendiente.
- Modelos deterministas basados en la teoría del transporte.

Los modelos probabilistas que estiman la superficie ocupada por una lava con un grado de probabilidad están basados en la máxima pendiente del terreno donde esta tiene el papel principal en el desarrollo de los modelos. Este tipo de modelos se caracteriza por necesitar pocos parámetros de entrada al modelo y un bajo coste computacional.

Los modelos deterministas infieren el movimiento de la lava a través de las ecuaciones de la continuidad, cantidad de movimiento y conservación de la energía de un fluido, compendiadas en su forma diferencial en las ecuaciones de Navier-Stokes. Su utilización tiene un alto coste computacional además de requerir un elevado número de parámetros de entrada.

Para el presente proyecto se ha desarrollado un nuevo algoritmo de simulación para los flujos de lavas que tiene entre sus características los siguientes elementos:

- Bajo coste computacional.
- Uso de los datos suministrados por el simulador de agrupamientos.
- Manejo de MDE de tamaño de celda reducido.
- Salida de datos a un sistema de información geográfica.
- Fácil implementación.

El algoritmo ofrece como resultados una distribución espacial de lavas, espesor y probabilidad espacial de la distribución de lavas.

### Simulación balística de bombas

Uno de los peligros asociados a los eventos volcánicos, es la proyección de piroclastos de tamaño bomba. La simulación balística de bombas volcánicas se realiza utilizando las ecuaciones del tiro parabólico en el vacío así como las clásicas ecuaciones de balística para proyectiles militares. El proyecto Volcanten (Lain *et al.*, 2008) contiene un sencillo algoritmo simulador de proyección balística que indica el alcance de bombas piroclásticas. El algoritmo simula velocidades y ángulos de proyección para conocer el alcance final de las bombas. El algoritmo basado en las ecuaciones de proyección balística es muy rápido y es fácil de implementar en cualquier plataforma. Este algoritmo se utilizará como base de desarrollo en la zona piloto.

### Simulación de nubes de ceniza

La simulación de nubes de ceniza es un tema ampliamente tratado en la literatura (Costa y Macedonio, 2005; Folch *et al.*, 2009). Sin embargo, en la zona piloto no se han estudiado los depósitos de ceniza asociados a los agrupamientos volcánicos al no existir datos disponibles en la literatura ni tener la capacidad de realizar un muestreo de campo detallado que permita obtenerlos durante este proyecto. Por tanto, no es posible aplicar los modelos actuales de dispersión de cenizas a la zona piloto.

## Preparación de resultados

Los datos procedentes de la Infraestructura de datos espaciales (IDE) y los datos obtenidos de las simulaciones deben ser preparados con el fin de realizar el mapa de riesgo. El origen de los datos es muy diverso y aunque está limitado a los formatos *shape* y *raster*, es necesario que realizar una normalización de los mismos y establecer un criterio para estructurar la distinta información. La estructuración de los datos debe ser compatible entre sí para abordar el mapa de riesgo.

## Mapa de riesgo

Los mapas de riesgo volcánico tradicionalmente se han asimilado a los mapas de peligrosidad volcánica. Sin embargo, este concepto es erróneo ya que el riesgo implica la pérdida en forma de vidas humanas, propiedades o capacidad productiva por un peligro de acuerdo con la definición del informe del Estudio Estadístico de los Peligros Naturales (UNESCO, 1972). Manteniendo esta metodología, la ecuación propuesta en este informe es la siguiente:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \cdot \text{Vulnerabilidad} \cdot \text{Valor}$$

La variable *peligrosidad* se define como la probabilidad de que una cierta área sea afectada por un determinado fenómeno volcánico. Esta variable está obtenida a través de los modelos numéricos siendo su distribución espacial probabilística.

La *vulnerabilidad* es la proporción del daño que sufre un bien jurídico al estar expuesto a la acción de un peligro volcánico.

En cambio, el *valor* hace referencia al coste económico de reposición del bien jurídico afectado por el peligro volcánico y que es susceptible de ser dañado.

La metodología para realizar el cálculo del riesgo volcánico se basa en el producto escalar de estas tres variables y puede llevarse a cabo en un Sistema de Información Geográfica al ser variables georreferenciadas. Debido al componente probabilístico del mapa de peligrosidad, es necesario establecer distintos mapas de peligrosidad y un algoritmo que en función de éstos, ejecute el producto de las variables y genere distintos mapas de riesgo volcánico.

## 4.2.- Construcción de algoritmos de cálculo y relación con software específico

La construcción de algoritmos para desarrollar los mapas de peligrosidad es una tarea compleja ya que hay que establecer relaciones no triviales entre los datos para simplificar la problemática. Los datos deben estar estructurados por su formato y tipo de fichero almacenable (Figura 5).

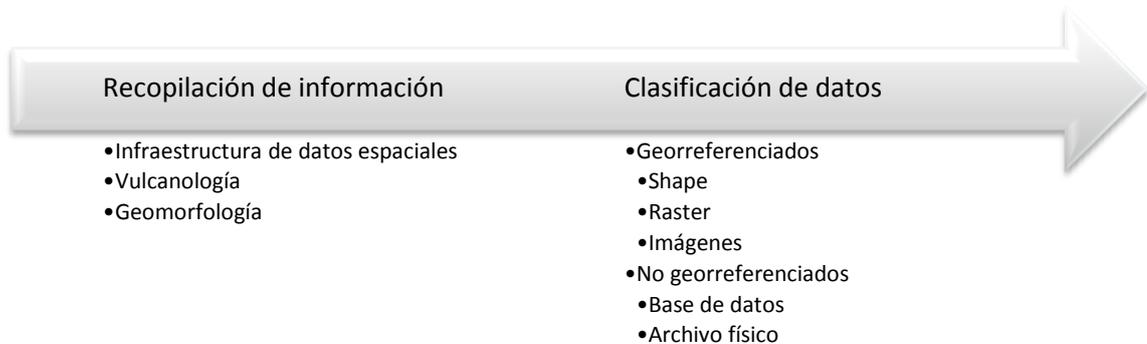


Figura 5. Clasificación de la información geológica y de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE).

La información recopilada tanto geológica como de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) está disponible en dos soportes: papel y digital. Se ha clasificado la información en:

- Datos con referencia espacial. Se ha incluido en este apartado la información relacionada con IDE en formato digital como la información geológica. Todos los datos que tienen referencias espaciales para su proyección y representación en un Sistema de Información Geográfica se ha almacenado en formatos shape, *grid* o imágenes georreferenciadas.
- Datos sin referencia espacial. El origen de la información en soporte papel está relacionada en su mayoría con publicaciones como revistas, mapas, libros o proyectos. La información ha sido guardada en una base de datos y en un archivo físico correctamente clasificado.

Los datos que se van a procesar son los datos relacionados con la geología y vulcanología, con objeto de relacionarlos para obtener una reclasificación de los mismos y poder utilizarlos en los próximos algoritmos. La información relativa a Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) se utilizará como base cartográfica utilizando los datos en crudo sin relación entre ella.

### Proceso de datos volcánicos.

El proceso de tratamiento de la información geológica se ha dividido en tres:

- Agrupamientos volcánicos.
- Susceptibilidad volcánica.
- Periodo de recurrencia temporal.

### Agrupamientos volcánicos.

Los agrupamientos volcánicos o *cluster* se han establecido en base a las fisuras eruptivas y centros de emisión. Se han probado distintos algoritmos de *cluster* con diferentes métricas (distancia euclídea, euclídea estándar y *city block*) para agrupar los elementos volcánicos sin obtener resultados satisfactorios. Debido a la complejidad de las estructuras volcánicas, se han establecido los agrupamientos mediante criterio experto agrupando los elementos pertenecientes al mismo evento eruptivo. Los criterios seguidos para generar los agrupamientos volcánicos son los siguientes:

- Criterio genético. Los elementos volcánicos han sucedido en el mismo evento eruptivo.
- Criterio espacial. Los elementos volcánicos están alineados a lo largo de fisuras eruptivas.

- Criterio temporal. Los elementos volcánicos deben haberse generado en el mismo intervalo temporal o bien ser coetáneos.

Los elementos volcánicos utilizados pertenecen al Edificio El Golfo y el Volcanismo de El Rift por estimarse que hay actividad volcánica continua durante los últimos 145 ka hasta la actualidad. Se han relacionado aquellas fisuras y centros de emisión que pertenecen a un mismo agrupamiento estimando la existencia de un total de 221 agrupamientos para la isla de El Hierro. Sin embargo a efectos cartográficos, se han representado los agrupamientos en el Sistema de Información Geográfica ArcMap® como un polígono en formato *shape*. Este polígono encierra las fisuras eruptivas y centros de emisión que pertenecen al mismo agrupamiento.

Sin embargo, el polígono que conforma un agrupamiento no indica que haya una relación entre los *shapes* de los centros de emisión y las fisuras. Por ello, ha sido necesario desarrollar un algoritmo que los relacione entre sí.

El algoritmo tiene las siguientes etapas (Figura 6):

1. Cálculo del centroide del agrupamiento. Se calcula el centroide del polígono del agrupamiento.
2. Pertenencia de las fisuras al agrupamiento. Se comprueba qué fisuras pertenecen a cada agrupamiento y se les asignan al agrupamiento.
3. Pertenencia de los centros de emisión al agrupamiento. Se comprueba que los centros de emisión pertenecen a cada agrupamiento y se les asignan al agrupamiento.
4. Cálculo de envolvente convexa para los elementos volcánicos. Se realiza la envolvente convexa de los *shapes* de los elementos volcánicos de cada agrupamiento generando un nuevo polígono. Después se reasigna el nuevo polígono al agrupamiento.
5. Recálculo del agrupamiento. A través de los nuevos datos del polígono del agrupamiento se calculan sus áreas y centroides. Se reasignan los nuevos centroides a los *shapes* de agrupamiento, centros de emisión y fisuras eruptivas.
6. Salvado de datos. Se salvan los datos en los *shapes* correspondientes.



Figura 6. Desarrollo del algoritmo de agrupamiento volcánico.

El algoritmo resuelve el agrupamiento de los elementos a la vez que genera un polígono con envolvente convexa sobre los centros de emisión y fisuras eruptivas (Figura 7). El método de relación

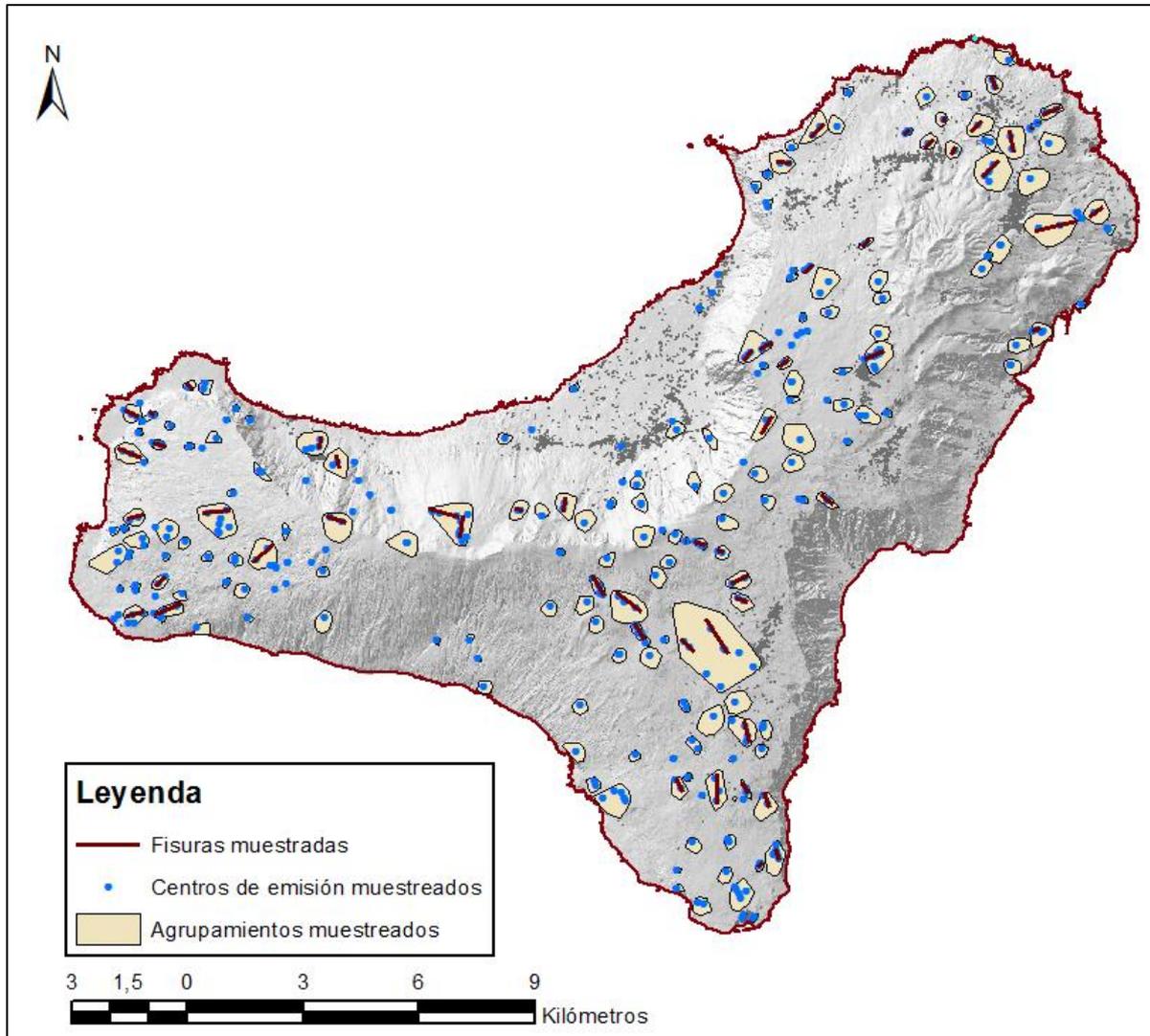


Figura 7. Agrupamientos generados a partir de los centros de emisión y fisuras.

entre estos datos son las coordenadas del centroide del agrupamiento, que se halla escrito en la tabla de atributos de todos los shapes que se hallan encuentran bajo el mismo agrupamiento. Para el desarrollo del algoritmo se ha utilizado la aplicación Matlab®/Octave que permite la carga de datos espaciales y su grabación y salida en el mismo formato relacionando todos los datos entre sí.

### Susceptibilidad volcánica

El cálculo de la susceptibilidad volcánica en campos volcánicos monogenéticos se ha realizado utilizando una función de probabilidad de densidad (FPD) con una función *kernel* que se adapta a los campos volcánicos monogenéticos de El Hierro. En la fuerte anisotropía estructural de los agrupamientos volcánicos se considera como óptima una función *kernel* de tipo elíptico (Connor *et al.*, 2012). Botev *et al.* (2010) utilizan un *kernel* elíptico basado en los procesos de difusión lineal que tiene un ajuste apropiado en los bordes del dominio y un tratamiento óptimo en los datos aislados que no los infravalora como hacen otros *kernel*. Este estimador *kernel* se ha considerado óptimo para un campo volcánico monogenético por lo que se ha implementado.

Los datos que se han utilizado en el algoritmo son los centros de emisión calculados en el apartado *Agrupamientos Volcánicos*. Se han descartado fisuras eruptivas, diques y fallas.

Se ha desarrollado el algoritmo en Matlab®/Octave que utiliza el *kernel* (Botev *et al.*, 2010), obteniendo un mapa de susceptibilidad espacial con tamaño de celda de 5 m. El mapa se ha remuestreado a tamaño de celda de 25 m con objeto de disminuir el coste computacional del manejo de datos (Figura 8).

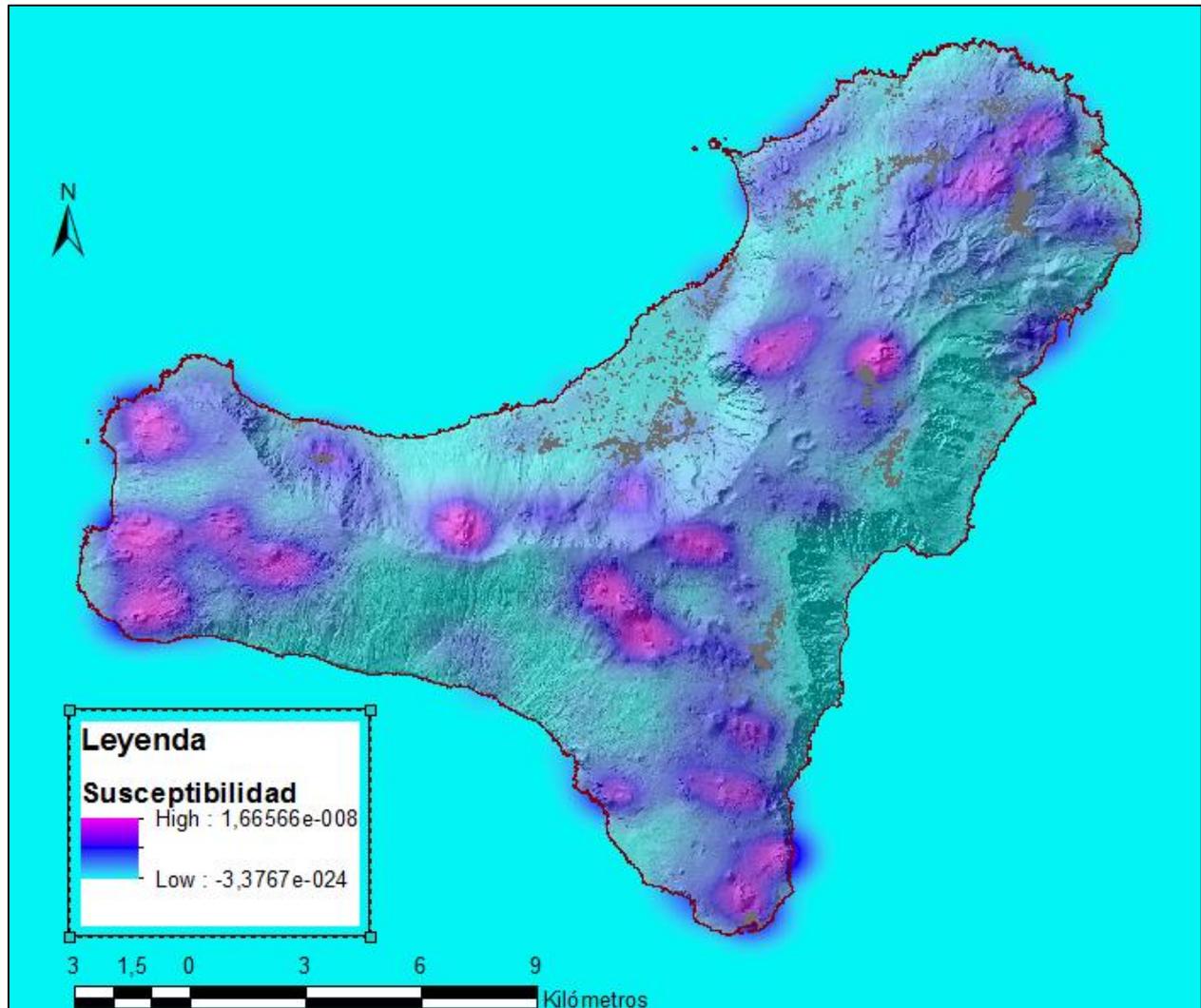


Figura 8. Mapa de susceptibilidad espacial de nueva apertura de centros de emisión.

El fichero de salida ha sido en formato *Arc Grid* y en formato *Mat-File* con objeto de reutilizarlo en el algoritmo del agrupamiento volcánico.

### *Periodo de recurrencia temporal*

Se ha utilizado el método de cálculo de estimación de recurrencia media (Connor y Conway, 2000) cuya ecuación es:

$$\lambda_t = \frac{N - 1}{t_0 - t_y}$$

Donde  $N$  es el número de agrupamientos,  $t_0$  la edad del agrupamiento más antiguo,  $t_y$  del agrupamiento más moderno y  $\lambda_t$  el valor del periodo de recurrencia. A partir de los datos, se ha desarrollado un algoritmo en Matlab®/Octave que enlaza los datos de los agrupamientos y los valores

de dataciones geocronológicas y estratigráficas y que permite realizar el periodo de recurrencia media. El resultado queda como sigue:

$$\lambda_t = \frac{221 - 1}{145000 - 656} = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ agrup/año}$$

Los datos han sido salvados en formato *Mat-File* de manera que pueda ser utilizados en el apartado *Simulación de agrupamientos*.

### Modelador de agrupamientos

La simulación de la apertura de nuevos centros de emisión se ha llevado a cabo a través de un modelo de simulación de agrupamientos volcánicos para un periodo de simulación de 145.000 años utilizando los datos procesados del apartado de Proceso de datos volcánicos. El simulador volcánico MOVAM (MONogenetic VolcAnoes Modeler) escrito en lenguaje Matlab®/Octave, es un modelador de agrupamientos volcánicos que tiene como fin modelar los parámetros necesarios para una simulación de flujo de lavas. Para la simulación de estos parámetros MOVAM realiza la simulación de los agrupamientos, fisuras eruptivas y centros de emisión. El algoritmo se ha desarrollado en las siguientes etapas (Figura 9):

- Simulación del agrupamiento. MOVAM realiza una simulación de los agrupamientos volcánicos en la isla de El Hierro utilizando el mapa de susceptibilidad volcánica y el periodo de recurrencia calculados en el apartado de *Proceso de datos volcánicos*. El algoritmo se basa en situar aleatoriamente el centroide de un agrupamiento sobre el mapa de susceptibilidad y aplicar un algoritmo de Monte Carlo sobre ese punto. Aquellos centroides que superan

el algoritmo quedan almacenados como agrupamiento simulado. El número de agrupamientos simulados fue de 221. Los agrupamientos se han ordenado de más probables a menos probables disminuyendo su probabilidad espacial con el tiempo de simulación.

- Simulación de la fisura eruptiva. MOVAM con cada agrupamiento simulado, simula una única fisura eruptiva. Para estimar su longitud y orientación, busca la información sobre fisuras eruptivas cercanas a través de los datos relacionados con los Agrupamientos generados del apartado *Proceso de datos volcánicos*. La búsqueda se hace mediante un radio adaptativo, y estima su longitud y orientación mediante un algoritmo de Monte Carlo.
- Simulación de los centros de emisión. En cada fisura eruptiva simulada, se simulan los centros de emisión asociados a ella y se obtienen, al igual que en el punto anterior, los datos de los centros de emisión cercanos al agrupamiento, utilizando un algoritmo de Monte Carlo.
- Simulación de volúmenes de lava. La simulación de volúmenes de lava se ha realizado estableciendo una subrutina que realiza una función de densidad de probabilidad tipo Gauss entre los distintos volúmenes y mediante la simulación aleatoria de un volumen sobre un algoritmo de Monte Carlo se ha asignado un volumen a cada agrupamiento.
- Simulación geoquímica de elementos mayores. Los datos sobre geoquímica de elementos mayores de rocas de la isla de El Hierro han sido simulados mediante una subrutina que aplica para cada óxido una función de densidad de probabilidad de tipo Gauss. Así, se establece una

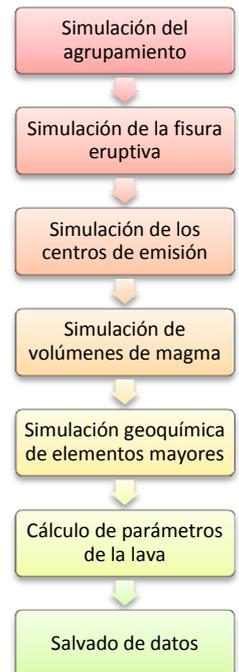


Figura 9. Secuencia de la simulación de agrupamientos.

simulación aleatoria de cada óxido aplicando un algoritmo de Monte Carlo y, mediante una media adaptativa, se establece una relación entre el óxido objetivo y el óxido de Magnesio como valor de referencia. Así, son simulados todos los óxidos para cada agrupamiento. Por último, otra subrutina clasifica la composición geoquímica de acuerdo al diagrama TAS (*Total Alkali Silica*).

- Cálculo de parámetros de lava. A partir de los datos geoquímicos, MOVAM estima los parámetros necesarios en una simulación de lavas (temperatura de *solidus*, densidad, presión y cizalla).
- Salvado de datos. Todos los datos de las simulaciones son salvados en ficheros de tipo *shape*. Se generan tres ficheros: agrupamientos, centros de emisión y fisuras eruptivas. Todos los ficheros se encuentran georreferenciados y listos para ser representados en un Sistema de Información Geográfica.

Los resultados han sido representados en un Sistema de Información Geográfica (Figura 10).

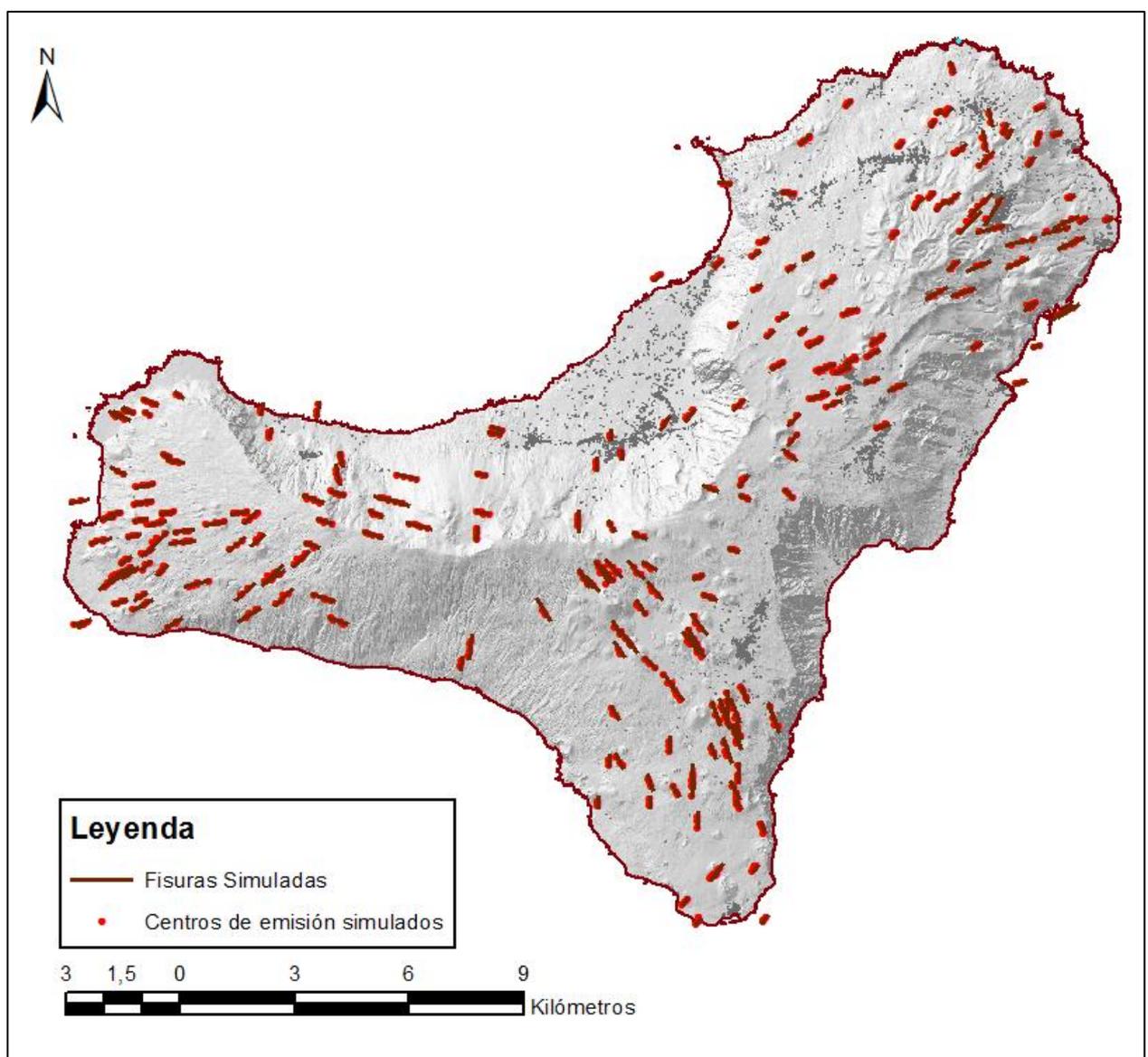


Figura 10. Representación de las fisuras y centros de emisión mediante el algoritmo MOVAM.

## Simulación balística de bombas

La simulación balística de bombas se ha basado en el algoritmo creado en el Proyecto Volcanten (Lain *et al.*, 2008). El «código fuente» está disponible, sin embargo, el algoritmo no tiene en cuenta los datos iniciales del peso de la bomba, sus dimensiones o la presión atmosférica. Como resultado, las distribuciones espaciales de los datos son homogéneas sin distinción entre tamaños.

Con el fin de mejorar el anterior algoritmo se ha llevado a cabo la construcción de un nuevo algoritmo desarrollado en Matlab®/Octave. Este nuevo algoritmo aporta complejidad al añadir el aire como elemento reductor de la velocidad y tiene además en cuenta la masa y el tamaño de las bombas. Sólo ha podido desarrollarse para 2 dimensiones debido a la dificultad en la resolución de las ecuaciones de intersección de trayectorias con una superficie tridimensional como es el modelo digital de elevación. Además, para la isla de El Hierro no existen datos de dimensiones de las bombas volcánicas y/o su distribución espacial. Por tanto aunque el algoritmo está desarrollado su validación es complicada al menos con la información de la que se dispone actualmente.

## Simulación de flujo lavas.

Las limitaciones en los programas de simulación de lavas están relacionadas con el número de parámetros de entrada así como del coste computacional. El coste computacional es un factor limitante por lo que se ha decidido utilizar modelos probabilistas por su bajo coste computacional y menores datos de entrada. En la literatura son escasos los algoritmos probabilísticos que pueden ser utilizados de forma gratuita. El programa VORIS (Felpeto *et al.*, 2007) basado en algoritmos de máxima pendiente permite realizar simulaciones teniendo como únicos parámetros de entrada el modelo digital de elevación, la longitud de colada, número de iteraciones y altura de colada. No obstante, dicho *software* no resuelve correctamente el tránsito de las lavas en zonas llanas y deprimidas que son frecuentes en la isla de El Hierro. Un problema añadido es la estimación del parámetro de la longitud de la colada necesario en el programa VORIS, ya que no se conoce a priori la relación entre el volumen de lava y la longitud que finalmente alcanzará la misma.

Para solventar estas dificultades, se ha desarrollado un nuevo algoritmo en Matlab/Octave® con las siguientes características:

- Ausencia del *número de iteraciones* como parámetro de entrada.
- Tránsito de las lavas por zonas llanas.
- Relleno de la lava de depresiones y salida de las mismas.
- Utilización del volumen de lava como parámetro de entrada.
- Optimización del uso del modelo digital de elevación con tamaño de celda reducido (5 m).
- Carga de datos en formato *shapefile*.
- Salida de datos en formato *Arc Grid* y *shapefile*.



Figura 11. Secuencia del algoritmo ELAM.

El Enhanced LAva Model (ELAM) es un simulador que a través de los datos de entrada (MDE, volumen y centro de emisión) genera una superficie probabilística de afección del territorio por invasión de lavas basada en un histograma bivariado. ELAM resuelve los inconvenientes de los modelos probabilístico basados en la máxima pendiente, pudiendo transitar en zonas llanas así como y entrar y salir de zonas deprimidas. ELAM también solventa los problemas de memoria con la carga de modelos

digitales de elevación de tamaño de celda reducido, ya que el simulador sólo utiliza la parte del MDE usada por la simulación, con el correspondiente ahorro de memoria. ELAM queda descrito en las siguientes fases (Figura 11):

- Carga de datos de entrada. Se extraen los datos de entrada de los ficheros que alimentan al modelo de simulación (MDE, volumen y coordenadas del centro de emisión).
- Estimación del área de simulación. Estimación de la superficie a utilizar por la simulación a partir de los datos de volumen.
- Extracción del MDE a utilizar en la simulación. Se extrae la parte del MDE necesaria para la ejecución del modelo.
- Simulación de lava. La simulación se basa en el algoritmo de máxima pendiente donde analiza el algoritmo en cada iteración la posible entrada en zonas llanas o depresiones. En las zonas llanas genera una superficie virtual estocástica que permite progresar al algoritmo por máxima pendiente. En cambio, en las zonas hundidas el algoritmo rellena las celdas para poder progresar a la celda siguiente. La simulación de la lava acaba cuando el volumen de lavas de partida coincide con el simulado si no alcanza el mar.
- Resultados. Los datos obtenidos de la simulación son recalculados para representar un histograma bivariado normalizado.
- Salvado de datos. El histograma bivariado normalizado es salvado a formato Arc Grid® y los

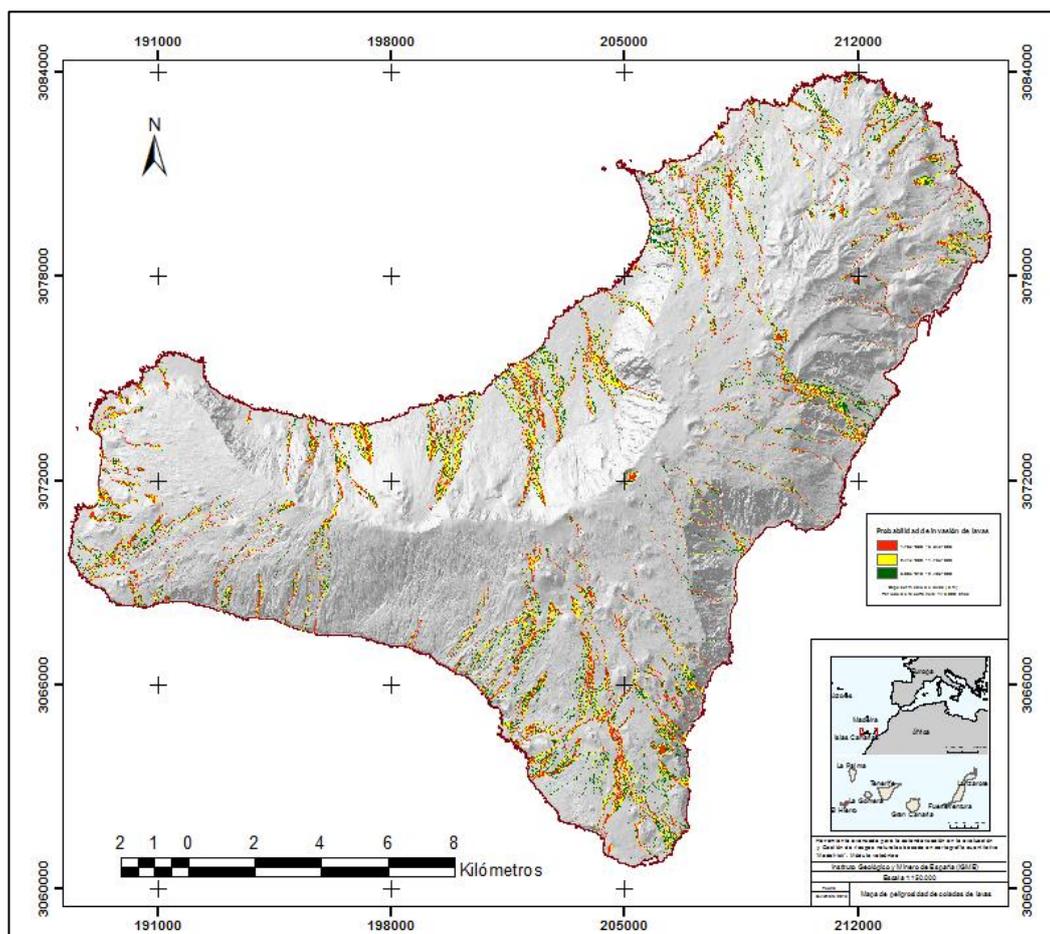


Figura 12. Representación de todos los escenarios de lava para un periodo de recurrencia de 145.000 años.

datos correspondientes a la simulación (volumen simulado y real, área ocupada, número de simulaciones y periodo de simulación) se almacenan en formato *shape*.

Los ficheros obtenidos son exportados a un sistema de información geográfica donde son representados todos los escenarios de lavas para todos los últimos 145.000 años (Figura 12).

### Preparación de resultados

La estimación del riesgo s.s. según la metodología establecida en el *Apartado 4.1 Mapa de riesgo*, necesita determinar el valor de las tres variables. La *peligrosidad* basada en los modelos de lavas. La *vulnerabilidad* de los bienes susceptibles de ser dañados (infraestructuras) y el coste de reparación y/o reposición (*valor*). Las infraestructuras eléctrica, viaria y edificación son consideradas esenciales para la zona Piloto de El Hierro.

Para poder valorar el riesgo hay que armonizar los *tres* factores mediante una discretización homogénea. El modelo digital de elevación se ha utilizado como base para definir los mapas de susceptibilidad y para la simulación de agrupamientos y peligros de lavas por lo se ha elegido el formato *raster* con celda cuadrada de 5 m de lado. De esta manera, el resto de los datos espaciales se transformarán a formato *raster* de tamaño de celda 5 m.

El listado de ficheros necesarios para el riesgo volcánico por invasión de lavas queda recogido en la siguiente (Tabla 2):

Variable	Clase de datos	Formato origen	Formato destino
Vulnerabilidad/Valor	Infraestructura eléctrica	Vectorial	Raster (celda 5 m)
Vulnerabilidad/Valor	Infraestructura viaria	Vectorial	Raster (celda 5 m)
Vulnerabilidad/Valor	Infraestructura de edificación	Vectorial	Raster (celda 5 m)
Peligrosidad	Coladas de lavas	Raster (celda 5 m)	Raster (celda 5 m)

Tabla 2. Tabla de ficheros para el riesgo volcánico por invasión de lavas.

La transformación de un formato vectorial a raster se tomará como base de transformación el modelo digital de elevación con celda cuadrada de 5 m de lado. Una vez transformados, son almacenados en sus correspondientes ficheros.

### Mapa de riesgo

El mapa de riesgo para el peligro de lavas relaciona las tres variables definidas en el *Apartado 4.1 Mapa de Riesgo* que conforman la ecuación del riesgo. Sin embargo, hay que advertir que las variables *peligrosidad* y *valor*, son variables independientes de la función *riesgo* pero no ocurre así con la *vulnerabilidad* que está supeditada a la variable *peligrosidad* (Figura 13). La *vulnerabilidad* de un bien o bienes es dependiente del tipo de peligro y la intensidad de éste.

En contrapunto, la variable *valor* es una variable puramente económica que está en relación por la cualidad del bien y su revaloración/depreciación es dependiente de aspectos socioeconómicos.

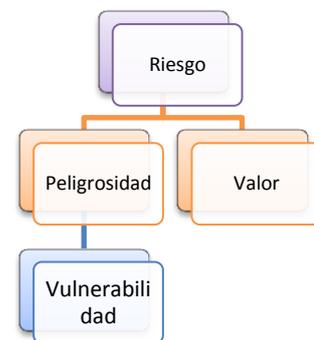


Figura 13. Relación jerárquica entre peligrosidad, valor y vulnerabilidad.

El algoritmo para elaborar mapa de riesgo conlleva las siguientes etapas (Figura 14): Mapa de peligrosidad, mapa de vulnerabilidad, mapa de valor y mapas cuantificados.

### Mapa de peligrosidad

A partir de los mapas de simulaciones de flujos de lavas se obtiene un mapa de peligrosidad frente a los flujos lávicos donde cada celda tiene una probabilidad de ser invadida respecto al flujo. Dado que los mapas de peligrosidad son mapas de probabilidad obtenidos a través del simulador ELAM, es necesario reclasificar estos valores para obtener distintos mapas de probabilidad en función del riesgo esperado.

Se proponen obtener cinco mapas de probabilidad de probabilidad incremental según la Tabla 3:

Denominación	Probabilidad
Mapa 20%	0.00 – 0.20
Mapa 40%	0.00 – 0.40
Mapa 60%	0.00 – 0.60
Mapa 80%	0.00 – 0.80
Mapa 100%	0.00 – 1.00

Tabla 3. Tabla de mapas de probabilidad.

Para diseñar estos mapas, se puede utilizar la herramienta Raster Calculator en ArcMap® (Figura 15) que permite generar el mapa de peligrosidad en función de la probabilidad del peligro esperado.



Figura 14. Secuencia de elaboración del mapa de riesgo.

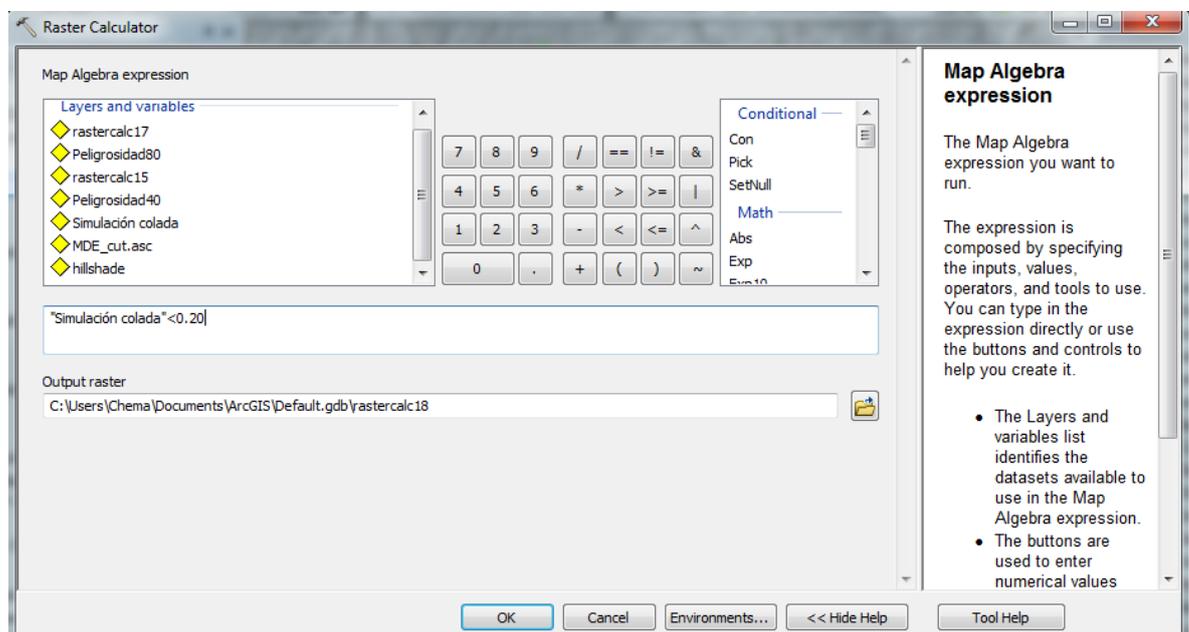


Figura 15. Ejemplo de reclasificación mediante calculadora raster.

### Mapa de vulnerabilidad.

Los mapas de vulnerabilidad de los bienes están basados en el grado de pérdida que sufren los bienes respecto a un peligro volcánico determinado. En la literatura son escasos los estudios sobre interacción con las lavas y la resistencia estructural de los bienes. En el caso de la zona piloto, sería

necesario efectuar complejos cálculos estructurales para los distintos bienes seleccionados (infraestructuras viarias, eléctricas y edificación). Como solución aproximada, la alta capacidad de destrucción que las lavas poseen implica que la vulnerabilidad es muy alta por lo que se ha asignado un valor conservador de 1 para todos los bienes inventariables seleccionados para la zona piloto indicando una destrucción total del bien o inutilización para el fin que fue diseñado.

### **Mapa de valor.**

La variable valor es el factor más problemático de todos los estudiados. La valoración económica de la pérdida de los bienes jurídicos es una tarea compleja y de difícil cuantificación. Actualmente no se tienen dispone de estimaciones del valor económico de los bienes por su distinta naturaleza, por lo complejo de su tasación y por el elevado grado de detalle que se necesita para este tipo de peligros y la escala de trabajo. Es necesario construir un modelo económico que valore y automatice los bienes del medio físico y en el estado actual del arte no es posible establecer el coste de la pérdida de los bienes del medio físico. Este factor quedará a que un futuro, se tenga una capa de costes de bienes.

Por esta causa, este factor queda pendiente de su evaluación hasta que los avances científicos puedan desarrollar un modelo que fije este factor.

### **Mapas cuantitativos**

Los mapas cuantitativos se obtendrán de la aplicación de la ecuación descrita en el *Apartado 4.1 Mapa de riesgo*. De nuevo, utilizando en ArcMap® la herramienta *Raster Calculator*, realizamos dicho producto. Al existir cinco mapas de probabilidad, se realizará esta operación para cada mapa de probabilidad, obteniendo cinco mapas de riesgo volcánico.

En resumen, una vez se disponga de una base de datos económica de los bienes y una georreferenciación se podrá en un futuro calcular el mapa de riesgo para los peligros volcánicos s.s. de tipo flujo lávico.

### 4.3.- Validación del algoritmo de cálculo

La validación de los algoritmos de cálculo en modelos numéricos es una fase esencial ya que permite verificar su validez y contraste con datos reales. En este apartado se presenta la verificación de los simuladores diseñados en el *Apartado 4.2* (MOVAM y ELAM) para comprobar su robustez a la casuística de los datos y de todas las posibles combinaciones que puedan producirse en los datos.

#### Validación del modelador MOVAM

El simulador MOVAM (*MO*nogenetic *Volc*Anoes *Modeler*) está basado en un modelo numérico que proporciona los parámetros necesarios para llevar a cabo una simulación de flujo de lavas.

La validación del MOVAM se ha realizado sobre las distintas fases del algoritmo: simulador de agrupamientos, simulador de fisuras eruptivas, simulador de centros de emisión, simulador de composición geoquímica y simulador de volúmenes de magma. El criterio de validación ha consistido en comparar las familias de datos (muestreados y simulados) mediante un experto que ha verificado la correlación entre los datos y su concordancia.

#### Simulador de agrupamientos

Los datos que ha aportado la simulación de los agrupamientos se ha comparado con los datos que fueron muestreados durante la *Fase de Proceso de datos volcánicos (Apartado 4.1)*. A través de criterio experto se ha verificado que los datos simulados tienen una coherencia con los muestreados

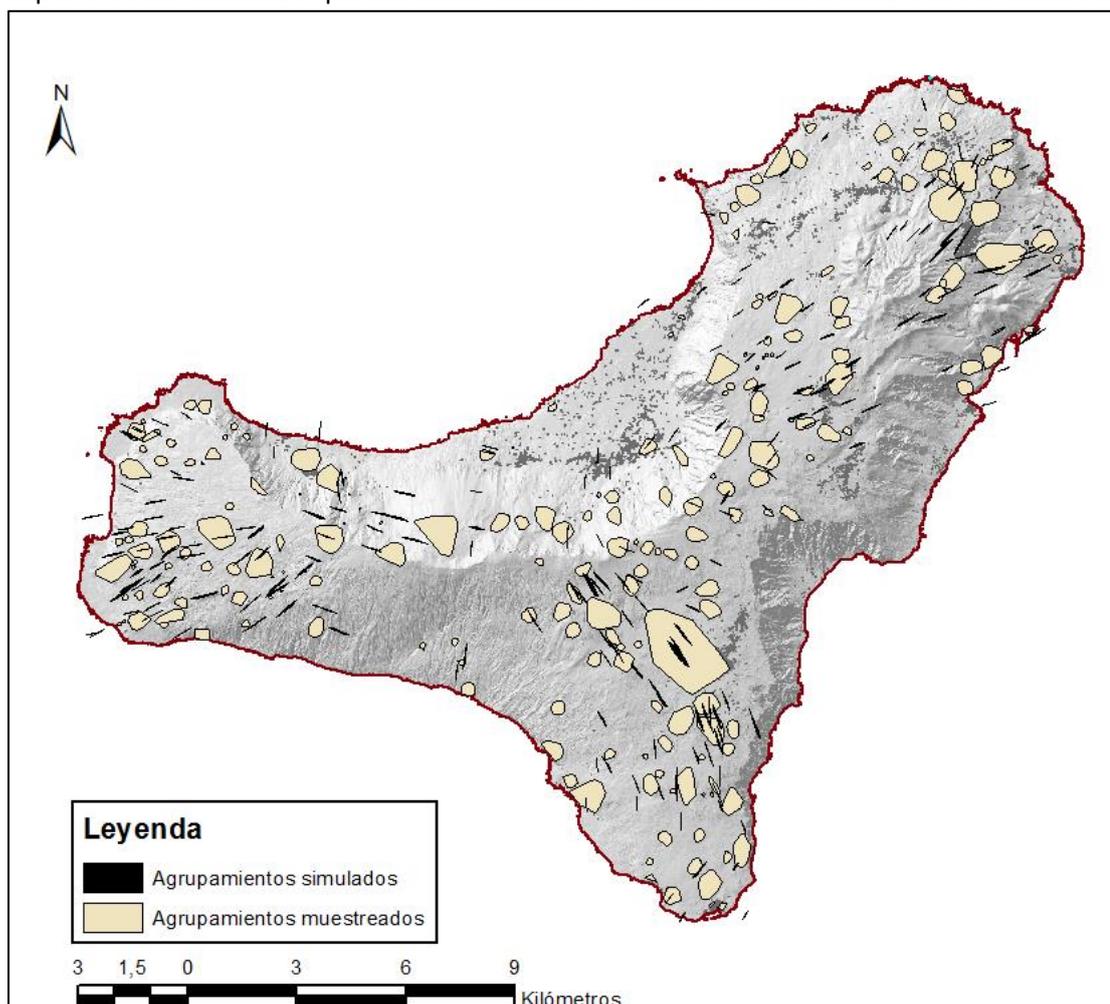


Figura 16. Comparación entre los agrupamientos simulados y muestreados.

tanto en densidad como en posición geográfica (Figura 16). La simulación de agrupamientos más allá de la línea de costa, ya que tiene como objeto determinar la localización de posibles erupciones submarinas. Esto es posible ya que el mapa de susceptibilidad espacial (Figura 8) se extiende más allá de la costa lo cual permite generar agrupamientos en mar abierto. El área de los agrupamientos muestreados es mayor debido a la inclusión de los conos volcánicos dentro de los agrupamientos. Sin embargo, no ha sido posible resolver una simulación plausible de los conos volcánicos, por lo que sólo se ha tenido en cuenta las fisuras y centros de emisión para conformar los agrupamientos.

### *Simulador de fisuras eruptivas*

La dirección estructural de las fisuras simuladas presenta una coherencia y correlación acorde con los datos muestreados. La simulación de diferentes familias de orientaciones de fisuras son escasas debido a los datos de partida. Las simulaciones en la zona NO de la isla (Figura 17), aunque consistentes con los datos muestreados, presentan una menor correlación debido al bajo número de datos de entrada o *inputs*, por lo que el resultado final es de peor calidad. Sería recomendable desarrollar una mejor cartografía que mejorase los datos aportados y volver a simular el MOVAM.

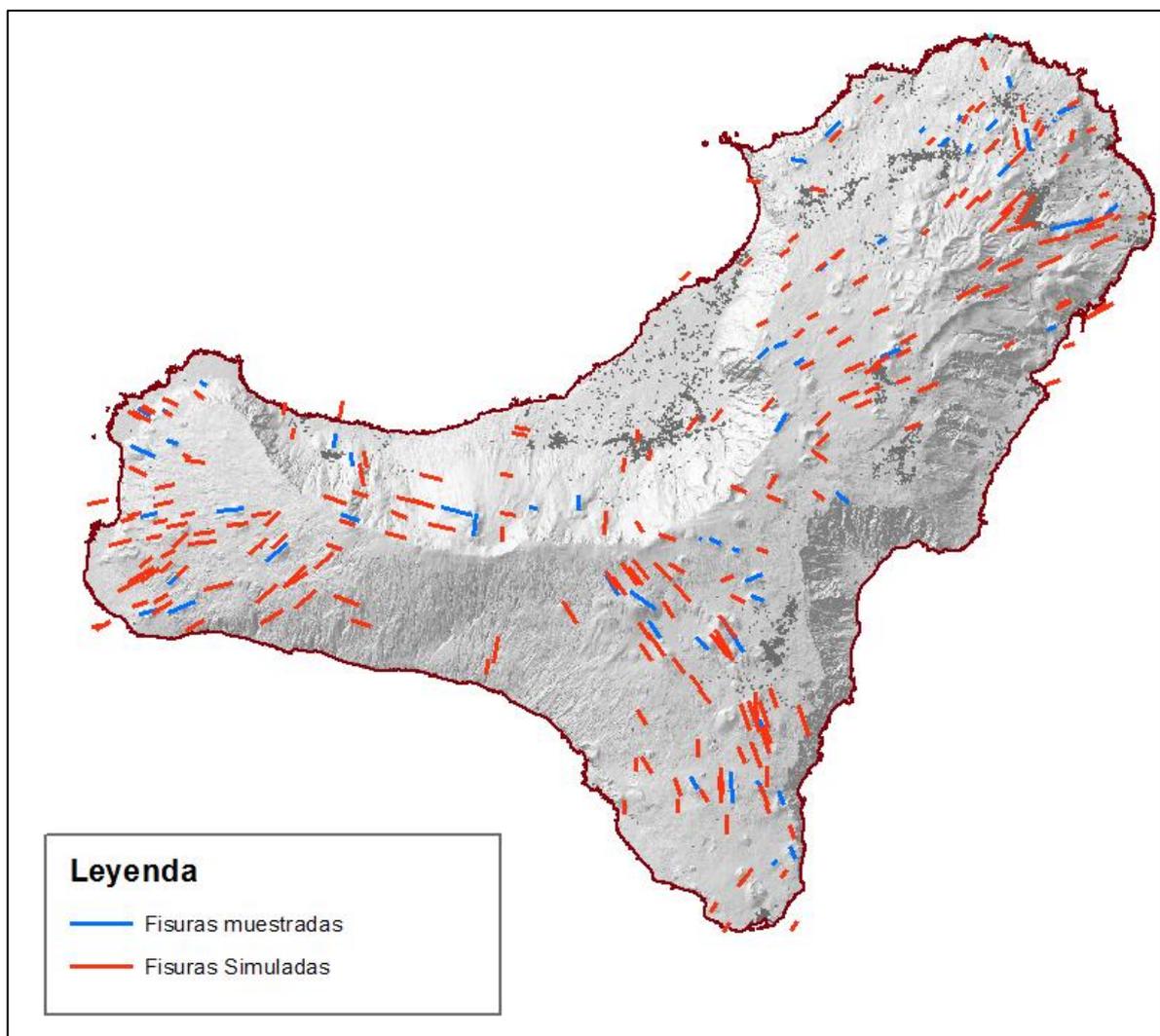


Figura 17. Comparación entre los fisuras muestreadas y simuladas.

### Simulador de centros de emisión

El conjunto de datos de centros de emisión muestreados es muy abundante debido a la enorme densidad de conos volcánicos en la isla de El Hierro y su buen estado de conservación. La simulación de los centros de emisión tiene un buen ajuste con los datos muestreados siendo concordante la densidad

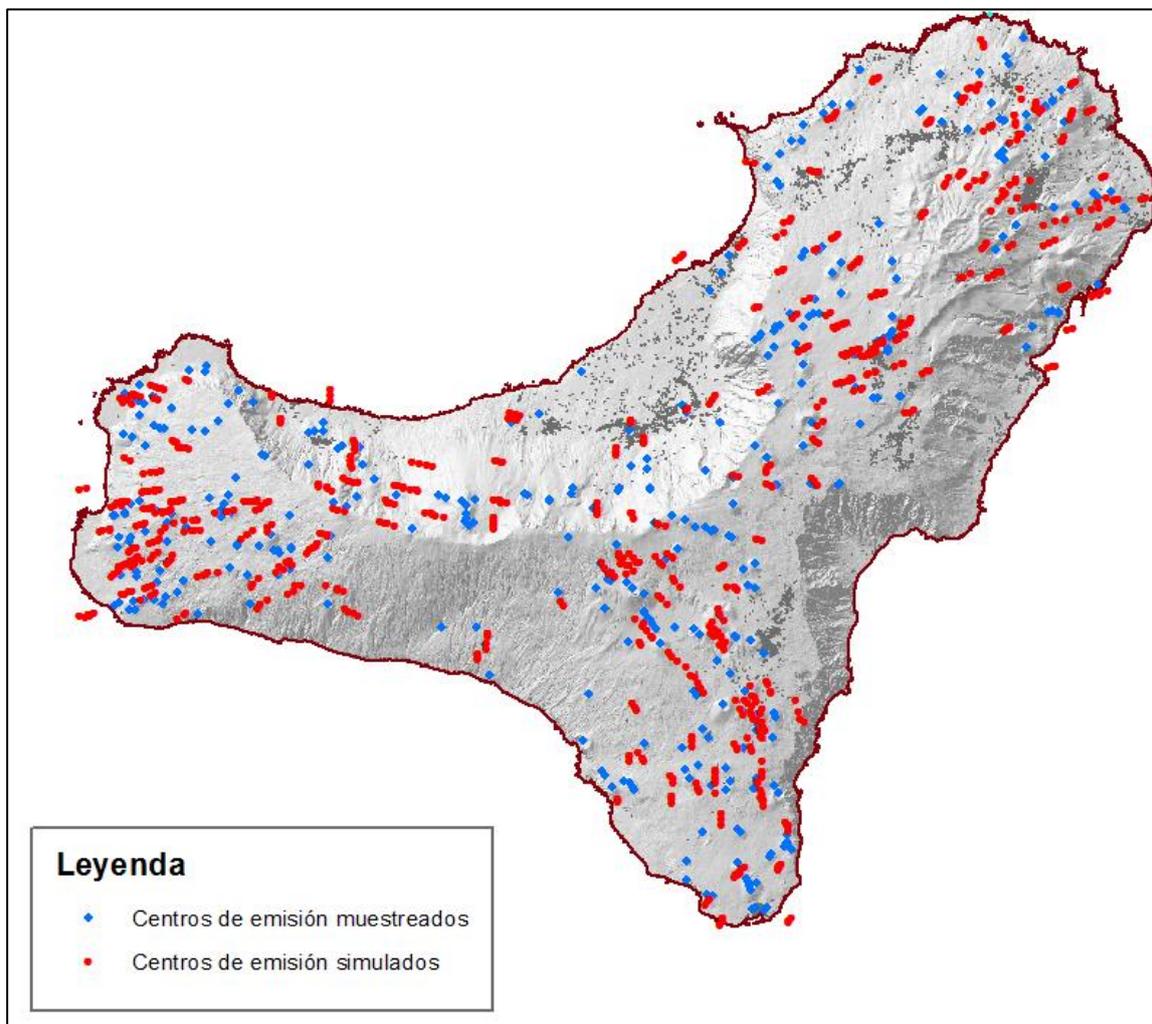


Figura 18. Comparación entre los centros de emisión muestreadas y simulados.

de centros de emisión, que aumenta en las fisuras más recientes y disminuye en los de mayor edad (Figura 18).

### Simulador de composición geoquímica

La geoquímica de la composición del magma asociada a cada agrupamiento simulado se ha realizado utilizando una estimación de densidad *kernel* a partir de los datos recopilados (168 muestras) y que alimentan las entradas al simulador. La validación del algoritmo se ha realizado por dos vías:

- Robustez del algoritmo. La robustez del algoritmo se ha validado realizando dos iteraciones simulando 10.000 muestras geoquímicas en cada una. En la primera iteración se ha tomado como datos de entrada las 168 muestras recopiladas y el 100% y el 50% como dato de entrada y posteriormente se han simulado 10.000 muestras sólo en la mitad de las muestras recolectadas. La proyección de los datos y representación de la densidad (Figura 19) demuestra la robustez del algoritmo.

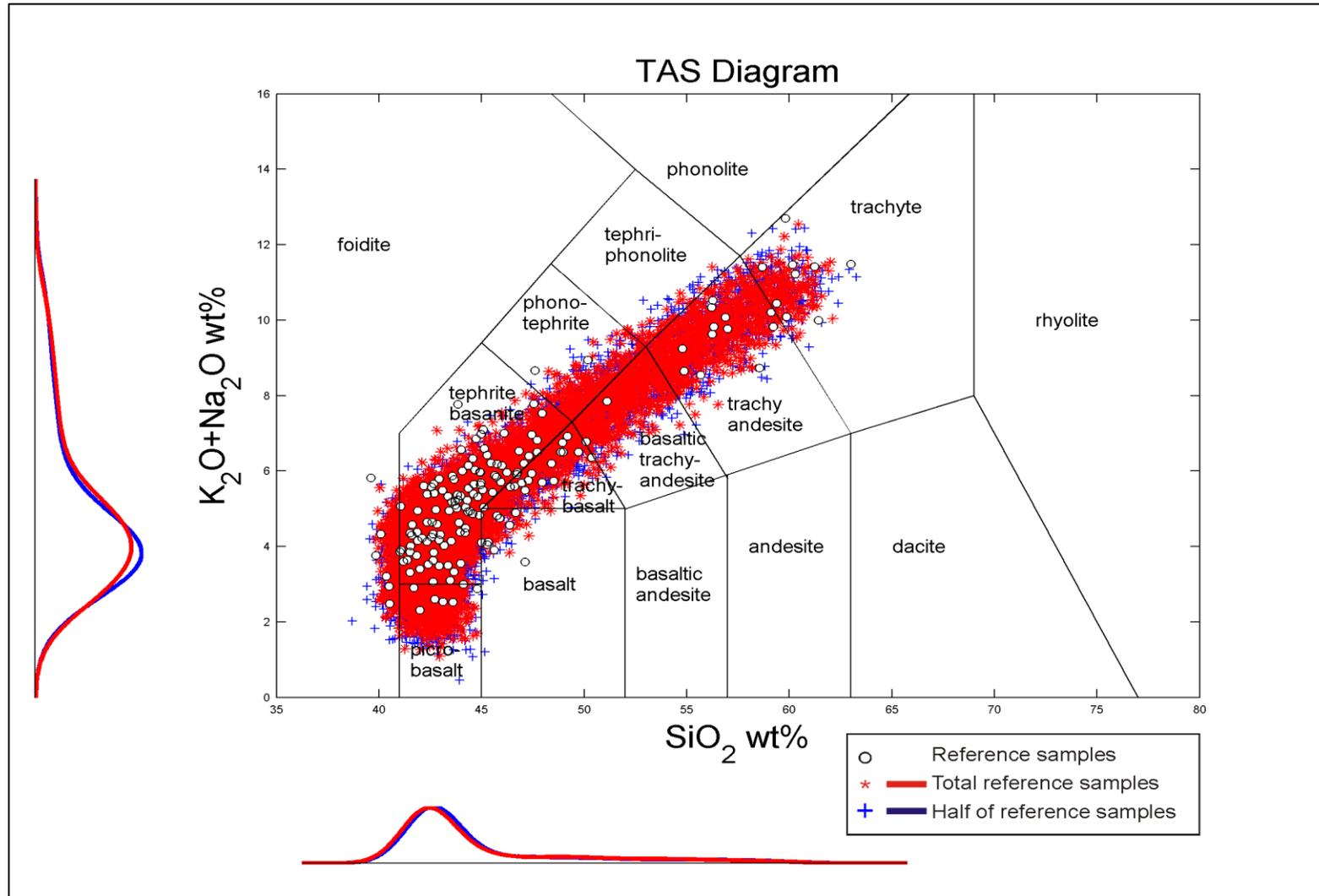


Figura 19. 10.000 simulaciones basadas en el total de las muestras (rojo), y 10.000 simulaciones basadas sobre la mitad de las muestras (azul).

- Validación cruzada. La estimación del error calculado a través del cálculo de la validación cruzada indica que la estimación del error es inferior al 2%.

### Simulador de volúmenes de magma

La verificación de la simulación de los volúmenes de magma no es posible ya que no se tienen los suficientes datos de entrada para realizar una validación estadística (Figura 20). En la actualidad, no se ha hallado una relación entre los volúmenes de lava medidos y su distribución espacio-temporal. La simulación de volúmenes basada en una función de una de densidad de probabilidad ha simulado los volúmenes de forma estocástica como aproximación al problema.

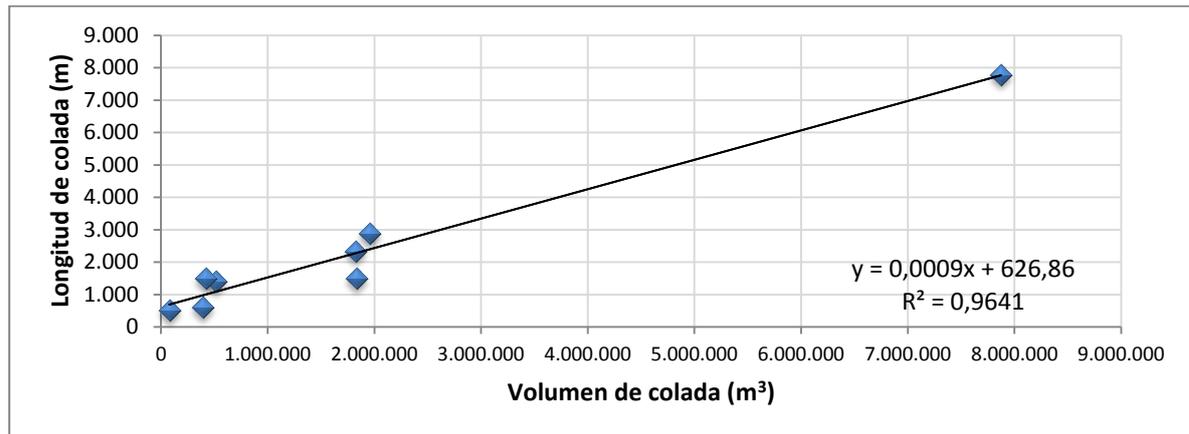


Figura 20. Distribución de los datos medidos que establece una relación entre los volúmenes medidos y longitud de colada.

### Validación del simulador ELAM

La validación del simulador ELAM se ha realizado mediante la comparación entre el solape de la superficie de una colada real y la simulada. Se ha escogido como zona de validación, una colada situada en la zona de Nisdafe (zona NE de El Hierro) en el agrupamiento volcánico de Las Tabladas situado en las coordenadas 28R (207344, 3077918) con una altitud de 920 msnm (Figura 21). Este pequeño agrupamiento tiene una única colada de longitud de 1,4 km, volumen máximo de 400.000 m<sup>3</sup>, dirección N20°O, buzamiento 10°S, con un desnivel de 247 m y una pendiente media del 17%.

Para la validación, se ha simulado mediante ELAM el volumen de esta lava en las coordenadas 28R (07349, 3077915) con un volumen a simular de 400.000 m<sup>3</sup>, sobre un MDE de tamaño de celda de 5 m. El resultado (Figura 21) muestra una coherencia de solape entre la lava simulada vs. real muy elevada (superior al 90%). Sin embargo, la simulación ha cubierto áreas fuera de la colada cartografiada y el resultado de la simulación arroja un volumen final simulado de 660.000 m<sup>3</sup>, superior al real en 260.000 m<sup>3</sup>. La fuerte antropización del medio físico ha modificado la topografía original por lo que el MDE utilizado no coincide con el existente en el momento de la erupción de la colada. Esto se traduce en que pequeñas modificaciones en el MDE pueden producir grandes variaciones en el resultado final. Además, el simulador ELAM en la versión actual produce una sobreestimación del volumen con objeto de cubrir la mayor área posible.

En conclusión podemos validar el algoritmo de ELAM, ya que el solape área simulada/área real es superior a 0,9 y los volúmenes simulados aunque sobreestimados son acordes en orden de magnitud y el área cubierta. Es posible en futuras mejoras del algoritmo, que se pueda optimizar mejor el parámetro del volumen y así mejorar el solape entre área simulada vs. área real. Las limitaciones actuales que imponen los modelos digitales de elevación y la calidad de los mismos influyen

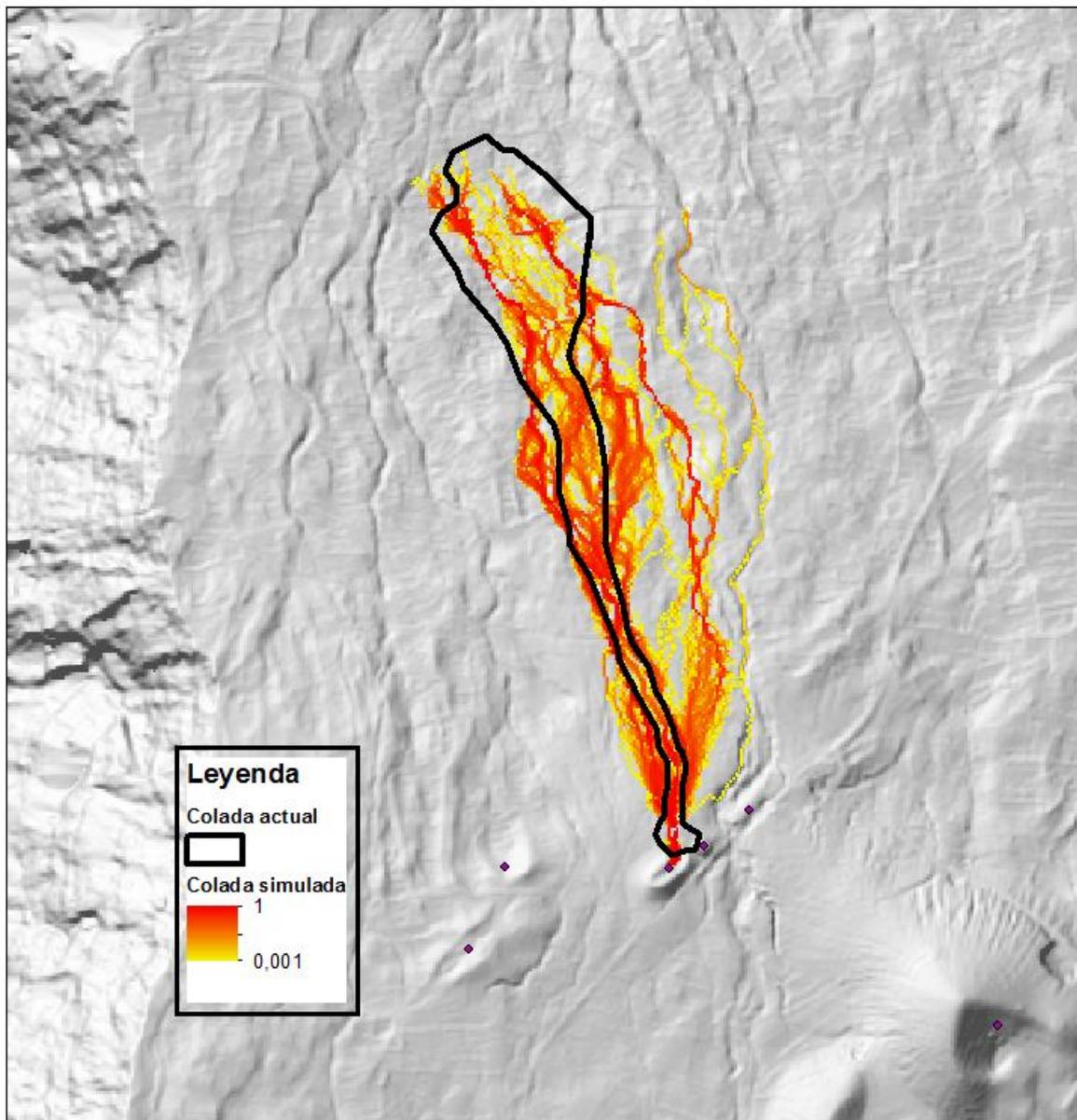


Figura 21. Simulación de la colada mediante el simulador ELAM y solape sobre la cartografía

directamente en el resultado final de la distribución de la lava. Así las estructuras antrópicas como pontones, puentes, tajeas, pasos inferiores no son contemplados y producen serias desviaciones en las trayectorias de las lavas.

## 5. Resultados y conclusiones

La metodología para realizar los mapas de riesgo volcánico en la zona piloto de la isla de El Hierro ha seguido la definición propuesta por la UNESCO (1972). Los peligros volcánicos inicialmente propuestos fueron los flujos de lava, proyección balística de bombas y nubes de ceniza. Sin embargo, la falta de datos solo ha permitido afrontar el estudio de la peligrosidad por flujos de lava. No obstante, se ha desarrollado un algoritmo para la simulación de piroclastos de proyección balística en el futuro. La dispersión de cenizas no se ha incluido en este trabajo principalmente por falta de datos históricos y geológicos que permitan discernir cuál ha sido el comportamiento de este fenómeno en el pasado. No se han desarrollado modelos específicos para este peligro porque ya existen programas adecuados en el mercado.

La metodología desarrollada ha permitido la obtención de la cartografía de susceptibilidad volcánica (probabilidad de apertura de un nuevo centro de emisión) que, además de su uso para el análisis de peligrosidad de flujos de lava, constituye la base para estudios futuros de otros peligros volcánicos.

La cartografía de peligrosidad por flujos de lava en El Hierro ha sido posible gracias al desarrollo de algoritmos como el MOVAM (*MONogenetic VolcAnoes Modeler*) y el ELAM (*Enhanced LAva Model*). El MOVAM permite obtener en base a la información geológica incluida en la base de datos los parámetros necesarios para simular los escenarios de flujos de lava en función del periodo de recurrencia. El ELAM es un nuevo modelo de simulación de flujos de lava que presenta como principales avances la disminución del coste computacional y del número de parámetros de entrada, la capacidad de las lavas para emplazarse por zonas llanas y para rellenar y salir de depresiones y el uso de MDE de tamaño de celda reducido.

Con el fin de poder realizar una aproximación real al riesgo se ha asumido el valor máximo para la vulnerabilidad de los bienes expuestos, ya que las lavas suelen destruir o inutilizar todas las infraestructuras que encuentran en su paso. Se ha desarrollado la metodología para el cálculo del riesgo, aunque no se ha realizado su cartografía por la falta de datos disponibles.

La metodología propuesta en este trabajo ha sido validada en la isla de El Hierro a escala 1:5.000 y puede ser aplicada a nivel mundial en campos volcánicos monogenéticos.

## 6.- Bibliografía

- Becerril, L., Cappello, A., Galindo, I., Neri, M., & Del Negro, C. (2013). Spatial probability distribution of future volcanic eruptions at El Hierro Island (Canary Islands, Spain) . *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 257(0), 21-30. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027313000723>
- Bertino, E., Damiani, M. a., Norini, G., Aldighieri, B., Borgonovo, S., Comoglio, F., & Pasquaré, G. (2006). Modelling Lava Flow To Assess Hazard On Mount Etna (Italy). From Geological Data To A Preliminary Hazard Map. Gianluca Groppelli. En A. J. Alexey Voinov, & A. E. Rizzoli (Ed.), *Environ Modell Softw*. Obtenido de <http://www.iemss.org/iemss2006/sessions/s11.html>
- Carracedo, J. C., Day, S. J., Guillou, H., & Perez Torrado, F. J. (december de 1999). Giant Quaternary landslides in the evolution of La Palma and El Hierro, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 94(1-4), 169-190. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037702739900102X>
- Condit, C. D., & Connor, C. B. (1996). Recurrence rates of volcanism in basaltic volcanic fields: An example from the Springerville volcanic field, Arizona. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 108(10), 1225-1241. Obtenido de <http://gsabulletin.gsapubs.org/content/108/10/1225.abstract>
- Connor, C. B., & Hill, B. E. (1995). Three nonhomogeneous Poisson models for the probability of basaltic volcanism: Application to the Yucca Mountain region, Nevada. *J. Geophys. Res. Sol. Ea.*, 100(B6), 10107-10125. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1029/95JB01055>
- Connor, C., & Conway, F. (2000). Basaltic volcanic Fields. En H. Sigurdsson (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 331-343). New York: Academic Press. Obtenido de <http://www.cas.usf.edu/~cconnor/hazards/art4/art4.html>
- Costa, A., & Macedonio, G. (2005). Computational modeling of lava flows: A review. *Geol. Soc. Spec. Pap.*, 396, 209-218. Obtenido de <http://specialpapers.gsapubs.org/content/396/209.abstract>
- Felpeto, A., Marti, J., & Ortiz, R. (oct de 2007). Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 166(2), 106-116. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027307002247>
- Folch, A., Costa, A., & Macedonio, G. (2009). FALL3D: A Computational Model for Volcanic Ash Transport and Deposition. *Comput. Geosci.*
- Lain, L., Bellido, F., Perez, F., Galindo, I., Mancebo, M. J., & Llorente, M. (2008). Cartografía de peligrosidad volcánica de Tenerife a escala 1:25.000. *Geo-Temas 10*, (págs. 1433-1436).
- Martin, A. J., Umeda, K., Connor, C. B., Weller, J. N., Zhao, D., & Takahashi, M. (2004). Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc, Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 109(B10), n/a--n/a. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1029/2004JB003201>

Masson, D. G. (1996). Catastrophic collapse of the volcanic island of Hierro 15 Ka ago and the history of landslides in the Canary Islands. *Geology*(24), 231-234.

Ortiz, R. (1996). *Riesgo Volcánico* (Vol. 5). (R. Ortiz, Ed.)

Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Stephen, R., Rymer, H., & Stix, J. (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press. Obtenido de <https://irma.nps.gov/App/Reference/Profile/643156>



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España



Programa INNPACTO  
del Ministerio de Ciencia  
e Innovación

# HERRAMIENTA AVANZADA PARA GESTIÓN CUANTITATIVA DE RIESGOS GEOLÓGICOS

## INUNDACIONES

Responsable:  
Luis Laín Huerta (IGME)

# ÍNDICE

---

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS .....	9
3.	BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS PILOTO .....	10
4.	METODOLOGÍA.....	13
4.1	DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL.....	13
4.2	FASES DE LA METODOLOGÍA.....	15
A.	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	15
B.	ESTUDIO CARTOGRÁFICO. PROCESADO DEL TERRENO .....	16
C.	ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO.....	19
D.	PELIGROSIDAD.....	35
E.	VULNERABILIDAD .....	40
F.	RIESGO ESPECÍFICO .....	49
4.3	CONSTRUCCIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CÁLCULO Y RELACIÓN CON EL SOFTWARE ESPECÍFICO .....	51
4.4	CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE RIESGOS DE INUNDACIONES .....	56
5.	RESULTADOS .....	59
5.1	Resultados del Modelo Conceptual .....	59
5.2	Resultados en las fases de la Metodología .....	61
5.3	Resultados de los Algoritmos de Cálculo .....	77
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	79
7.	CONCLUSIONES .....	81
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Cuadro sinóptico de los principales grupos de métodos para el análisis de la peligrosidad de inundaciones y sus relaciones mutuas (modificado y ampliado de Díez-Herrero, 2002c y Díez-Herrero, 2008). .....	7
Figura 2. Mapa de situación de la zona de estudio de El Hierro. ....	10
Figura 3. Mapa de situación de la zona de estudio de Panticosa. ....	11
Figura 4. Mapa de situación de la zona de estudio de San Andrés. ....	12
Figura 5. Esquema básico del Modelo Conceptual del Módulo de Inundaciones .....	14
Figura 6. Comparación de Modelos Digitales del Elevaciones con y sin vegetación .....	19
Figura 7. Detalle de una malla de cálculo. ....	34
Figura 8. Gráfico de estimación de rangos y valores de las diferentes zonas de inundación o daño para las personas. Fuente: Guía metodológica para la elaboración de mapas de peligrosidad por inundaciones .....	37
Figura 9. Tabla de atributos de la capa T_POLIGONOS .....	44
Figura 10. Campos generados en el shp del SIOSE. ....	45
Figura 11. Representación del shp de polígonos del SIOSE. ....	46
Figura 12. Capas de la cartografía 1:5000 en formato polígono sobre la capa del SIOSE .....	47
Figura 13. Diagrama de clasificación de los elementos de un ModelBuilder. Fuente: ArcGIS Resource Center. ....	52
Figura 14. Esquema del ModelBuilder del Procesado del Terreno .....	53
Figura 15. Esquema del ModelBuilder de la Peligrosidad por Inundaciones .....	54
Figura 16. Esquema del Model Builder del Riesgo Específico .....	55
Figura 17. Modelo Conceptual del Módulo de Inundaciones .....	60
Figura 18. Modelo Digital de Sombras de la cuenca del Abanico de El Hierro. Tamaño de pixel de 5m. ....	62
Figura 19. Modelo Digital de Sombras de la zona de estudio en detalle del Abanico de El Hierro. Tamaño de pixel de 0,5 m .....	63
Figura 20. Modelo Digital de Sombras del Término Municipal de Panticosa. Pixel 5 m. ....	64
Figura 21. Modelo Digital de Sombras del núcleo de población de Panticosa. Pixel 0,5 m. ....	65
Figura 22. Modelo Digital de Sombras del Barranco de San Andrés. Pixel 5 m. ....	66
Figura 23. Modelo Digital de Sombras de la zona de detalle del Barranco de San Andrés. Pixel 0,5 m. ....	67
Figura 24. Cuencas y Red de Drenaje en el Abanico Aluvial de Las Playas (El Hierro) .....	70
Figura 25. Cuencas y Red de Drenaje en Panticosa (Huesca) .....	71
Figura 26. Cuencas y Red de Drenaje Principales en San Andrés (Tenerife) .....	72
Figura 27. Subcuencas y Red de Drenaje estudiados en la modelación hidrológica-hidráulica en San Andrés (Tenerife) .....	73

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Valores asignados del coeficiente de rugosidad de Manning .....	35
Tabla 2. Umbrales de profundidad del Factor Calado.....	38
Tabla 3. Umbrales del Factor del Producto.....	38
Tabla 4. Ponderación de la frecuencia de la avenidas .....	39
Tabla 5. Ponderación de la Vulnerabilidad de las coberturas de usos del suelo .....	48
Tabla 6. Nivel de Riesgo Específico en función de la vulnerabilidad y la peligrosidad .....	50
Tabla 7 . Caudal punta y precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en la zona de El Hierro .....	68
Tabla 8. Caudal punta y precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en la zona de Panticosa.....	69
Tabla 9. Caudal punta y precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años para las subcuencas del Barranco de San Andrés.....	69

# MODEL RISK: AVENIDAS TORRENCIALES

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El riesgo natural puede ser definido como la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural (Olcina y Ayala, 2002).

Los riesgos naturales pueden ser clasificados en cinco grandes grupos, siendo el riesgo por inundaciones o por avenidas torrenciales un tipo de riesgos hidrometeorológico (natural-antrópico).

En el presente informe se desarrollan los trabajos realizados en el marco del Módulo de Inundaciones (PT5) del proyecto Modelrisk (Herramienta avanzada para la estandarización en la evaluación y gestión de riesgos naturales basada en cartografía cuantitativa).

El análisis de riesgos es una disciplina científico-técnica cuyo objeto es la identificación y análisis de los factores de riesgo (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad). La **Fórmula del Riesgo** que permite una evaluación cuantitativa del mismo queda definida mediante la siguiente fórmula:

$$R = P \times E \times V$$

Donde, R o Riesgo puede definirse como el daño o pérdida esperable a consecuencia de la acción de un peligro sobre un bien a preservar, sea la vida humana, los bienes económicos o el entorno natural.

Asimismo cabe definir el concepto de Peligrosidad (P) como el conjunto formado por la severidad y probabilidad de un proceso o fenómeno de carácter natural o tecnológico que puede originar daños a la población, los bienes materiales o el medio ambiente natural.

Los demás factores que forman parte del trinomio del riesgo son: la Exposición (E) o conjunto de bienes a preservar que pueden ser dañados por la acción de un Peligro y la Vulnerabilidad (V) o tanto por uno de pérdida esperable de un determinado bien expuesto. La vulnerabilidad es función de la severidad y de las medidas de prevención, tanto estructurales como no estructurales.

Del mismo modo puede ser definido el **Riesgo Específico** o unitario  $R_s$  como el riesgo por unidad de exposición. (Ayala-Carcedo, 2002). En el que entran en juego los factores de peligrosidad y vulnerabilidad.

$$R_s = P \times V$$

El riesgo específico es de utilidad en la ordenación del territorio y a la hora de priorizar las actuaciones que deben llevarse a cabo para mitigar las situaciones que puedan presentar un mayor riesgo unitario. También resulta de interés en aquellas zonas que están en expansión y que por lo tanto aún carecen de exposición.

Dado que el objeto del presente informe es el desarrollar el módulo de trabajo de inundaciones, a continuación se va a definir una serie de conceptos en la materia así como establecer las líneas básicas para el estudio de las mismas.

Las **inundaciones** constituyen el fenómeno natural que a lo largo del tiempo ha causado mayores impactos sobre las poblaciones produciendo daños tanto materiales como en pérdida de vidas humanas.

Además, cabe destacar que las inundaciones son el proceso que en un corto espacio de tiempo (horas o días) generan el mayor volumen de pérdidas económicas y un mayor número de víctimas. En los últimos cuarenta años se han producido en el conjunto del territorio español una avenida grave cada 5 años (comisión Técnica de Emergencias para Inundaciones CTEI, 1983). (Pujadas Ferrer, 2002).

Los peligros por inundación afectan prácticamente a toda la geografía española, centrándose especialmente en las costas mediterránea y cantábrica y en los espacios fluviales de los grandes ríos peninsulares. Asimismo, es de destacar el incremento de los daños generados por las inundaciones que se ha producido en los últimos decenios (Pujadas Ferrer, 2002).

La existencia del riesgo por inundaciones conlleva la necesidad de hacer frente a los daños causados por dichos procesos. Desde el siglo XX la gestión del riesgo por inundaciones fue desarrollada en torno a tres políticas básicas:

- Gestión post-catástrofe
- Control del Fenómeno Natural
- Prevención del fenómeno y gestión del espacio fluvial.

El estudio de la peligrosidad por inundaciones constituye una herramienta o técnica preventiva que pueden servir de punto de partida para la aplicación de medidas de mitigación o preventivas del riesgo de inundación.

Existen diversos tipos de inundaciones, pudiendo distinguir en función de su origen, las inundaciones antrópicas o naturales y dentro de estas últimas entre terrestres y litorales (Díez-Herrero *et al.* 2008). Las avenidas torrenciales, fenómeno estudiado en

el presente estudio, son la causa de un tipo de inundación terrestre vinculada a la red fluvial. Estas avenidas son especialmente significativas en la isla de El Hierro y en Santa Cruz de Tenerife (zonas de estudio piloto), ambas de abrupto relieve, presentando numerosos barrancos donde, bajo intensas precipitaciones pueden generarse avenidas fluviales súbitas o relámpago (*flash floods*).

El análisis de la peligrosidad de inundaciones se puede realizar empleando de forma combinada y complementaria una serie de técnicas y procedimientos, que a grandes rasgos pueden agruparse en tres aproximaciones metodológicas: métodos históricos y paleohidrológicos, métodos geológicos y geomorfológicos, y métodos hidrológicos e hidráulicos (Díez-Herrero, 2002a). A parte están los métodos mixtos y los de fundamento botánico o ecológico, como los dendrogeomorfológicos y los liquenométricos (Díez-Herrero et al., 2008). Un esquema con las principales metodología y su interrelación puede verse en la Figura 1.

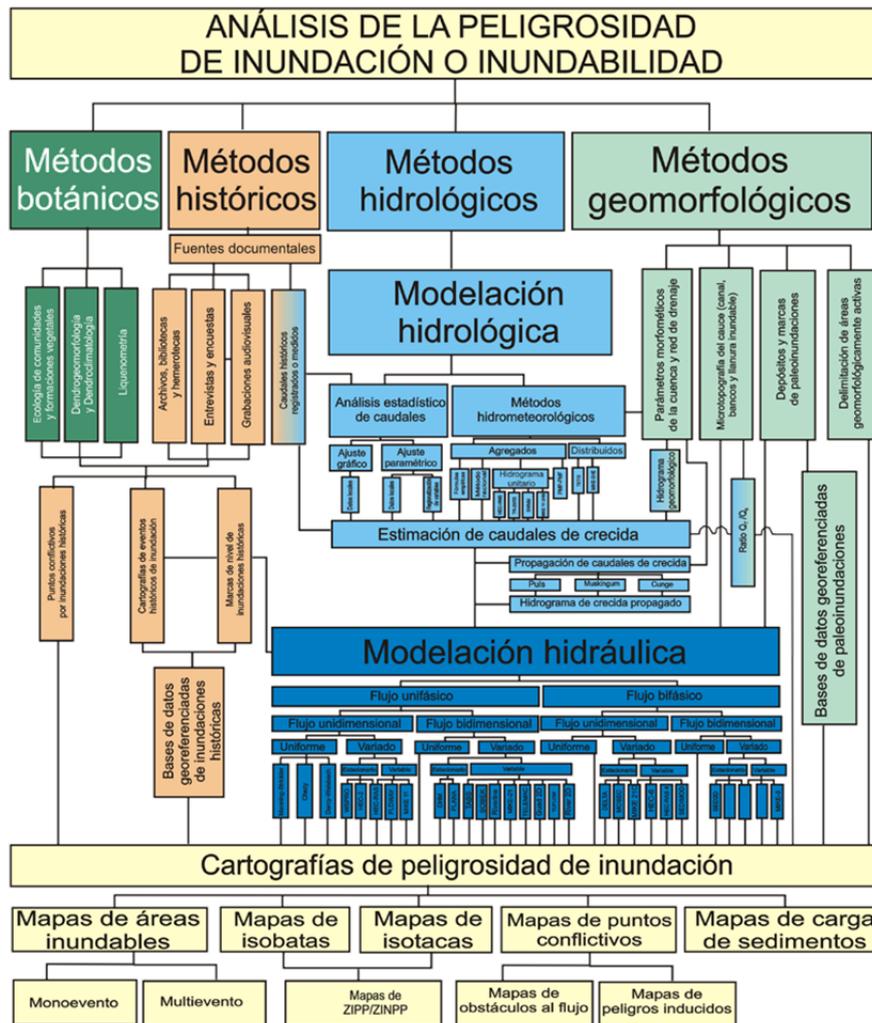


Figura 1. Cuadro sinóptico de los principales grupos de métodos para el análisis de la peligrosidad de inundaciones y sus relaciones mutuas (modificado y ampliado de Díez-Herrero, 2002c y Díez-Herrero, 2008).

➤ Métodos históricos:

Basados en el análisis de marcas y placas sobre elementos artificiales, documentación histórica y testimonios para la reconstrucción de una crecida ocurrida en el periodo histórico. Entre los principales objetivos de este método se encuentran la delimitación de crecidas históricas y los análisis estadísticos de caudales históricos y asignación de una probabilidad de ocurrencia.

➤ Métodos paleohidrológicos del registro geológico:

Basados en el empleo de determinados tipos de depósitos o marcas de inundaciones pretéritas en relación con elementos datables mediante técnicas paleontológicas, dendrocronológicas, radiométricas, o arqueológicas. En combinación con la modelación hidráulica puede asignarse una determinada probabilidad de ocurrencia a los eventos generadores de los depósitos.

➤ Métodos geológico-geomorfológicos:

Apoyándose en la disposición y tipología de las formas del terreno y los depósitos generados durante o tras el evento de avenida permiten delimitar las áreas geomorfológicamente activas dentro del cauce fluvial y sus márgenes y que por tanto pueden ser susceptibles de ser inundadas.

➤ Métodos hidrológicos e hidráulicos:

Se fundamentan en la estimación de los caudales generados en una cuenca y en el cálculo de los parámetros hidráulicos (velocidades y calados) del caudal circulante.

Los métodos hidrológicos pueden abordarse desde el estudio de la información de caudales, mediante la aplicación de análisis estadístico; o desde el estudio de la información pluviométrica a partir de modelos hidrometeorológicos que transforman la precipitación en escorrentía (Método racional, hidrograma unitario, PMP-PMF, onda cinemática...)

Estas metodologías no sólo no son excluyentes sino que deberían emplearse de manera integrada para una correcta aproximación al estudio de inundaciones.

El principal factor limitante para el empleo de las metodologías anteriormente descritas es el acceso a la información necesaria. Debido a la fuente de datos disponible en el presente proyecto, se ha optado por el empleo de una metodología hidrológico-hidráulica complementada, en caso de ser posible, con criterios morfométricos. Esta metodología, que será desarrollada en apartados sucesivos, constituye un ejemplo para el estudio de las inundaciones en las zonas piloto. Cabe decir que, en el caso del estudio de peligrosidad por inundaciones en otras zonas, con diferentes características y distinta disponibilidad de los datos, se deberá emplear la metodología que mejor se ajuste a la zona en cuestión.

## 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

La justificación del proyecto viene dada por la necesidad de crear una herramienta que facilite la labor de los agentes interesados en la evaluación de la peligrosidad y el riesgo asociado a diferentes fenómenos naturales, entre los que se encuentran las inundaciones.

El principal objetivo del proyecto es el desarrollo de un prototipo de herramienta que permita evaluar y gestionar los riesgos naturales de manera objetiva. Este módulo se centra en la peligrosidad por avenidas torrenciales o inundaciones.

Tradicionalmente la gestión del riesgo por inundaciones en España ha estado muy ligada a las catástrofes ocurridas. Es por ello por lo que, en aplicación de las nuevas Directrices de la UE y la legislación española que la traspone, es necesario un mayor acercamiento a la gestión de las inundaciones que ayuden a una correcta prevención y control del fenómeno natural.

Este Módulo tiene como objetivo establecer una metodología y una herramienta que facilite la labor de los gestores a la hora de realizar estudios de riesgo y peligrosidad por inundaciones.

### 3. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS PILOTO

Para una adecuada implementación de las herramientas creadas, así como validación de los resultados es necesario realizar, de manera paralela a la determinación de la herramienta, un estudio en determinadas zonas piloto que sirva de ejemplo para el establecimiento de una metodología. Esta metodología deberá adaptarse a la zona que sea objeto de estudio.

Las zonas de estudio en materia de peligrosidad por inundaciones son:

- Abanico Aluvial Las Playas (El Hierro)

Situada en el extremo más suroccidental del archipiélago canario, La isla de El Hierro con unos 270 km<sup>2</sup>, es la isla más pequeña del mismo. Presenta una topografía contrastada con acantilados que llegan a alcanzar los 1.400 m.s.n.m., frecuentes rupturas de pendientes y elevados desniveles. A todo ello se debe unir los peculiares rasgos morfolitológicos de los sustratos volcánicos presentes y el particular régimen de precipitaciones. Las características morfométricas de la isla y su elevado carácter torrencial da lugar a la existencia de formaciones aluviales del tipo abanicos situados, en la mayor parte de los casos, al pie de los escarpes.

El abanico objeto de estudio está situado en el arco principal de la zona denominada Las Playas, es un abanico de génesis torrencial, de gran complejidad morfológica y con pendientes interiores elevadas. La superficie del abanico es de unos 0,32 km<sup>2</sup> y cuenta con una cuenca vertiente de unos 3,9 km<sup>2</sup>.

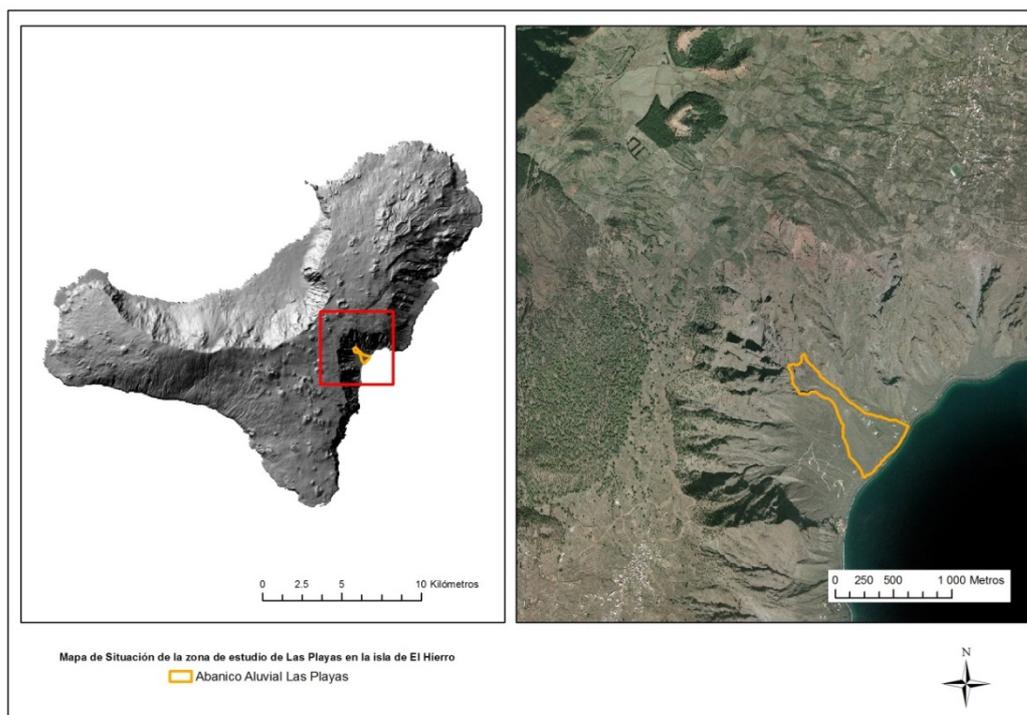


Figura 2. Mapa de situación de la zona de estudio de El Hierro.

➤ Tramo fluvial en Panticosa (Huesca)

El término municipal de Panticosa se encuentra situado en la parte septentrional de Huesca, está ubicado en el Pirineo Central, en la vertiente aragonesa. Está caracterizado por presentar fuertes desniveles y relieve abrupto. Panticosa pertenece a la Confederación Hidrográfica del Ebro y se encuentra dentro de la cuenca del Alto Gállego. La superficie del término municipal con unos 97 km<sup>2</sup>, constituye, prácticamente en su totalidad con la cuenca de aporte del río Caldarés hasta su desembocadura en el embalse de Búbal. A su paso por el núcleo de población de Panticosa, se une como tributario en su margen izquierda el río Bolática.

La zona de estudio en detalle, considerada en la modelación hidráulica, engloba la confluencia de los ríos Caldarés y Bolática. Ambos ríos, aguas arriba y aguas abajo de su unión presentan un cauce encajado. El tramo en estudio perteneciente al río Caldarés es de aproximadamente un kilómetro de longitud.

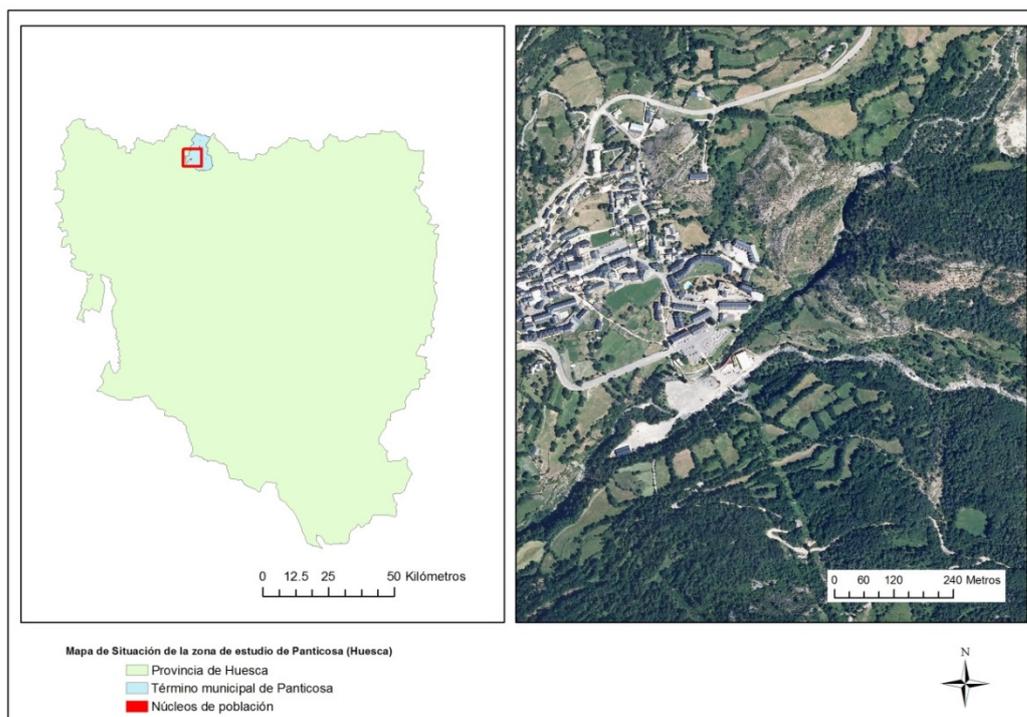


Figura 3. Mapa de situación de la zona de estudio de Panticosa.

➤ Barranco de San Andrés (Santa Cruz de Tenerife)

El barranco de San Andrés se encuentra situado en la isla de Tenerife, en el Término Municipal de Santa Cruz de Tenerife. Es un barranco de la vertiente sur del macizo de Anaga situado en el valle de San Andrés.

La zona de estudio consta de dos barrancos, el Barranco de San Andrés o Barranco del Cercado y el Barranco de las Huertas, que confluyen 200 m antes de su desembocadura al mar. La superficie de la cuenca de aporte es de unos 16 km<sup>2</sup> en su desembocadura al mar.

En la margen derecha del barranco de San Andrés, cerca de su desembocadura, se encuentra el núcleo de población. Históricamente se han producido numerosas inundaciones que han dado lugar a que parte del tramo bajo del barranco se encuentre canalizado.

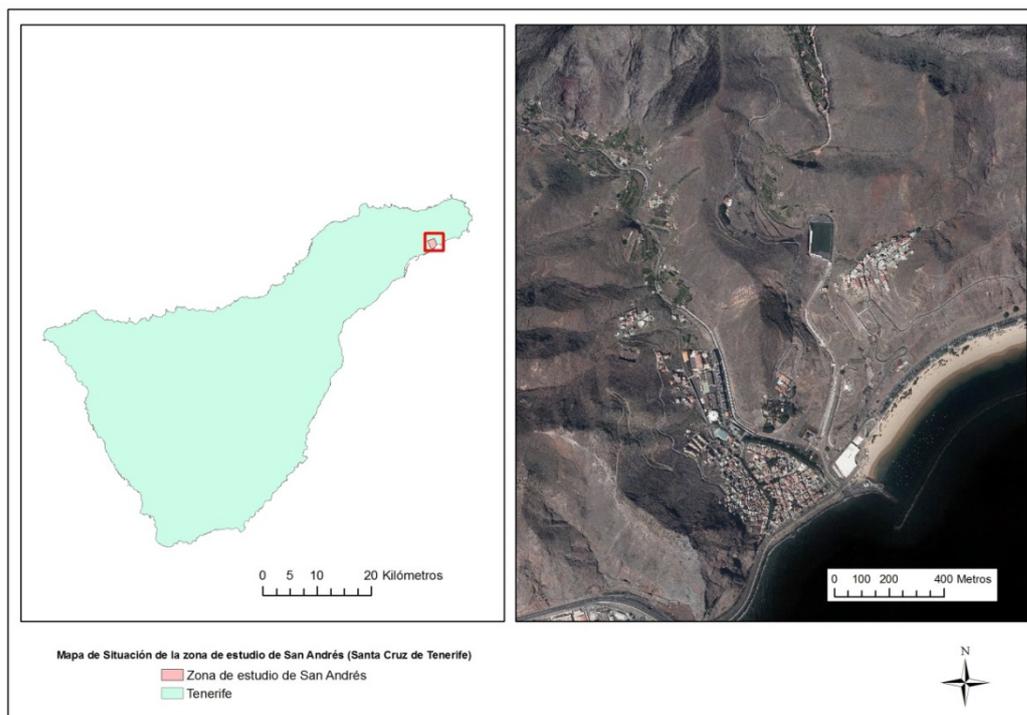


Figura 4. Mapa de situación de la zona de estudio de San Andrés.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual tiene como objetivo general obtener un esquema conceptual que permita representar de forma esquemática los procesos llevados a cabo en el proyecto. El modelo proporciona un marco de referencia para relacionar las diferentes fases de las que consta el Módulo de Inundaciones.

La finalidad del modelo es caracterizar cuáles son los pasos clave en el módulo de inundaciones. Por ello, cabe recordar que los objetivos del proyecto son; establecer una herramienta que permita determinar la peligrosidad por inundaciones mediante la implementación de un índice que asigne un valor numérico normalizado; y determinar el riesgo específico por inundaciones a partir de la peligrosidad y la vulnerabilidad mediante el establecimiento de unos criterios extrapolables a diferentes zonas.

El paso fundamental para la determinar la peligrosidad por avenidas torrenciales es la realización de los estudios de inundación en las zonas piloto. Estos estudios tienen por finalidad caracterizar las avenidas torrenciales que se puedan producir así como determinar los parámetros básicos que permitan definir la peligrosidad en la zona. Los parámetros que permiten una buena caracterización de las avenidas fluviales y que han sido empleados en el presente proyecto son la velocidad y el calado de la avenida.

Debido a las particularidades de cada zona y a la imposibilidad de establecer un único criterio para realizar el estudio hidrológico-hidráulico, parte de este proceso se realizará por el usuario mediante un software externo para obtener los parámetros necesarios que sirvan de entrada en el Model Builder, donde se obtendrá el índice de peligrosidad por inundaciones para la zona de estudio.

Los trabajos para la determinación de la herramienta para el cálculo de la peligrosidad y riesgo específico se apoyan en los estudio de las zonas piloto. Estos estudios resultan necesarios para el ajuste de la herramienta y la validación de la misma.

El esquema básico del modelo conceptual está representado en la figura 5 donde se contemplan las distintas fases del módulo de inundaciones:

1. Obtención de las capas base, es decir, los modelos digitales del elevaciones (MDE) de la cuenca hidrográfica y de la zona de estudio en detalle. Estos modelos, en función de la información disponible pueden ser obtenidos directamente o ser generados a partir de la cartografía topográfica de las comunidades autónomas o del Instituto Geográfico Nacional.
2. Preprocesado del terreno: El objetivo de esta fase es delimitar las principales cuencas y subcuencas así como de la red de drenaje de las zonas piloto. Esta fase será objeto de automatización mediante el desarrollo de un Model Builder.

3. Estudios hidrológico-hidráulicos de la zona de estudio. Esta fase presenta dos etapas fundamentales: el estudio hidrológico y el estudio hidráulico. En función de las características de la zona de estudio así como de la información disponible se empleará una metodología u otra con el objetivo de obtener los parámetros hidráulicos que definan las avenidas para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años. Para ello el usuario empleará el software externo que mejor se adapte a sus necesidades.
4. Peligrosidad por Inundaciones: A partir de los resultados del estudio hidráulico y mediante el Model Builder generado en este proyecto se obtendrá un índice de peligrosidad normalizado.
5. Riesgo Específico: La última fase del proyecto consiste en la obtención del Riesgo Específico por inundaciones, esta etapa ha sido sistematizada mediante un Model Builder. Se basa en la combinación del resultado del modelo del índice de peligrosidad y la capa de vulnerabilidad. La vulnerabilidad se fundamenta en la cartografía del SIOSE de usos del suelo y en la cartografía 1:5.000 procedente de las comunidades autónomas, el usuario reclasificará los usos del suelo en función de su mayor o menor vulnerabilidad frente a las inundaciones mediante los criterios establecidos en la memoria.



Figura 5. Esquema básico del Modelo Conceptual del Módulo de Inundaciones

Todas estas fases son detalladas en el apartado 4, donde se desarrolla la metodología.

En el apartado 5.1 se muestra el resultado final del modelo conceptual que será integrado en la herramienta del proyecto implementada a través del ArcGIS Server.

## 4.2 FASES DE LA METODOLOGÍA

En este apartado se recogen los diferentes pasos seguidos para realizar el estudio de inundaciones. La metodología propuesta se basa en el estudio realizado en las zonas piloto y recoge los pasos fundamentales descritos en el modelo conceptual que son la base de la herramienta o algoritmo que se detallará en apartados sucesivos.

Las principales fases del estudio son las siguientes:

- A. Recopilación de la información
- B. Estudio cartográfico. Procesado del Terreno.
- C. Estudio hidrológico-hidráulico.
- D. Peligrosidad
- E. Vulnerabilidad
- F. Riesgo específico

### A. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información que constituye la base del estudio de peligrosidad por inundaciones está compuesta por la cartografía topográfica y temática disponible proporcionada por las administraciones públicas competentes en la materia, así como por la información meteorológica de las estaciones pluviométricas. Las principales fuentes de datos del proyecto han sido el Instituto Geológico y Minero de España, el Instituto Geográfico Nacional, la Agencia Española de Meteorología, el Gobierno de Canarias y el Gobierno de Aragón.

A continuación se describen los principales datos empleados en el marco del proyecto:

- Base Cartográfica Numérica a escala 1: 25.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Datos LIDAR del Instituto Geográfico Nacional en las zonas piloto de estudio.
- Cartografía planimétrica y altimétrica a escala 1:5.000 del Gobierno de Canarias (GRAFCAN).
- Cartografía planimétrica y altimétrica a escala 1:5.000 del Gobierno de Aragón.
- Modelo Digital de Elevaciones pixel de 5 m del Instituto Geográfico Nacional.

- Ortofotografías aéreas (GRAFCAN y Gobierno de Aragón).
- PNOA del Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Mapa Geológico del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Mapa de Ocupación del Suelo (GRAFCAN).
- Mapa de Ocupación del Suelo (SIOSE) del IGN.
- Serie histórica de precipitaciones de las estaciones pluviométricas de la Agencia Española de Meteorología.
- Isoyetas de Precipitaciones Máximas Diarias en Tenerife. Consejo de Aguas de Tenerife.

La base documental empleada aparece reflejada en el apartado de Referencias bibliográficas.

## **B. ESTUDIO CARTOGRÁFICO. PROCESADO DEL TERRENO**

El principal objetivo del análisis cartográfico es obtener la topografía de precisión necesaria para abordar los estudios de análisis del territorio en base a criterios hidrológico-hidráulicos.

El estudio ha sido afrontado a dos escalas, por un lado se han determinado los modelos digitales de elevaciones (MDE) a una escala de 1:5.000 o menor (en función de la información disponible) con el objetivo de delimitar las cuencas hidrográficas y realizar los estudios hidrológicos necesarios; y, por el otro lado, se ha realizado un MDE a partir de los datos LIDAR en cada una de las zonas piloto de estudio en detalle. Esta topografía de mayor detalle es necesaria para el análisis hidráulico.

Todos los trabajos cartográficos se apoyan en el empleo de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS 9.3). A continuación se describen con mayor detalle los pasos para la obtención de los Modelos Digitales de Elevaciones:

### **MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES**

La base que sustenta el análisis del territorio mediante sistemas de información geográfica son los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) (estructura numérica de datos que representa la distribución espacial la altitud de la superficie de un terreno). Existen diferentes MDE, entre los que se encuentran los Modelos Digitales del Terreno

(MDT), referidos a la altitud de la superficie terrestre y los Modelos Digitales de Superficies (MDS) que tienen en cuenta la elevación de no sólo el terreno sino también de otros elementos que cubren el suelo, como la vegetación o las infraestructuras.

En este caso vamos a abordar la creación de un MDT en base a la cartografía topográfica, pudiendo emplear la escala disponible por el usuario, bien sea la escala 1:5.000 (suministrada por las CCAA) o 1:25.000 (del Instituto Geográfico Nacional).

La metodología aplicada consiste en el análisis de la información topográfica, esto es, curvas de nivel, puntos acotados y líneas de ruptura, y su conversión de formato vectorial a formato raster. Como resultado del procesado de los datos se obtiene un Modelo Digital del Terreno (MDT). Esta metodología consta de las siguientes fases:

1. **Creación de una Red Irregular de Triángulos (TIN):**

A partir de las curvas de nivel y los puntos acotados, incluyendo los vértices geodésicos, y empleando la hidrografía, las infraestructuras lineales y línea de costa como elementos de ruptura, se crea un TIN de la zona.

El TIN se basa en la modelización del relieve a partir de triángulos irregulares que unen los puntos de muestreo de partida (nodos). Las estructuras TIN se calculan a partir del algoritmo de Delaunay, resultando una de las mejores formas que existen para representar y trabajar con formas irregulares como la superficie terrestre.

Los modelos TIN tienen la enorme ventaja de permitir la incorporación de líneas de ruptura de las pendientes (como ríos, acantilados, etc.), lo cual da lugar a una mayor precisión en el cálculo.

2. **Creación del modelo Digital de Elevaciones (MDE).** A partir del TIN se crea un mapa raster del terreno que permitirá un análisis más detallado del terreno.
3. **Generación de un modelo digital de sombras.** Este modelo digital de sombras se ha generado a partir del MDE suponiendo la fuente de luz situada con un ángulo azimutal de 315° y un ángulo de altitud de 45°. Presenta la ventaja de mostrar de manera visual el relieve de la zona.

Como se ha comentado, el estudio hidráulico requiere una topografía de mayor precisión, esta topografía se ha generado a partir de los datos LIDAR proporcionados por el IGN.

LIDAR (Light Detection And Ranging) es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado (ALS). Es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

La metodología empleada para la obtención del MDE a partir de la información LIDAR consta de las siguientes fases:

1. **Conversión a formato shape** de la nube de puntos LIDAR.
2. **Corrección geoidal**. Los puntos LIDAR proporcionan información de la altura elipsoidal de cada punto, lo que hace necesario el paso de alturas elipsoidales a ortométricas. Esta corrección ha sido realizada mediante el modelo de geoide EGM08-REDNAP.
3. **Reclasificación de los puntos**: una vez analizados los puntos de la zona de estudio se realizará una reclasificación de aquellos que, en base a observaciones en campo y al estudio de las ortofotografías aéreas, se considera que deben ser asignados a otra clase.
4. **Procesado y análisis del terreno**. Generación del Modelo Digital de Superficies (MDS) que se corresponde con la elevación máxima de todas las unidades de superficie y del Modelo Digital del Terreno (MDT). Para la generación del MDT se ha considerado la elevación de los puntos clasificados como suelo y edificaciones, eliminando del modelo la vegetación y los puentes.

El filtrado de los puntos de vegetación es necesario debido a que la creación del modelo con vegetación podría dar lugar a falsos obstáculos al paso de la avenida lo que causaría imprecisiones en la modelación hidráulica.

Para la generación de los modelos digitales en primer lugar se realizará un TIN (Red Irregular de Triángulos) a partir de la masa de puntos LIDAR, y posteriormente se creará un Modelo Digital de Elevaciones mediante la transformación del TIN a formato raster.

Del análisis de los datos LIDAR se llega a la conclusión de que poseen una densidad de puntos lo suficientemente buena como para generar MDEs con tamaño de pixel de 0,5m.

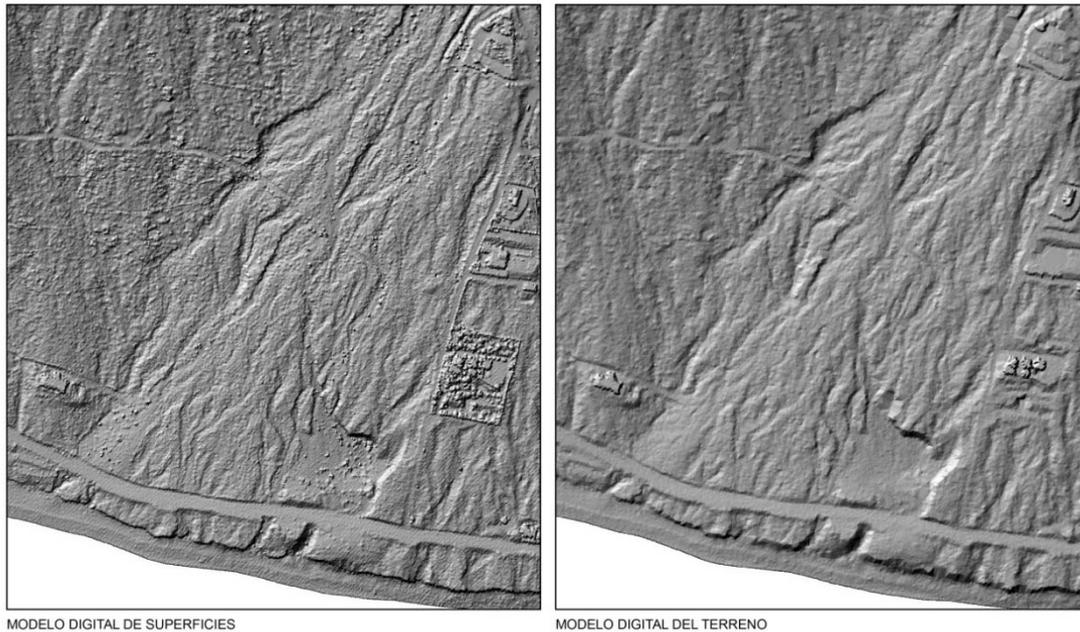


Figura 6. Comparación de Modelos Digitales del Elevaciones con y sin vegetación

## C. ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO

### *ESTUDIO HIDROLÓGICO*

La finalidad de los métodos hidrológicos es la caracterización temporal de los caudales de avenida, es decir la definición del hidrograma de crecida. Esta caracterización puede ser abordada desde diferentes puntos de vista en función de los datos de partida y la tipología necesaria de los datos finales.

El objetivo del estudio hidrológico es obtener los caudales de avenida para cada una de las cuencas hidrográficas cuya superficie drena a las zonas de estudio y para cada periodo de retorno (T) evaluado. Para el estudio de peligrosidad nos centraremos en los periodos de retorno estipulados por la “*Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de Inundaciones*” (T= 50, 100 y 500 años).

A modo informativo, comentar la existencia de diferentes métodos hidrológicos, que pueden clasificarse en:

➤ **Métodos directos:**

Permiten la caracterización de un hidrograma de crecida real registrado en una estación de aforos.

➤ **Métodos indirectos:**

- Técnicas empíricas: conjunto de fórmulas empíricas que relacionan los caudales punta de crecida que pueden registrarse en una corriente con el área de la cuenca drenante. (Fórmulas de Zapata, Fuller y Heras (1970)).
- Técnicas estadísticas o estocásticas: engloban tanto los métodos hidrometeorológicos como el análisis estadístico de caudales.

En la mayoría de las cuencas hidrográficas es frecuente la ausencia de datos foronómicos que permitan la caracterización de los caudales. Este es el caso de las zonas piloto de estudio. Por ello, y con el objetivo de establecer una metodología aplicable o extrapolable a un mayor número de zonas, se ha optado por el empleo de métodos hidrometeorológicos para la determinación de los caudales circulantes. Estos estudios se basan en la transformación de las variables meteorológicas (precipitaciones) en escorrentía superficial (caudales).

Los **métodos hidrometeorológicos** pueden dividirse según el grado de distribución espacial de los parámetros y variables que lo integran. Siguiendo esta tipología pueden clasificarse en:

- Métodos Hidrometeorológicos Agregados: consideran la cuenca hidrográfica como un elemento unitario, empleando parámetros hidrológicos promediados. Dentro de estos métodos se encuentra el Método Racional.
- Métodos Hidrometeorológicos Pseudodistribuidos: consideran como unidad de análisis las zonas homogéneas dentro de una misma cuenca. El método del hidrograma unitario en la aplicación HEC-HMS se encuentra dentro de esta tipología.
- Métodos hidrometeorológicos distribuidos: consideran la variación espacial de todos los parámetros hidrológicos. Como ejemplo de este método se encuentra la aplicación TETIS.

Para una adecuada estructuración de los pasos que engloban los estudios hidrológicos, se podría dividir los estudios hidrometeorológicos en dos fases:

- **Estudio meteorológico:** Tiene como finalidad principal obtener las precipitaciones máximas diarias para cada periodo de retorno.
- **Estudio hidrológico** propiamente dicho: Esta fase tiene como objetivo calcular los caudales generados por las precipitaciones estimadas.

Previa a estas dos fases, se podría añadir una tercera, denominada **Procesado del terreno**. Esta fase tiene como objetivo delimitar las cuencas hidrográficas del territorio objeto de estudio así como la red de drenaje de la misma

### **PROCESADO DEL TERRENO: Delimitación de las cuencas hidrográficas**

La división del área de estudio en cuencas hidrográficas es un paso fundamental para la discretización de la superficie del terreno en unidades básicas para el estudio de las inundaciones. Esta división es necesaria debido a que, para el cálculo de las avenidas, es fundamental la delimitación de las cuencas que drenan al área objeto de estudio.

La metodología empleada para la determinación de las cuencas hidrográficas se basa en el análisis del MDE del área de estudio. El objetivo de dicho análisis es obtener los mapas de dirección de flujo, flujo acumulado y delimitación de cuencas hidrográficas y su red de drenaje.

El tratamiento y procesado del terreno se realiza mediante la herramienta HEC-GeoHMS (software de uso libre desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU).

El procesado del terreno es primer paso para obtener los patrones de drenaje de la zona de estudio. Esta etapa consta de las siguientes fases:

1. **Relleno de las depresiones:** el objetivo de esta fase es la corrección hidrológica del terreno para su posterior procesamiento. Para ello se eliminan las falsas depresiones que han podido ser generadas en la creación del MDE.
2. **Mapa de dirección de flujo:** mediante este mapa se define la dirección de máxima pendiente a partir de la evaluación de las cotas de las celdas circundantes.
3. **Mapa de acumulación de flujo:** Representa el número de celdas que drena a cada celda.
4. **Definición de la red de drenaje:** Representa, para un umbral definido, los cauces principales por donde fluye el agua.

5. **Delineación de las cuencas**: entendiéndose cuenca como la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y eventualmente lagos hacia el mar por una única desembocadura, estuario o delta. Se delimitará el territorio en una serie de cuencas hidrográficas.

## **ESTUDIO METEOROLÓGICO**

Se basa en el análisis estadístico de las precipitaciones máximas diarias registradas en las estaciones pluviométricas situadas en la zona de estudio o próximas a ella. El análisis meteorológico necesita la existencia de series temporales de datos meteorológicos continuos, homogéneos y que abarquen el máximo intervalo temporal posible. Gran parte de estas series presentan lagunas de información por lo que los datos deben ser tratados para su correcto análisis.

En cada estación meteorológica se realiza un análisis estadístico de las precipitaciones. Dicho análisis requiere la selección del tipo de distribución y el método de estimación de parámetros y cuantiles que mejor se ajuste a los datos registrados. Existen diferentes funciones de distribución de frecuencia de ajuste paramétrico, entre las que se encuentran: Normal, Gumbel, SQRT, LogPEARSON III y GEV.

- **Función Normal**:

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

- **Función Gumbel**:

$$F(x) = e\left[-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}\right]$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e\left[\frac{x-u}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}\right]$$

- **Función SQRT**: Ajuste de los parámetros de forma y escala mediante el método de máxima verosimilitud.

$$F(x) = e^{-k \cdot \left[ (1 + \sqrt{\alpha \cdot x}) \cdot e^{-\sqrt{\alpha \cdot x}} \right]}$$

$$x \geq 0$$

- Función de valores extremos generalizada (GEV). Estimación de los parámetros de localización, escala y forma mediante los momentos, el método de la máxima verosimilitud o los momentos ponderados probabilísticamente (PWM).

$$F(x) = e^{\left[-\left(1-k \cdot \frac{x-u}{\alpha}\right)^{1/k}\right]}$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(1 - k \cdot \frac{x-u}{\alpha}\right)^{1/k-1} \cdot e^{\left[-\left(1-k \cdot \frac{x-u}{\alpha}\right)^{1/k}\right]}$$

$$k > 0, \alpha > 0, -\infty \leq x \leq u + \frac{\alpha}{k}$$

- LogPEARSON III :

$$f(x) = \frac{1}{\alpha^r \Gamma(r)} (x-u)^{r-1} \cdot e^{-\frac{x-u}{\alpha}}$$

$$r > 0$$

Siendo para todas ellas los parámetros:

$\alpha$ : Parámetro de escala;  $k$ : Parámetro de forma;  $u$ : Factor de localización

Los datos de las estaciones meteorológicas se pueden procesar mediante la aplicación CHAC (desarrollada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX) para la obtención de las precipitaciones máximas para cada uno de los periodos de retorno. Esta aplicación permite evaluar diferentes funciones las que se encuentran las funciones de distribución de frecuencia de ajuste paramétrico Normal, Gumbel, SQRT, LogPEARSON III y GEV

En el caso del territorio peninsular, caso particular de la zona piloto de Panticosa, se ha empleado la aplicación MAXPLUWIN (desarrollada por el CEDEX para la Dirección General de Carreteras), que proporciona las Máximas llluvias diarias analizadas a partir de una red de estaciones meteorológicas distribuidas por el territorio peninsular mediante la ley de distribución SQRT-ETmax. Esta aplicación permite obtener las precipitaciones máximas diarias (PMD) de un determinado lugar del territorio

peninsular a partir de sus coordenadas en función de los diferentes periodos de retorno.

Además, en el caso de estar disponibles, se puede contar con la información procesada por diferentes administraciones. El Consejo Insular de aguas de Tenerife cuenta con las isomáximas de precipitación diaria para diferentes periodos de retorno del conjunto de la isla. Estos datos pueden ser procesados para obtener las precipitaciones máximas diarias para la cuenca en estudio.

Una vez obtenidos los valores de las precipitaciones para cada periodo de retorno en las estaciones seleccionadas, mediante el análisis CHAC o a partir de la aplicación MAXPLUWIN para la zona peninsular que se desee, se procede al cálculo de la precipitación areal para las cuencas de aporte mediante la interpolación de los valores de cada estación.

## **ESTUDIO HIDROLÓGICO**

El objetivo del estudio hidrológico es la determinación de los caudales de avenida para cada una de las cuencas estudiadas. Como ya se comentó, debido a los datos de partida disponibles y la ausencia de datos de aforo, se ha optado por realizar un estudio mediante métodos hidrometeorológicos. Existen diversos métodos que pueden emplearse para la determinación de los caudales. A modo ilustrativo, se describen las principales características de los dos métodos que han sido los evaluados en las zonas piloto.

### **➤ Método Racional:**

Se trata de un método agregado que considera cada cuenca como elemento unitario. Este método ha sido empleado en el abanico aluvial debido a que, el reducido tamaño de las cuencas de aporte hace factible la consideración de las mismas como un solo elemento y la extrapolación de cada uno de los parámetros hidrológicos como valores promediados. Asimismo se ha aplicado este método en las dos subcuencas principales del barranco de San Andrés, con una superficie total entorno a los 16 km<sup>2</sup> y cuyas subcuencas presentan un área de unos 8 km<sup>2</sup>, en el punto de desagüe.

Mediante el empleo del Método Racional se obtienen los caudales punta de un aguacero de tiempo indefinido en función de la intensidad y el área de la cuenca. El método se basa en la transformación de una lluvia de intensidad constante que empieza de forma instantánea y se mantiene de forma indefinida, a una escorrentía que continúa hasta alcanzar el tiempo de concentración. El caudal máximo se alcanza cuando ha transcurrido el tiempo de concentración (tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya al flujo).

Para la determinación de los caudales se ha empleado la fórmula del Método Racional modificado por Témez:

$$Q = \frac{CIA}{3,6} K$$

Dónde:

Q (m<sup>3</sup>/s) = Caudal punta en el punto de desagüe de la cuenca

I (mm/h) = Máxima intensidad media en el intervalo de tiempo de duración T<sub>c</sub>

A (km<sup>2</sup>) = Superficie de la cuenca

C = Coeficiente de escorrentía

K = Coeficiente de uniformidad

Los parámetros necesarios para la determinación de los caudales punta son:

- i. Intensidad (mm/h): se refiere al valor medio a lo largo del intervalo pésimo de duración igual al tiempo de concentración.

$$I = \left(\frac{P}{24}\right) \left(\frac{I}{I_d}\right)^{\frac{28^{0,1-T_c^{0,1}}}{28^{0,1}-1}}$$

Donde, t<sub>c</sub> es el tiempo de concentración medido en horas, P es la precipitación máxima diaria (mm) y I/I<sub>d</sub> es una constante para cada zona del territorio nacional y se corresponde con el cociente entre la intensidad horaria y diaria; este cociente se supone independiente del periodo de retorno.

El valor de la precipitación para cada uno de los periodos de retorno se calcula para cada cuenca hidrográfica y es corregido mediante el factor corrector por área de Témez (K<sub>A</sub>). Este factor de corrección está basado en el efecto de la no simultaneidad de la precipitación y es de aplicación a todas las cuencas con un área superior a 1 km<sup>2</sup>.

$$K_A = 1 - \frac{\text{Log } A}{15}$$

- ii. Coeficiente de escorrentía: define la proporción de la intensidad de lluvia I que genera escorrentía superficial. Está relacionado con el concepto de lluvia neta y es función del umbral de escorrentía (P<sub>0</sub>). Dicho coeficiente aumenta a medida que transcurre el aguacero.

$$C = \frac{\left(\frac{P}{P_0} - 1\right) \left(\frac{P}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P}{P_0} + 11\right)^2}$$

- iii. Coeficiente de uniformidad: Considera el error considerado en la hipótesis de uniformidad temporal de la precipitación a medida que aumenta el tamaño de la cuenca.

$$K = 1 + \frac{T_C^{1,25}}{T_C^{1,25} + 14}$$

- iv. Tiempo de concentración (horas):

$$T_c = 0,3 \left( \frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Donde:

L (km)= longitud del cauce principal y J (m/m) = pendiente del cauce principal. Dadas las características de las cuencas en estudio, se ha determinado como longitud del cauce principal la máxima longitud de flujo del área de drenaje.

- v. Umbral de Escorrentía (mm):

El umbral de escorrentía ( $P_0$ ), parámetro empleado para la determinación del coeficiente de escorrentía en el método racional, es función del número de curva. La relación puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$P_0 = \frac{5000}{CN} - 50$$

Donde,  $P_0$  se encuentra expresado en mm y CN es el número de curva calculado mediante el método del SCS.

- vi. Estudio de las abstracciones iniciales en la generación de la escorrentía. Método del Número de Curva (NC)

La metodología empleada para la determinación de las abstracciones iniciales (intercepción, retención superficial, infiltración...) del suelo se basa en el

**Método del Número de Curva** desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EEUU (1972). Se trata de uno de los métodos empíricos de infiltración más extendidos y experimentados. Este método asume que existe una proporcionalidad entre la escorrentía y la infiltración de agua en la cuenca proponiendo la siguiente expresión:

$$\frac{Q}{P} = \frac{P - Q}{S} \qquad \frac{\text{Escorrentía real}}{\text{Escorrentía máxima}} = \frac{\text{Retención real}}{\text{Retención máxima}}$$

Donde: Q= escorrentía producida (mm); P= Precipitación (mm); S= capacidad de retención de agua máxima (mm).

Se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada a partir de las características del suelo, uso u ocupación del mismo y de su cubierta vegetal. Partiendo de los mapas de pendientes, usos del suelo y clases hidrológicas del suelo, establece una clasificación de la superficie en función de la mayor o menor capacidad de retención de la misma:

- ✓ Mapa de pendientes: obtenido a partir del modelo digital de elevaciones de tamaño de pixel de 5m. Este mapa ha sido reclasificado en dos grandes grupos, zonas con pendiente menor al 3% y zonas con pendiente mayor o igual al 3%
- ✓ Mapa de usos del suelo: Basado en el mapa de usos del suelo y adaptado a la clasificación establecida en el método del número de curva.
- ✓ Mapa de tipos de suelo: Establece la clasificación del territorio insular en cuatro grandes clases en función de su capacidad de drenaje. El estudio se apoya en los mapas litológicos, geológicos y en trabajo de campo para dar lugar a las siguientes clases:
  - A. Suelos excesivamente drenados. Son suelos profundos con texturas gruesas (arenosas o areno-limosas).
  - B. Suelos moderadamente drenados. Presentan texturas franco-arenosas, franca, franco-arcillosa o franco- limosa.
  - C. Suelos imperfectamente drenados con textura franco-arcillosa, franco-arcillo-limosa o arcillo-arenosa.
  - D. Suelos pobremente drenados. Presentan horizontes de arcilla en la superficie o próximos a ella. También se incluyen en esta clase terrenos con un nivel freático elevado permanentemente y los litosuelos.

### ➤ **Método del Hidrograma unitario:**

El objetivo de este método es modelar los hidrogramas reales generados durante eventos de crecidas. Se fundamenta en unas formulaciones matemáticas que, con una base en el fenómeno físico que abordan, permiten obtener hidrogramas sintéticos. Se basa en el concepto de hidrograma unitario (Sherman, 1932), escorrentía superficial resultante de una lluvia neta de 1 mm repartida uniformemente sobre dicha cuenca y con una distribución constante a lo largo de un determinado intervalo de tiempo (D). Consiste en obtener un hidrograma tipo para cada cuenca, conociendo este hidrograma elemental generado para una tormenta corta y a partir de él adaptarlo a cualquier evento de precipitación.

Este método se basa en los principios de:

- ✓ Constancia del tiempo base.
- ✓ Lluvias de la misma duración producen hidrogramas con idéntico tiempo base.
- ✓ Proporcionalidad entre las intensidades de precipitación y los caudales de los hidrogramas.
- ✓ Superposición: varios hidrogramas elementales generan uno resultante suma de todos ellos.

Existen diferentes formulaciones para el cálculo de los parámetros necesarios en un hidrograma sintético, entre ellas se encuentran:

- ✓ Hidrograma unitario adimensional del S.C.S. (1972), basado en un hidrograma adimensional obtenido para pequeñas cuencas rurales.
- ✓ Hidrograma unitario instantáneo de Clark (HUI; Clark, 1945), resultante del reparto uniforme de una unidad de lluvia sobre una cuenca a lo largo de un tiempo infinitamente pequeño; ello implica la evaluación de sumatorios pero con variables continuas, o sea integración definida entre 0 y t. Su utilización se basa en la hipótesis de que el caudal de desagüe de la cuenca es el resultado de una traslación del volumen neto precipitado y de una laminación por almacenamiento en la cuenca (mediante un hipotético embalse lineal).
- ✓ Hidrogramas unitarios sintéticos basados en características de la cuenca: Snyder (1938) y Gray (1961)
- ✓ Hidrograma unitario triangular de Témez (1987), similar al del S.C.S. pero con la definición del hidrograma que parte del tiempo de concentración, del que se obtiene el desfase de la punta, el tiempo base y el caudal puntal.

Todas estas metodologías y procedimientos de cálculo se hayan implementados en programas informáticos.

Para la cuenca de la zona de estudio de Panticosa, se ha empleado el método del hidrograma unitario adimensional del S.C.S mediante el software HEC-HMS. (software de uso libre desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU), obteniendo como resultado el hidrograma de los eventos simulados y las características de los mismos entre las que se encuentra el caudal punta.

### *ESTUDIO HIDRÁULICO*

El objetivo del estudio hidráulico es obtener los parámetros hidráulicos (principalmente calados y velocidades) en los tramos en estudio para cada una de las avenidas definidas en el estudio hidrológico.

Los procesos fluviales se deben a la energía de una masa de agua desplazándose por gravedad sobre conductos abiertos y ajustándose a los condicionantes que imponen su viscosidad, el rozamiento con el lecho y la carga del material transportado.

El estudio hidráulico puede ser abordado desde diferentes aproximaciones. La elección del tipo de modelación es función de las características de la zona de estudio y de la disponibilidad de datos.

Dada la complejidad del comportamiento real del fluido, para el estudio de la propagación fluvial mediante modelación matemática se emplean simplificaciones del flujo uni-, bi- o tridimensionales.

El flujo de agua se puede simplificar como **unidimensional**, es decir, suponiendo una profundidad y velocidad que varían sólo en la dirección longitudinal del canal. El movimiento del agua se denomina “fase fluvial” y está gobernado por las ecuaciones de Saint-Venant de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento:

Ecuación de la continuidad:

$$A \cdot \frac{\delta v}{\delta x} + B \cdot v \cdot \frac{\delta y}{\delta x} + B \cdot \frac{\delta y}{\delta t} = 0$$

Ecuación para la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\delta v}{\delta t} + v \frac{\delta v}{\delta x} + g \cdot \frac{\delta y}{\delta x} + g \cdot \frac{\delta z}{\delta x} + g \cdot S_f = 0$$

Siendo A: área para la sección transversal al flujo; v: velocidad media; x: abcisa de posición (situación en el conducto de la sección considerada); B: anchura de la lámina de agua para un calado y; y: calado (espesor de la lámina); t: tiempo; g: aceleración debida a la fuerza gravitatoria; z: cota para la base del conducto;  $S_f$ : pendiente de fricción, que es función de la velocidad, rugosidad y radio hidráulico.

### Flujo bidimensional:

Durante un evento de crecida es habitual que el flujo del agua no quede restringido a la centrolínea unidireccional de un canal principal, sino que el caudal desborde ocupando las márgenes y la llanura de inundación. En estas condiciones, la simplificación del flujo a una dimensión resulta insuficiente para modelizar los flujos secundarios perpendiculares a la dirección principal. Además esta modelización 2D también es importante en zonas donde existe confluencia de ríos, presencia de infraestructuras, cauces compuestos, curvas o en los entornos urbanos.

Si bien el flujo en los ríos es tridimensional, puede asumirse una simplificación en 2D donde las variaciones de la componente horizontal en la vertical son pequeñas y donde la distribución vertical de presiones es hidrostática. En este caso pueden aplicarse las ecuaciones de aguas someras integradas en la vertical.

### Modelos tridimensionales:

La modelización completa de flujos turbulentos se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds. Estas ecuaciones requieren un elevado costo computacional por lo que en la actualidad no está tan extendido su uso como en el caso de las modelaciones uni- y bidimensionales.

En función de las características de la zona de estudio, de los datos de partida y del objetivo de la modelación se pueden emplear un tipo de simplificación u otra.

Existen numerosas aplicaciones que resuelven las formulaciones. Como ejemplos de las mismas están:

- Software de modelación hidráulica unidimensional: HEC-RAS, MIKE11...
- Software de modelación hidráulica bidimensional: IBER, GUAD2D, MIKE21...
- Software de modelación hidráulica tridimensional: MIKE 3, DELFT3D, TELEMAC 3D...

En el caso que nos atañe, dadas las características de las zonas de estudio, con zonas aluviales en una de las zonas piloto donde el flujo perpendicular a la dirección principal adquiere relevancia y con zonas de núcleos urbanos donde existen cambios de dirección, resulta necesario de emplear modelos más complejos para la simulación de los flujos secundarios que surgen en dirección transversal al flujo principal.

El modelo 2D empleado para la modelación hidráulica de las zonas de estudio es el software de uso libre **IBER v1.9**; este software es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujo turbulento en lámina libre que resuelve las ecuaciones diferenciales mediante el método de los volúmenes finitos, método ampliamente utilizado en dinámica de fluidos computacional.

El software IBER presenta un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad (Ecuaciones de Saint Venant bidimensionales). Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática equivale a despreciar las aceleraciones verticales del fluido, cumpliéndose de manera razonable en flujos con una extensión horizontal mucho mayor que su profundidad.

Ecuación de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

Donde:

h es el calado

U<sub>x</sub>, U<sub>y</sub> son las velocidades horizontales promediadas en profundidad

g es la aceleración de la gravedad

$Z_s$  es la elevación de la lámina libre

$\tau_s$  es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento

$\tau_b$  es la fricción debido al rozamiento de fondo

$\rho$  es la densidad del agua

$\Omega$  es la velocidad angular de rotación de la Tierra

$\lambda$  es la latitud del punto considerado

$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$  son las tensiones tangenciales efectivas horizontales

$M_s, M_x, M_y$  son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento

#### Modelo de turbulencia:

La mayoría de los flujos en lámina libre son turbulentos, aunque en algunos casos ésta no es lo suficientemente elevada como para tener una gran influencia en el movimiento hidrodinámico del fluido.

El software incluye diferentes modelos de turbulencia para aguas someras:

- Viscosidad turbulenta constante
- Modelo parabólico
- Modelo de longitud de mezcla
- Modelo k- $\epsilon$  de Rastogi y Rodi

El modelo Modelo k- $\epsilon$  de Rastogi y Rodi (1978) resuelve la ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa de disipación de energía turbulenta  $\epsilon$ , teniendo en cuenta el rozamiento del fondo, gradientes de velocidad y la disipación y transporte convectivo.

Las ecuaciones del modelo para aguas someras son:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\epsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$$

donde,

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3.6c_k^{3/2}c_{\varepsilon 2}c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2}$$

siendo:

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.31$$

Donde:  $k$  es la energía cinética turbulenta,  $\varepsilon$  es la tasa de disipación de la turbulencia y  $S_{ij}$  es el tensor de deformación.

La finalidad del estudio hidráulico consiste en obtener los parámetros hidráulicos que permitan caracterizar la avenida torrencial.

Para las zonas piloto se realiza una modelización hidráulica bidimensional con estudio hidrodinámico que permite la caracterización de las zonas inundables para las diferentes avenidas.

La simulación se lleva a cabo mediante una hipótesis de tiempo igual al necesario para la estabilización del flujo. Las condiciones de contorno empleadas han sido: como entrada el caudal punta de la cuenca en la sección de entrada de la zona de estudio, y como condición de salida la cota 0 m al nivel del mar para las zonas piloto de El Hierro y Tenerife y un régimen crítico en la salida de la zona de estudio de Panticosa. La rugosidad de Manning se asigna a partir de la clasificación del terreno mediante mapa de usos del suelo, ortofotografía aérea y evaluación en campo.

La **Metodología** empleada para la modelación hidráulica bidimensional, consta de las siguientes fases:

1. **Delimitación de la zona de estudio.** Los límites de la zona de estudio se determinan de manera que todo el flujo de agua permanezca dentro de esta zona. Como información de apoyo se emplean las ortofotografías aéreas, topografía en detalle y cartografía temática (mapa geomorfológico y geológico).
2. **Cartografía en detalle.** Partiendo del MDT de precisión generado a partir de los datos LIDAR (de tamaño de pixel de 0,5 m), se selecciona el área objeto de estudio. Es de especial importancia la obtención de una cartografía en detalle ya que la principal fuente de error en el modelo procederá de ella.

El MDT refleja tanto la elevación de la superficie del terreno como de los elementos de edificaciones, eliminando la vegetación presente que puede aportar errores a la modelación hidráulica.

La fases 1 y 2 han sido detalladas en el apartado 4.2.B.

3. **Discretización espacial del dominio a estudiar.** Para la resolución de las ecuaciones diferenciales, el software utilizado emplea el método de volúmenes

finitos; para ello, el modelo IBER requiere la generación de una malla de cálculo a partir de la topografía en detalle de la zona de estudio.

IBER trabaja sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares. A la hora de seleccionar el tipo de mallado y la precisión del mismo se debe tener en cuenta la morfología del terreno, la fuente de datos disponible y el costo computacional que conlleva.

La selección del mallado no estructurado responde a que esta geometría muestra un mayor ajuste a la topografía del terreno.

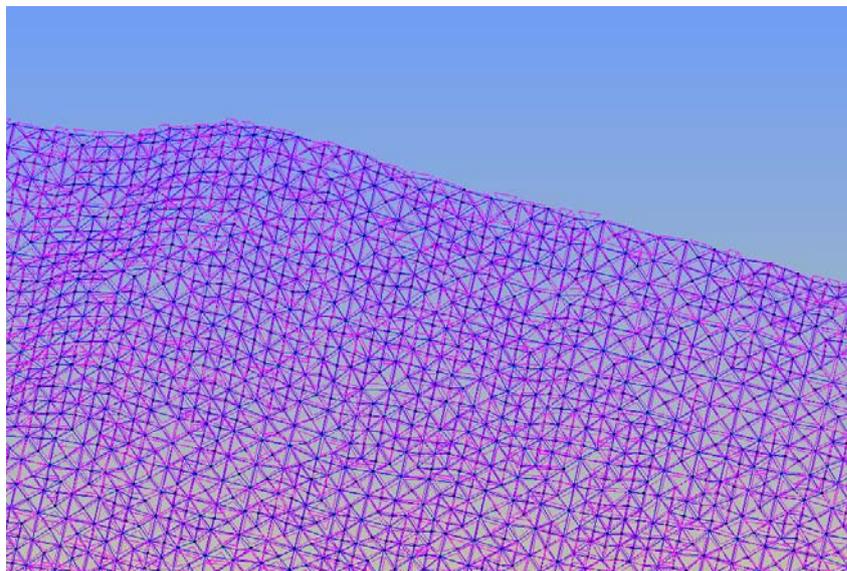


Figura 7. Detalle de una malla de cálculo.

#### 4. **Asignación de las condiciones de contorno:**

Las condiciones de contorno asignadas son las condiciones hidrodinámicas, el caudal de entrada, y la rugosidad del terreno. Es necesario especificar el caudal de cada una de las cuencas que drenan a la zona de estudio así como determinar los usos del suelo de la zona y asignar la rugosidad del terreno.

Para la zona de estudio de El Hierro, el terreno principalmente se encuentra dividido, en zonas de matorral xerófilo macaronésico, zonas sin vegetación y zonas edificadas o con infraestructuras. En el barranco de San Andrés, se incluyeron zonas de canal, y de cauce natural y en Panticosa se incluyeron las clases de bosques, prados y praderas, infraestructuras urbanas, y cauce natural.

Los valores del coeficiente de rugosidad de Manning se asignaron siguiendo las recomendaciones de la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

**Tabla 1. Valores asignados del coeficiente de rugosidad de Manning**

Clasificación usos del Suelo	n Manning
<b>Matorral xerófilo macaronésico</b>	0.06
<b>Suelo desnudo. Coladas lávicas</b>	0.03
<b>Cobertura artificial</b>	0.09
<b>Cauce natural</b>	0.04
<b>Bosques</b>	0.07
<b>Prados y praderas</b>	0.035
<b>Canal</b>	0.015

#### 5. Cálculo hidrodinámico:

El objetivo de esta fase es obtener los mapas de calados y velocidades máximos para la zona de estudio.

Para cada uno de los elementos finitos en los que se divide la zona, se calculan en cada instante el calado y velocidad del flujo de escorrentía y se toman los valores máximos.

#### D. PELIGROSIDAD

El análisis de riesgos se entiende como aquella disciplina científico-técnica cuyo objeto es la identificación y análisis de los factores de riesgo, natural, tecnológico, ecológico y social. Este análisis consta de tres subfases: Análisis de la Peligrosidad, Análisis de Exposición y Análisis de Vulnerabilidad. (Ayala et al. 2002). Asimismo puede definirse la Peligrosidad por la combinación de la severidad y la probabilidad de un peligro.

Para el análisis de la peligrosidad por inundaciones se ha determinado realizar un estudio de la severidad atendiendo a los parámetros hidráulicos de las avenidas consideradas. Para ello se analizaron la velocidad y el calado de la avenida con la finalidad de obtener un índice numérico que permita definir el flujo circulante en el evento.

Para determinar el factor de probabilidad asociada al evento se han tenido en cuenta los periodos de retorno (T) estipulados por la Directriz Básica de Protección civil ante el riesgo de Inundaciones (T 50, 100 y 500).

## **Definición de los parámetros de peligrosidad e implementación del índice de peligrosidad por inundación.**

La definición del flujo de agua puede realizarse mediante la determinación de los parámetros hidráulicos que mejor representan el movimiento del fluido. Como ya se ha comentado estos parámetros son la velocidad y el calado de la lámina de agua.

Estos dos parámetros permiten la caracterización del flujo de la avenida y por tanto permiten el realizar una estimación de la peligrosidad que la avenida puede producir en una zona determinada.

### **Índice de peligrosidad por inundaciones**

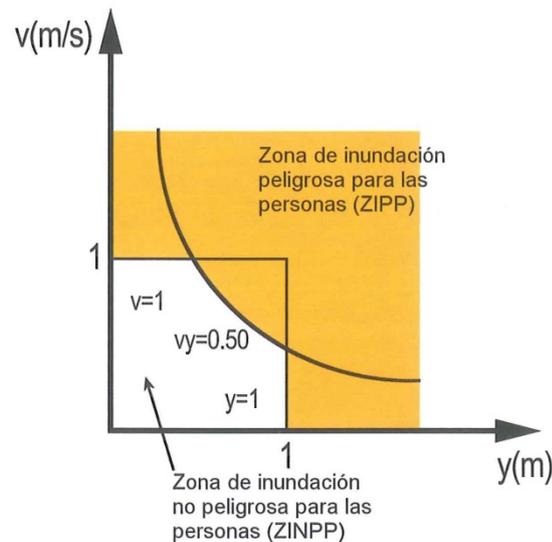
A partir de los resultados del estudio hidrológico-hidráulico se puede obtener una cartografía de inundaciones en base a diferentes criterios como puede ser el mapa de zonas inundadas, de zonas potencialmente inundables, mapas de profundidad de la lámina de agua o de velocidades, entre otros.

Dado que el objetivo del proyecto es cuantificar la peligrosidad, es necesario obtener un índice que permita interpretar los valores de los parámetros hidráulicos en base a su riesgo potencial para las personas y bienes. La importancia del índice de peligrosidad radica en obtener un valor numérico adimensional comparable y fácilmente interpretable con el fin de caracterizar la peligrosidad que pueda conllevar una determinada avenida.

En el estudio de peligrosidad es frecuente emplear únicamente el análisis de la lámina de agua que cubre una zona, pero la consideración de la peligrosidad por inundaciones tiene en cuenta los daños que el flujo de agua puede ocasionar, por ello, tradicionalmente se ha considerado la acción conjunta de los parámetros calados y velocidades.

A nivel mundial, existen diversos criterios para determinar los umbrales o valores máximos de calados y velocidades para definir la peligrosidad. Entre ellos es de destacar el establecido por Témez para ámbitos rurales, estos umbrales son ampliamente reconocidos y empleados tanto a nivel nacional como internacional. Según estos criterios los límites para la consideración de peligrosidad para las personas son:

- calado superior a 1m.
- velocidad de flujo mayor a 1 m/s.
- factor combinado de velocidad con calado (considerado como el múltiplo de la velocidad por el calado) mayor a  $0,5\text{m}^2/\text{s}$ .



**Figura 8. Gráfico de estimación de rangos y valores de las diferentes zonas de inundación o daño para las personas. Fuente: Guía metodológica para la elaboración de mapas de peligrosidad por inundaciones**

Para el presente estudio se han tenido en cuenta los efectos que tiene el flujo de la avenida para las personas y para los bienes en las zonas urbanas basándose en la metodología propuesta por Zonensein et al. (2008), que normaliza los parámetros del calado y del factor combinado de la velocidad (producto de la velocidad y calado) en función del peligro que pueda representar la avenida estudiada en las zonas urbanas.

El objetivo de aplicar esta metodología es obtener un índice cuantitativo distribuido espacialmente que permita realizar una estimación de la peligrosidad por inundaciones.

#### El factor calado o profundidad de la lámina de agua ( $l_p$ ):

La importancia de contar con un índice normalizado radica en la necesidad de obtener un valor con una escala común que permita la comparación en diferentes zonas. Está basado en la estimación de las características tipo de las infraestructuras urbanas.

El criterio para definir en qué momento comienza a haber peligrosidad es el umbral definido por la altura de la acera. Cuando el calado supera esa profundidad el flujo puede comenzar a considerarse peligroso. Los principales umbrales de la lámina de agua considerados son: 10 cm, que se corresponde con la altura promedio de las aceras; la altura de 50 cm de lámina de agua, umbral a partir del cual pueden verse afectados los patios y estacionamientos así como el paso de personas y vehículos; por encima de los 50 cm el flujo invade las edificaciones ocasionando daños a los bienes del interior de las viviendas. El siguiente intervalo es el de 1 m el denominado "Efecto mesa", donde la lámina de agua alcanza los bienes de la casa. Por encima de los 150 cm se invade completamente la casa.

Queda normalizado según la siguiente tabla:

**Tabla 2. Umbrales de profundidad del Factor Calado**

Umbrales de Profundidad (cm)	Ip	Efecto
<10	0	El límite de 10 cm se corresponde con la altura de los bordillos
50	35	A partir de 50 cm se inundan las calles, parques, y puede interrumpir el tráfico de vehículos
70	65	A partir de 70 cm posible entrada en las casas y causa de daños estructurales y de contenido
100	90	A partir de esta altura la lámina de agua alcanza todos los bienes de la casa. Así mismo es el umbral en el que los niños pueden ahogarse.
>150	100	Invasión de la lámina de agua en las casas

Factor del producto (Ivc):

La importancia del efecto combinado de la velocidad con la profundidad de la lámina de agua se encuentra documentado en numerosos estudios. Estos estudios evalúan el efecto asociado de las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el vector de velocidad y profundidad sobre la estabilidad de los individuos. Los intervalos del factor se corresponden con la afección de la corriente a los niños, adultos, vehículos y distintas infraestructuras y están basados en estudios empíricos de estabilidad de las personas.

**Tabla 3. Umbrales del Factor del Producto**

VC (m2/s)	Ivc	Efecto
<0.1	0	Poca probabilidad de daños a niños
0.25	40	Alto riesgo de daños a niños
0.7	60	Alto riesgo de daños a adultos
1.5	80	Alto riesgo de daños a vehículos
2.5	90	Alto riesgo de daños a construcciones ligeras
>7	100	Alto riesgo de daños a construcciones pesadas

Índice de Peligrosidad:

De la integración de ambos índices, el de calados y el del producto, se obtienen un valor único de peligrosidad para la avenida estudiada. El índice integrado es el máximo valor de los índices de calado y producto. La consideración del valor máximo es debe

a la implantación del criterio más restrictivo que permita determinar la peligrosidad teniendo en cuenta ambos indicadores.

Como ha sido comentado, la peligrosidad es función de dos factores, por un lado la severidad del evento, que puede ser caracterizada en base al factor profundidad y factor del producto y por el otro lado la frecuencia.

La frecuencia de la inundación ha sido caracterizada en función de los tres periodos de retorno estipulados por la Directriz Básica de Inundaciones para el análisis de las zonas de inundaciones potenciales. Esta directriz define:

- Zonas de inundación frecuente: Zonas inundables para avenidas de periodo de retorno de 50 años.
- Zonas de inundación ocasional: Zonas inundables para avenidas de periodo de retorno entre 50 y 100 años
- Zonas de inundación excepcional: Zonas inundables para avenidas de periodo de retorno entre 100 y 500 años.

Por lo tanto, para considerar la frecuencia de las avenidas se estudian los eventos para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años.

Para la determinación del índice final se tiene en cuenta la combinación de los diferentes periodos de retorno ponderando cada uno en base a la frecuencia de los mismos. Esta ponderación establece la peligrosidad integrada por inundaciones.

**Tabla 4. Ponderación de la frecuencia de la avenidas**

<b>PERIODO DE RETORNO (años)</b>	<b>Ponderación</b>
<b>50</b>	<b>1,5</b>
<b>100</b>	<b>1,25</b>
<b>500</b>	<b>1</b>

El resultado de la combinación de los índices de calado y producto para cada periodo de retorno es una capa raster con el valor cuantitativo normalizado de la Peligrosidad por Inundaciones.

Esta peligrosidad asigna en cada una de las celdas un valor que oscila entre 0 que se corresponde con la mínima peligrosidad y 100 que se corresponde con la máxima peligrosidad.

## E. VULNERABILIDAD

La caracterización de la vulnerabilidad del territorio ha sido realizada en función de las consecuencias potenciales negativas que las inundaciones pueden tener sobre los diferentes usos del suelo.

El estudio de la vulnerabilidad se ha realizado partiendo de la información obtenida de los datos geográficos digitales vectoriales del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE) y los datos vectoriales correspondientes a la hidrografía, las vías de comunicación y las edificaciones de la cartográfica a escala 1:5.000 de cada una de las zonas piloto. Para las zonas piloto de Las Playas (El Hierro) y el barranco de San Andrés (Santa Cruz de Tenerife) la cartografía a escala 1:5.000 que se ha utilizado es la que suministra Cartográfica de Canarias, S.A. (GRAFCAN), mientras que en la zona piloto de Panticosa (Huesca) la cartografía a escala 1:5.000 se ha obtenido del Sistema de Información Territorial de Aragón (SITAR).

La selección del SIOSE como información de partida para el estudio de vulnerabilidad se debe a que se trata de una clasificación del suelo homogénea para todo el territorio nacional. Asimismo se debe resaltar el hecho de que los mapas de peligrosidad por inundaciones presentan una escala de gran detalle, lo que hace necesario complementar la información de las coberturas del uso del suelo del SIOSE con otra información cartográfica de mayor escala como es la cartografía 1:5.000 proporcionada por las comunidades autónomas.

El SIOSE tiene como objetivo integrar la información de las Bases de Datos de coberturas y usos del suelo de las Comunidades Autónomas y de la Administración General del Estado. La Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (Ministerio de Fomento) como «Centro Nacional de Referencia de Ocupación del Suelo» (CNR-OS) dependiente del «Punto Focal Nacional» (Ministerio de Medio Ambiente) coordina este proyecto, apoyándose en la Red EIONET. El SIOSE se encuadra dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio en España (PNOT), que coordina y gestiona el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Es un sistema de información geográfica con una única capa de geometría de polígono cuya escala de referencia es de 1:25.000. El sistema Geodésico de Referencia es el ETRS 89 (European Terrestrial Reference System 1989).

El SIOSE también se caracteriza por utilizar un modelo conceptual de datos normalizado, interoperable y armonizado de la ocupación del suelo, según ISO19101 (Geographic Information- Reference Mode):

- Multiparámetro: varios atributos para un mismo polígono, entidad principal.
- Multicriterio: asociado al polígono su uso y cobertura.

El modelo de datos del SIOSE utiliza como entidad con geometría propia el polígono, cada uno de los cuales corresponde a una delimitación del territorio donde la cobertura del suelo es uniforme y homogénea. Es una primitiva geométrica bidimensional,

continua y limitada. Puede tener agujeros o sustracciones y en determinadas circunstancias, anejos o adiciones. Principalmente hace 3 diferenciaciones, coberturas simples, coberturas compuestas no predefinidas y coberturas predefinidas. SIOSE entiende como cobertura a cada una de las determinadas ocupaciones que se pueden encontrar en la superficie de España según han determinado. Esta tiene una superficie en particular, siendo ésta definida por una única ocupación, en el caso de las coberturas simples y varias ocupaciones, las cuales están definidas por coberturas compuestas (coberturas que se componen de otras coberturas simples o de otras coberturas compuestas).

Para este estudio de la vulnerabilidad sólo se ha considerado la Cobertura Simple dado que cuando estas se encuentran asociadas a un polígono, esta ocupará el 100% de su superficie.

Dentro de las coberturas simples que define el SIOSE, se encuentran:

#### 1. Cobertura artificial

- a) *Edificación* en la que se incluyen todas las construcciones fijas, hechas con materiales resistentes, destinadas a alojar personas, animales, vehículos, maquinaria, materiales, etc., con cualquier fin (residencial, comercial, industrial, etc.). La etiqueta para esta cobertura es **EDF**.
- b) *Zona verde artificial y arbolado urbano* en la que se incluyen superficies con vegetación artificial incluidas en zonas urbanas, entendiéndose como tal la que han sido plantada de forma artificial, o la que siendo espontánea o natural ha sufrido algún proceso de ordenación o se realizan en ella trabajos de jardinería (riego, podas, tratamientos fitosanitarios, etc.). La etiqueta para esta cobertura es **ZAU**.
- c) *Lámina de agua artificial* se corresponden con superficies de agua que ocupan un depósito construido con el fin de contenerla, como balsas de riego, piscinas, agua de las piscifactorías, estanques de jardines, pequeñas canalizaciones de agua, etc. La etiqueta para esta cobertura es **LAA**.
- d) *Vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación* incluye las carreteras, aparcamientos al aire libre, superficie de la calle por las que circulan los vehículos, aceras, superficies cementadas de parques y jardines, etc. La etiqueta para esta cobertura es **VAP**.
- e) *Otras construcciones* en donde se incluirían construcciones fijas, hechas con materiales resistentes destinadas a cualquier fin que no sea alojar personas, animales, maquinaria o materiales. La etiqueta para esta cobertura es **OCT**.
- f) *Suelo no edificado* se consideran superficies sin asfaltar o cementar que pueden existir en zonas urbanas. Pueden tener o no vegetación natural. La etiqueta para esta cobertura es **SNE**.

- g) *Zonas de extracción o vertido* se consideran aquellos terrenos severamente alterados por actividades antrópicas (minería, obras públicas...). En ellos se incluyen canteras, escombreras, cortas de mina, movimientos de tierras, etc. La etiqueta para esta cobertura es **ZEV**.

## 2. Cultivos

- h) *Cultivos herbáceos* en los que se incluirían las tierras de cultivos intensivos, tierras con cultivos en distintas alternativas de rotación, cultivos permanentes, cultivos inundados, cultivos bajo plástico y cultivos en invernadero. Dentro de esta cobertura se pueden diferenciar Arroz con la etiqueta **CHA** o Cultivos herbáceos distintos de Arroz con la etiqueta **CHL**.
- i) *Cultivos leñosos* que consistirían en superficies con cultivos que ocupan el terreno durante largos períodos y no necesitan ser replantados después de cada cosecha. Incluye tierras ocupadas por todos los árboles frutales, agríos, vid, olivo, etc., pero excluye árboles con aprovechamiento de madera. Dentro de esta cobertura se pueden diferenciar Frutales Cítricos (**LFC**), Frutales No Cítricos (**LFN**), Viñedo (**LVI**), Olivar (**LOL**) y Otros cultivos leñosos (**LOC**).
- j) *Prados* en los que se incluyen pastos herbáceos espontáneos de carácter permanente, siempre verdes, producidos por el hombre en un pasado más o menos remoto y por el pastoreo, que no se suelen agostar o secar en verano, constituidos por especies vivaces naturales, típicas de climas húmedos, subhúmedos o más secos pero con humedad edáfica. Son susceptibles de riego y siega al menos una vez al año. La etiqueta para esta cobertura es **PRD**.

## 3. Pastizal

Los polígonos con la denominación de pastizal son pastos formados por comunidades herbáceas permanentes y espontáneas aprovechadas a diente en pastoreo extensivo cuya producción es muy dependiente de la climatología y por lo tanto muy variable. Normalmente los pastizales por efecto del clima, se secan y agostan en verano, excepto en el caso de los pastizales de alta montaña. Su densidad es variable y frecuentemente están salpicados de especies leñosas. La etiqueta para esta cobertura es **PST**.

## 4. Arbolado forestal

Los polígonos con esta cobertura simple se consideran superficies con especies forestales arbóreas como manifestación vegetal de estructura vertical dominante que, en condiciones climáticas normales, superan los 5 m de altura.

- a) *Frondosas* que corresponde a formaciones forestales donde predominan las especies frondosas. Dentro de esta cobertura se pueden diferenciar Frondosas caducifolias (**FDC**) y Frondosas perennifolias (**FDP**)

- b) *Coníferas* que corresponde a formaciones forestales donde predominan las especies coníferas. La etiqueta para esta cobertura es **CNF**.

## 5. Matorral

Esta cobertura simple corresponde a superficies cubiertas por vegetación arbustiva formada por especies leñosas cuya parte aérea no llega a diferenciarse en tronco y copa, presentándose en general muy ramificada y pudiendo llegar desde el porte arbustivo hasta el achaparrado y rastrero. La etiqueta para esta cobertura es **MTR**.

## 6. Terrenos sin vegetación

- a) *Playa, dunas y arenales* corresponden a zonas de ribera del mar o de un río grande, formada por arenales en superficie casi plana o de arenas movedizas estructuradas por el viento en lomas y médanos con la planta en forma de media luna o superficies cubiertas por arenas más o menos finas, al menos en superficie y con un cierto calado. La etiqueta para esta cobertura es **PDA**.
- b) *Suelo desnudo* se denomina a aquellas superficies desnudas de vegetación incluso herbácea. La etiqueta para esta cobertura es **SDN**.
- c) *Zonas quemadas* que se han visto afectadas por incendios forestales recientes y que son todavía visibles en las imágenes de satélite. La etiqueta para esta cobertura es **ZQM**.
- d) *Glaciales y nieves permanentes*, son superficies cubiertas por masas de hielo y nieves perpetuas. La etiqueta para esta cobertura es **GNP**.
- e) *Ramblas* se definen como aquellos cauces torrenciales habitualmente cubiertos de piedras, gravas y arenas, normalmente secos, por donde discurren avenidas esporádicas súbitas. La etiqueta para esta cobertura es **RMB**.
- f) *Roquedos* son áreas constituidas por rocas y, por extensión, cualquier zona en que aparece una unidad o asociación litológica particular. Dentro de esta cobertura se pueden diferenciar Acanilados marinos (**ACM**), Afloramientos rocosos y roquedos (**ARR**), Canchales (**CCH**) y Coladas lávicas cuaternarias (**CLC**).

## 7. Coberturas húmedas

- a) *Humedales continentales* son zonas con morfología que propician la acumulación de agua, inundadas o con tendencia a inundarse durante gran parte del año por aguas dulces o salobres y con una vegetación específica. Dentro de esta cobertura se pueden diferenciar Zonas pantanosas (**HPA**), Turberas (**HTU**) y Salinas continentales (**HSA**).
- b) *Humedales marinos* son ecosistemas en los que entran en contacto, en mayor o menor medida, el agua de origen continental con el agua marina. Dentro de

esta cobertura se pueden diferenciar Marismas (HMA) y Salinas marinas (HSM).

## 8. Cobertura de agua.

- a) *Aguas continentales* son superficies de agua dulce permanentes que se encuentran en el interior, alejados de las zonas costeras. Dentro de esta cobertura se pueden diferenciar Cursos de agua (ACU) y Láminas de agua que a su vez se diferencia en Lagos y lagunas (ALG) y Embalses (AEM).
- b) *Aguas marinas* son superficies cubiertas por aguas marinas: mares, océanos, bahías, rías, etc. Dentro de esta cobertura se pueden diferenciar Lagunas costeras (ALC), Estuarios (AES) y Mares y océanos (AMO).

En primer lugar, para obtener los datos vectoriales del SIOSE, se ha seleccionado la información de las diferentes zonas piloto, en este caso las zonas de Panticosa (Huesca), El Hierro (Islas Canarias) y Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias), la cual se ha extraído en formato shp. Con esta selección se consigue filtrar y reducir la información con la que se va a trabajar, aumentando la capacidad del ordenador para la gestión de los mismos. Desde ArcGIS se observa la tabla de atributos que tiene el shp de tipo polígono para la cobertura de SIOSE. La figura 9 muestra la tabla de atributos de la capa de T\_POLIGONOS del SIOSE.

OBJECTID	Shape	ID_POLYGON	SIOSE_CODE_MF1	SIOSE_CODE	SIOSE_XML	SUPERF_HA	OBSER	OBSER	CODBLQ	Shape_Length	Shape_Area
1	Polygon	00001127-C124-4BC	PRDrr	PRDrr	<?xml version="1.0" ...>	32.413251	<Null>	<Null>	15	3445.63477	324132.506404
2	Polygon	000011bb-646e-11d0	A(65CNFpl_20PST_10MTR_05SDN	A(65CNFpl_20PST_10	<?xml version="1.0" ...>	4.222764	<Null>	<Null>	7	888.767206	42227.644371
3	Polygon	000022F1-C9DC-264	R(40CHLsc.30PRDsc.15UCS(80ED	R(40CHLsc.30PRDsc	<?xml version="1.0" ...>	50.443207	<Null>	<Null>	12	8202.382552	507329.981437
4	Polygon	000025F1-e1a4-4506	R(45CHLsc.35LFNsc.20LVisc	R(45CHLsc.35LFNsc	<?xml version="1.0" ...>	7.085083	<Null>	<Null>	10	2419.738481	70850.831866
5	Polygon	00003591-b4f0-4d7f	R(88LVisc.32LFCrr	R(88LVisc.32LFCrr	<?xml version="1.0" ...>	2.64851	<Null>	<Null>	10	763.580117	26485.100788
6	Polygon	00004063-89c1-4563	NRV(VAP)	NRV(VAP)	<?xml version="1.0" ...>	3.67372	<Null>	<Null>	104	3958.275439	36737.195989
7	Polygon	0000435b-0126-11dc	EPU(73ZAU_24VAP_03SNE)	EPU(73ZAU_24VAP_0	<?xml version="1.0" ...>	40.116182	<Null>	<Null>	9	3824.738679	402888.841378
8	Polygon	00004685-42b1-11dc	[55UDS(54EDFva_40ZAU_06VAP)	[55UDS(54EDFva_40Z	<?xml version="1.0" ...>	2.882897	<Null>	<Null>	9	1608.548852	28863.466616
9	Polygon	0000467f-319e-11dc	[42LFNsc.32MTR.13LOLsc.13MTR	[42LFNsc.32MTR.13L	<?xml version="1.0" ...>	3.392682	<Null>	<Null>	9	1334.894508	33956.701539
10	Polygon	000046bc-1d58-4c8b	A(70FDCfr_20MTRfr_10PST)	A(70FDCfr_20MTRfr_1	<?xml version="1.0" ...>	9.947183	<Null>	<Null>	101	4002.736379	99471.831673
11	Polygon	00004e95-20ca-11dc	[81FDC.16CHLsc.03MTR]	[81FDC.16CHLsc.03	<?xml version="1.0" ...>	22.64055	<Null>	<Null>	9	4582.979742	227098.889869
12	Polygon	0000563f-F8E2-7648	[75LVisc.20LFNsc.05MTR]	[75LVisc.20LFNsc.05	<?xml version="1.0" ...>	2.631951	<Null>	<Null>	2	971.072382	26319.512844
13	Polygon	00006265-af7f-4f30	[80PST.20ARR]	[80PST.20ARR]	<?xml version="1.0" ...>	6.660603	<Null>	<Null>	10	1701.186059	66606.034171
14	Polygon	0000756b-fbe1-4841	A(90LAA_10PSTpc)	A(90LAA_10PSTpc)	<?xml version="1.0" ...>	2.0307	<Null>	<Null>	14	556.518521	20307.002183
15	Polygon	00007833-FE28-AA4	[70ZQM.20ARR.05PST.05SDNfc]	[70ZQM.20ARR.05PS	<?xml version="1.0" ...>	70.736633	<Null>	<Null>	12	10847.291007	709543.040639
16	Polygon	00007d9b-eb7c-4542	LOLsc	LOLsc	<?xml version="1.0" ...>	65.967354	<Null>	<Null>	101	5800.176198	659673.544723
17	Polygon	0000843e-0c7a-11dd	A(65PST_20MTR_10SDN_05CNFpl)	A(65PST_20MTR_10S	<?xml version="1.0" ...>	12.678938	<Null>	<Null>	7	1714.999615	126789.377915
18	Polygon	00008A49-826A-40F	CHLsc	CHLsc	<?xml version="1.0" ...>	3.777818	<Null>	<Null>	15	1443.988431	37778.183215
19	Polygon	00008FC3-11d6-30da	A(45CNF_30PST_25MTR)	A(45CNF_30PST_25MT	<?xml version="1.0" ...>	39.598108	<Null>	<Null>	2	5566.941697	395981.07892
20	Polygon	0000a4b9-08d2-11dc	LVisc	LVisc	<?xml version="1.0" ...>	11.086513	<Null>	<Null>	7	1295.086162	110865.130392
21	Polygon	0000A81B-1CFD-11d0	R(95UCS(70SNE_20EDFem_05ZAU	R(95UCS(70SNE_20ED	<?xml version="1.0" ...>	1.736121	<Null>	<Null>	8	889.193771	17361.206997
22	Polygon	0000a9f7-78da-11dd	A(80PST_20MTR)	A(80PST_20MTR)	<?xml version="1.0" ...>	12.220648	<Null>	<Null>	7	1964.492855	122206.475451
23	Polygon	0000afab-29ae-4174	[95FDP.05MTRpc]	[95FDP.05MTRpc]	<?xml version="1.0" ...>	4.636706	<Null>	<Null>	10	1448.097659	46367.061018
24	Polygon	0000B44D-348E-11d0	A(40MTR_35CNF_20PST_05FDP)	A(40MTR_35CNF_20P	<?xml version="1.0" ...>	2.398349	<Null>	<Null>	8	693.121421	23983.494097
25	Polygon	0000BDB7-2D6E-20d4	[40PST.25LFNsc.20AAR(60CHLsc	[40PST.25LFNsc.20A	<?xml version="1.0" ...>	3.285671	<Null>	<Null>	2	908.973416	32856.710326
26	Polygon	0000c43f-1e39-4268	LFNsc	LFNsc	<?xml version="1.0" ...>	2.282114	<Null>	<Null>	103	1344.009014	22821.139348
27	Polygon	0000c75a-36e3-11dd	A(50CNFpl_35MTR_10PST_05SDN	A(50CNFpl_35MTR_10	<?xml version="1.0" ...>	3.26997	<Null>	<Null>	7	1116.557219	32699.699055
28	Polygon	0000d094-bb7a-4557	A(85MTR_15CNFpl)	A(85MTR_15CNFpl)	<?xml version="1.0" ...>	6.407565	<Null>	<Null>	16	1691.146079	64075.648331
29	Polygon	0000e330-9f51-4be6	UEN(55VAP_40EDFva_05ZAU)	UEN(55VAP_40EDFva	<?xml version="1.0" ...>	2.593717	<Null>	<Null>	16	773.786673	25937.167436
30	Polygon	0000E943-EBC4-11D0	A(80CNF_10PST_10MTR)	A(80CNF_10PST_10MT	<?xml version="1.0" ...>	219.590611	<Null>	<Null>	8	10655.271525	2195906.111587
31	Polygon	0000f070-18a4-4503	A(80PST_10NRV(VAP)_05MTRfc	A(80PST_10NRV(VAP)	<?xml version="1.0" ...>	2.419885	<Null>	<Null>	101	1177.498126	24198.846002
32	Polygon	0000F2A7-D7EE-E54	R(35EDFva.20ZAU.15CHLsc.15CH	R(35EDFva.20ZAU.15	<?xml version="1.0" ...>	3.936958	<Null>	<Null>	12	1445.784748	39548.387935
33	Polygon	0000F4E7-0213-4035	[60A(50MTR_50SDN).40MTR]	[60A(50MTR_50SDN)	<?xml version="1.0" ...>	12.863629	<Null>	<Null>	15	3748.095183	128636.290107
34	Polygon	0000f684-ae19-4ac6	SNE	SNE	<?xml version="1.0" ...>	2.20593	<Null>	<Null>	10	1000.385347	22059.295369
35	Polygon	00010117-d5df-47ab	R(85A(80PST_10MTR_05SDN_05M	R(85A(80PST_10MTR_	<?xml version="1.0" ...>	4.304477	<Null>	<Null>	101	1169.880852	43043.767671

Figura 9. Tabla de atributos de la capa T\_POLIGONOS

En ella se ven atributos propios de cualquier shp, con otros particulares, asociados a la información del SIOSE:

- OBJECTID: El identificador de cada objeto.
- Shape\*: En el que se ve el tipo de shp que es la cobertura, en este caso de polígonos.
- ID\_POLYGON\*: El identificador único para cada recinto que le da ArcGIS.
- SIOSE\_CODE\*: Codificación de la ocupación del suelo para ese polígono.
- Shape\_Area: El área que ocupa el polígono.

A continuación se ha procedido a establecer un criterio para simplificar la codificación por coberturas del SIOSE partiendo del campo SIOSE\_CODE, en el que se ha considerado el porcentaje mayor de ocupación del suelo y las coberturas que presentan mayor vulnerabilidad. Así se han creado varios campos nuevos (Figuras 10 y 11):

- DOMINANTE\*: Ocupación del suelo simplificada para ese polígono.
- COD\_DOMINA\*: Codificación de la ocupación del suelo simplificada para ese polígono.
- OTROS: Resto de usos de suelo, que se pueden encontrar en el polígono.

FID	Shape*	ID_POLYGON	SIOSE_CODE	CODE_MF1	SUPERF_HA	OBSE	OBSEER	CODBLQ	SIOSE_XML	DOMINANTE	COD_DOMINA	OTROS	ET_ID	ET_S	Ponderac
0	Polygon	0B223B1-F08E-4	A(6SSDN_35FDP)	A(6SSDN_35FDP)	28.516836	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	FDP	0	0	1	1
1	Polygon	11707C0A-9F74-4	LOCm	LOCm	112.477018	0	5	<?xml version="1.0	Otros cultivos leño	LOCm		1	1	2	2
2	Polygon	2F380DB0-EF29-4	UDS(5SSNE_15EDFv)	UDS(5SSNE_15EDF)	4.109113	0	5	<?xml version="1.0	Suelo no edificado	SNE	EDFva_VAP_0	2	1	2	3
3	Polygon	39116A42-065C-4	R(70PDA_30TCH(60E	R(70PDA_30TCH(60	4.143568	0	5	<?xml version="1.0	Playas, dunas y ar	PDA	EDFva_ZAU_V	3	1	1	1
4	Polygon	4604247B-8D7C-4	UDS(5SSNE_15EDFv)	UDS(5SSNE_15EDF)	3.014755	0	5	<?xml version="1.0	Suelo no edificado	SNE	EDFva_ZAU_V	4	1	3	3
5	Polygon	696352C-72F9-4E	A(6SSDN_05MTR)	A(6SSDN_05MTR)	431.482934	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	MTRpc_LFisc	5	1	1	1
6	Polygon	6C379DFE-E472-4E	A(7SSDN_25CNF)	A(7SSDN_25CNF)	11.397317	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	CNF	6	1	1	1
7	Polygon	711AA4BC-5791-4	R(8SA(5SMTRpc_45S	R(8SA(5SMTRpc_45	2.112146	0	5	<?xml version="1.0	Matorral	MTRpc	MTRpc_SDN_C	7	1	1	1
8	Polygon	8CEDA3D0-F3FD-4	A(6SSDN_15MTRpc)	A(6SSDN_15MTRpc)	7.488722	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	MTRpc	8	1	1	1
9	Polygon	9E77FEFB-A626-4	A(6SSDN_40MTR)	A(6SSDN_40MTR)	98.943473	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	MTR	9	1	1	1
10	Polygon	9E1D78D8-F8CF-4	A(6SSDN_35MTR)	A(6SSDN_35MTR)	1722.634764	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	MTR	10	1	1	1
11	Polygon	989A2D17-BF99-4	LOCsc	LOCsc	14.291443	0	5	<?xml version="1.0	Otros cultivos leño	LOCsc		11	1	2	2
12	Polygon	A100942E-AC94-4	A(6SSDN_15MTR)	A(6SSDN_15MTR)	403.457014	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	MTR	12	1	1	1
13	Polygon	A3AE46DB-FAB8	CHLsc	CHLsc	8.739665	0	5	<?xml version="1.0	Cultivos herbáceos	CHLsc		13	1	2	2
14	Polygon	AARD0EF1-5701-4	A(6SSDN_35CNF)	A(6SSDN_35CNF)	116.078256	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	CNF	14	1	1	1
15	Polygon	AE0090CF-DAD3-4	(75SCHLsc_15LOCsc	(75SCHLsc_15LOCsc	30.029999	0	5	<?xml version="1.0	Cultivos herbáceos	CHLsc	LOCsc_LFisc	15	1	2	2
16	Polygon	C5D4F4E6-2822-42	A(90ACM_10MTR)	A(90ACM_10MTR)	311.309232	0	5	<?xml version="1.0	Acantillados marino	ACM	MTR	16	1	1	1
17	Polygon	D01C6380-2156-44	(45PSTpc_20A(95SD	(45PSTpc_20A(95SD	70.750939	0	5	<?xml version="1.0	Pastizal	PSTpc	SDN_MTR_LO	17	1	1	1
18	Polygon	DA7CDB3-A6A6-	A(6SMTR_35SDN)	A(6SMTR_35SDN)	41.899484	0	5	<?xml version="1.0	Matorral	MTR	SDN	18	1	1	1
19	Polygon	D8422C02-8938-4	R(60CHLsc_40LOCs	R(60CHLsc_40LOCs	5.740285	0	5	<?xml version="1.0	Cultivos herbáceos	CHLsc	LOCsc	19	1	2	2
20	Polygon	E5413966-C3F9-4B	A(70SDN_30FDP)	A(70SDN_30FDP)	5.221756	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	FDP	20	1	1	1
21	Polygon	E7487E4E-1CA0-4	A(6SSDN_05MTR)	A(6SSDN_05MTR)	6.660078	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	MTR	21	1	1	1
22	Polygon	E8E21E9F-2CA6-4	(55LOCm_25CHLm)	(55LOCm_25CHLm)	12.097189	0	5	<?xml version="1.0	Otros cultivos leño	LOCm	CHLm_SDN_M	22	1	2	2
23	Polygon	F4092063-41E9-43	A(6SSDN_35MTR)	A(6SSDN_35MTR)	10.295461	0	5	<?xml version="1.0	Suelo desnudo	SDN	MTR	23	1	1	1
24	Polygon	F857AAC1-6AD9-4	LOCsc	LOCsc	8.549895	0	5	<?xml version="1.0	Otros cultivos leño	LOCsc		24	1	2	2
25	Polygon	FD47CB43-5870-48	R(85CHLsc_15LOCs	R(85CHLsc_15LOCs	2.379214	0	5	<?xml version="1.0	Cultivos herbáceos	CHLsc	LOCsc	25	1	2	2
26	Polygon	FES190CB-80B1-4	A(5SMTR_45SDN)	A(5SMTR_45SDN)	195.059371	0	5	<?xml version="1.0	Matorral	MTR	SDN	26	1	1	1
27	Polygon		UCS(100EDF5000)	UCS(100EDF5000)	0	0	0		Edificación	EDF5000		0	1	5	5
28	Polygon		V(100ACU5000)	V(100ACU5000)	0	0	0		Cursos de agua	ACUS000		0	1	1	1
29	Polygon		NRV(100VAP5000)	NRV(100VAP5000)	0	0	0		Vías, aparcamiento	VAP5000		0	1	4	4

Figura 10. Campos generados en el shp del SIOSE.

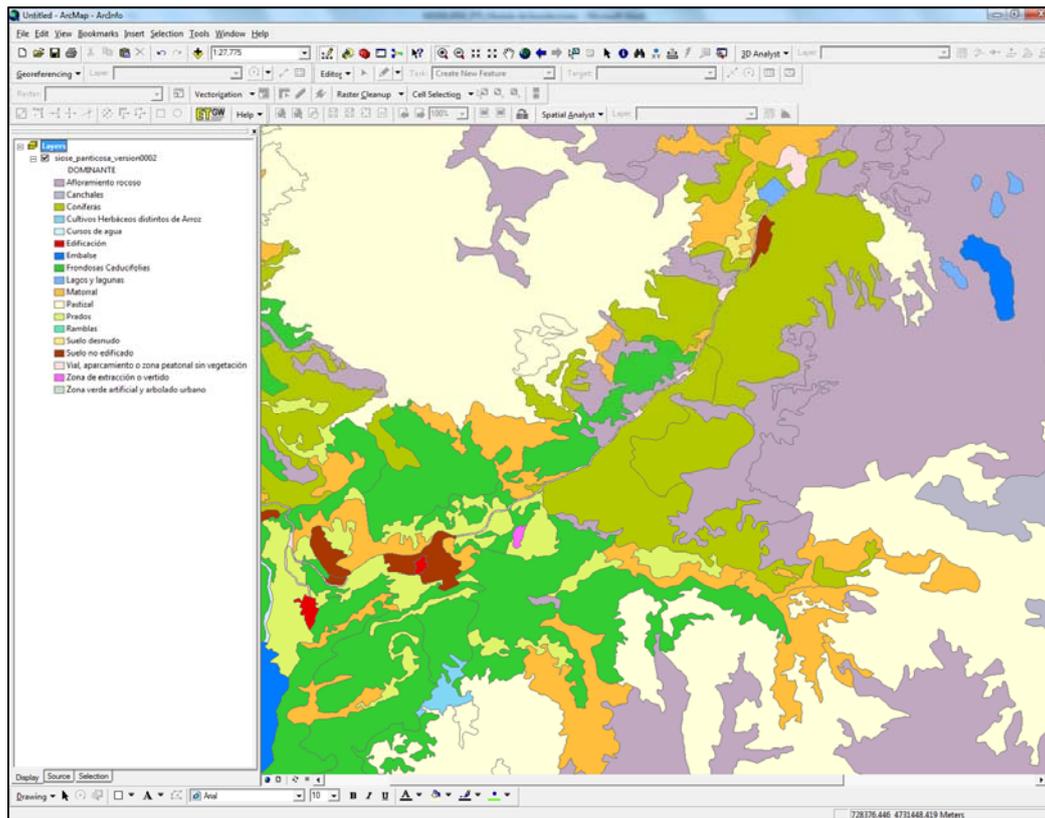


Figura 11. Representación del shp de polígonos del SIOSE.

Posteriormente, para generar el estudio de la vulnerabilidad ha sido necesaria la cartografía 1:5000 de cada una de las zonas piloto, en particular las capas de edificaciones, vías de comunicación e hidrografía. Para esta fase se ha hecho uso de la información suministrada por Cartográfica de Canarias, S.A. (GRAFCAN) y Sistema de Información Territorial de Aragón (SITAR) en formato DGN (archivo de tipo Design, de Microstation v.8, de la compañía Bentley Systems), un formato vectorial utilizado con frecuencia en el sector de la cartografía. Los datos en formato DGN sirven para crear una cartografía, pero no para llevar a cabo un análisis, teniendo un carácter puramente visual. Por este motivo, se han convertido dichos archivos a un formato shapefile. Estos archivos (los DGN) están compuestos por puntos, líneas, polígonos, anotaciones y objetos 3D (multielementos). Cada elemento aparece caracterizado por una serie de propiedades que se conservan como atributos en su transformación a shapefile, donde cada tipo de objeto o elemento (edificación, río...) tiene uno o varios campos que permiten distinguirlo de los demás (color, nivel o capa en la que se encuentra, tipo de línea, etc.). La transformación de un formato DGN a shp tiene como objetivo principal la construcción de las capas de edificaciones, vías de comunicación e hidrografía en formato shp tipo polígonos con el objetivo de integrarlas posteriormente en la capa de usos del suelo del SIOSE.

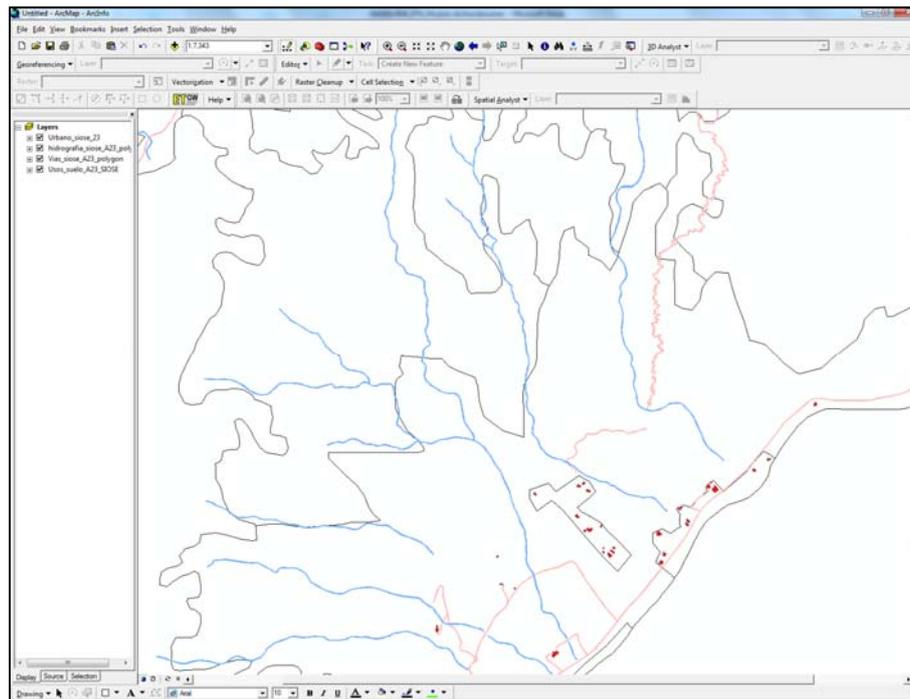


Figura 12. Capas de la cartografía 1:5000 en formato polígono sobre la capa del SIOSE

Para obtener la capa final se han unido las capas correspondientes a la cartografía 1:5.000 y los usos del suelo del SIOSE, en una única capa vectorial tipo polígono. Es decir, las unidades elementales en las que se ha dividido la capa de vulnerabilidad son el resultado del cruce de la capa del SIOSE con la cartografía 1:5.000 de las CCAA, dando como resultado una correcta delimitación de las edificaciones y principales vías urbanas, que constituyen los usos del suelo más vulnerables frente a las inundaciones y que por lo tanto deben presentar unos límites bien definidos.

Cada clase simple o elemento en el que se clasifica la capa ha sido ponderada en función de su mayor o menor vulnerabilidad frente al paso de la avenida. El pesaje de cada uso del suelo ha sido determinado mediante un procedimiento de comparación por pares de todos los elementos, asignando una ponderación de 5 a las unidades con mayor vulnerabilidad y una ponderación de 1 a las unidades menos vulnerables o unidades que no se ven afectadas de manera significativa por el paso de la avenida.

En la tabla 5 se puede observar el valor de la vulnerabilidad asociada a cada elemento o uso del suelo.

Tabla 5. Ponderación de la Vulnerabilidad de las coberturas de usos del suelo

<b>Coberturas simples</b>			
<b>NOMBRE</b>	<b>ETIQUETA</b>	<b>ID</b>	<b>VULNERABILIDAD</b>
<b>COBERTURA ARTIFICIAL</b>		100	
Edificación	EDF	101	5
Zona verde artificial y arbolado urbano	ZAU	102	2
Lámina de agua artificial	LAA	103	2
Vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación	VAP	104	4
Otras construcciones	OCT	111	4
Suelo no edificado	SNE	121	3
Zonas de extracción o vertido	ZEV	131	3
<b>CULTIVOS</b>		200	
<i>Cultivos Herbáceos</i>		210	
Arroz	CHA	211	2
Cultivos Herbáceos distintos de Arroz	CHL	212	2
<b>Cultivos Leñosos</b>		220	
Frutales		221	
Frutales Cítricos	LFC	222	2
Frutales no Cítricos	LFN	223	2
Viñedo	LVI	231	2
Olivar	LOL	232	2
Otros cultivos leñosos	LOC	241	2
Prados	PRD	290	1
<b>PASTIZAL</b>	PST	300	1
<b>ARBOLADO FORESTAL</b>		310	
Frondosas		311	
Frondosas Caducifolias	FDC	312	1
Frondosas Perennifolias	FDP	313	1
Coníferas	CNF	316	1
<b>MATORRAL</b>	MTR	320	1
<b>TERRENOS SIN VEGETACIÓN</b>		330	
Playas, dunas y arenales	PDA	331	1
Suelo desnudo	SDN	333	1
Zonas quemadas	ZQM	334	2
Glaciares y nieves permanentes	GNP	335	1
Ramblas	RMB	336	1
<b>Roquedo</b>		350	
Acantilados marinos	ACM	351	1
Afloramientos rocosos y roquedos	ARR	352	1
Canchales	CCH	353	1
Coladas lávicas cuaternarias	CLC	354	1

<b>Coberturas simples</b>			
<b>NOMBRE</b>	<b>ETIQUETA</b>	<b>ID</b>	<b>VULNERABILIDAD</b>
<b>COBERTURAS HÚMEDAS</b>		400	
Humedales continentales		410	
Zonas pantanosas	HPA	411	2
Turberas	HTU	412	2
Salinas continentales	HSA	413	2
Humedales marinos		420	
Marismas	HMA	421	2
Salinas marinas	HSM	422	2
<b>COBERTURA DE AGUA</b>		500	
Aguas continentales		510	
Cursos de agua	ACU	511	1
Láminas de agua		512	
Lagos y lagunas	ALG	513	1
Embalses	AEM	514	1
Aguas marinas		520	
Lagunas costeras	ALC	521	1
Estuarios	AES	522	1
Mares y océanos	AMO	523	1

## F. RIESGO ESPECÍFICO

El siguiente paso, una vez determinada la peligrosidad y la vulnerabilidad, es establecer el Riesgo Específico por Inundaciones. Como se definió en apartados anteriores, el Riesgo Específico ( $R_s$ ) es el riesgo por unidad de exposición, es decir es el resultado del cruce de la peligrosidad ( $P$ ) con la vulnerabilidad ( $V$ ).

$$R_s = P \times V$$

La determinación del riesgo potencial de inundación tiene como información base de partida las capas resultado de las fases anteriores; es decir, el índice de Peligrosidad por Inundación normalizado y el valor de la Vulnerabilidad para cada de las unidades de usos del suelo.

Una vez obtenida la peligrosidad para el tramo en estudio se han delimitado diferentes umbrales de peligrosidad basados en los umbrales o límites establecidos en los índices que componen la peligrosidad integrada (los índices del calado y del producto). Esta clasificación permite comparar el nivel de peligrosidad integrado con el nivel de vulnerabilidad de los elementos de las zonas de estudio.

Los tramos de mayor riesgo son aquellos cuya peligrosidad es mayor (ya sea por un alto valor de profundidad de la lámina de agua o por un alto valor del binomio velocidad-calado) y cuyo uso del suelo se corresponde con los suelos más vulnerables, es decir con las edificaciones.

A partir del cruce de la peligrosidad y vulnerabilidad se obtiene el riesgo específico clasificado en cinco niveles, como puede verse en la tabla 6.

Los principales elementos que componen los cinco niveles y que definen las clases de riesgo son:

- **Muy alto:** se corresponde principalmente con zonas de edificaciones, viales u otras construcciones que presentan una peligrosidad por inundaciones alta o muy alta.
- **Alto:** Presentan riesgo alto aquellas edificaciones, vías u otras construcciones con un nivel de peligrosidad de 40 a 70 así como las zonas no edificadas con una peligrosidad alta o muy alta.
- **Medio:** El riesgo medio se corresponde fundamentalmente con las zonas de edificaciones con los menores niveles de peligrosidad así como zonas verdes artificiales o zonas de cultivos con alto o muy alto grado de peligrosidad.
- **Moderado:** Presentan un riesgo moderado, entre otros, los viales, y zonas no edificadas con el menor nivel de peligrosidad así como bosques y terrenos sin vegetación con una peligrosidad alta o muy alta.
- **Bajo:** Están clasificados con riesgo bajo aquellas zonas con cultivos, terrenos forestales, y humedales, entre otros, que presentan una peligrosidad baja o moderada.

Tabla 6. Nivel de Riesgo Específico en función de la vulnerabilidad y la peligrosidad

NIVEL DE RIESGO ESPECÍFICO		VULNERABILIDAD				
		1	2	3	4	5
PELIGROSIDAD	0-20	BAJO	BAJO	MODERADO	MODERADO	MEDIO
	20-40	BAJO	BAJO	MODERADO	MEDIO	MEDIO
	40-70	BAJO	MODERADO	MEDIO	ALTO	ALTO
	70-90	MODERADO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
	90-100	MODERADO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO

### 4.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CÁLCULO Y RELACIÓN CON EL SOFTWARE ESPECÍFICO

El objetivo del algoritmo de cálculo es automatizar aquellos procesos que puedan ser sistematizados para crear una herramienta que facilite la obtención de los mapas de peligrosidad y riesgo específico por inundaciones.

La herramienta se basa en el desarrollo de modelos en el entorno de las herramientas de ArcGIS mediante el empleo del ModelBuilder.

El ModelBuilder es una aplicación integrada en el software ArcGIS que permite crear, editar y administrar modelos, es decir, flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento. Por lo tanto, un modelo se puede definir como una secuencia de herramientas y datos encadenados.

La utilidad de automatizar los procesos a través de modelos reside en la posibilidad que brinda el ModelBuilder para realizar modelos basados en unas herramientas conocidas y sobre las que se sustenta el Sistema de Información Geográfica ArcGIS.

El ModelBuilder permite ejecutar una secuencia de herramientas que se haya creado o crear herramientas a partir de secuencias de comandos Python o a partir de herramientas existentes en las ArcToolbox de ArcGIS.

A modo resumen, se describen los principales elementos de los modelos generados mediante ModelBuilder:

- Herramientas: Las herramientas de geoprocésamiento son los bloques de construcción básicos de los flujos de trabajo en un modelo. Llevan a cabo varias acciones de datos geográficos o tabulares.
- Variables: son elementos de un modelo que contienen un valor o una referencia a datos almacenados. Existen dos tipos de variables principales:
  - Datos: Elementos de modelo que contienen información descriptiva sobre los datos almacenados en el disco. Como ejemplo de propiedades de datos que se pueden describir en una variable de datos se encuentran la información de campo, la referencia espacial y la ruta.
  - Valores: Pueden ser cadenas de caracteres, números, booleanos, referencias espaciales, unidades lineales o extensiones. Contienen cualquier información a excepción de la referencia a datos almacenados en el disco
- Conectores: Conectan datos y valores a herramientas. Las flechas de conexión indican la dirección del procesamiento. Existen cuatro tipos de conectores:

- Datos: conectan datos y variables de valor a herramientas
- Entorno: Conectan una variable que contiene una configuración del entorno (datos o valor) a una herramienta.
- Condición previa: Conectan una variable a una herramienta con el condicionamiento de que la herramienta se ejecute sólo después de que se haya creado el contenido de la variable de la condición previa.
- Comentarios: Los conectores de retroalimentación conectan la salida de una herramienta de nuevo a la misma herramienta como entrada.

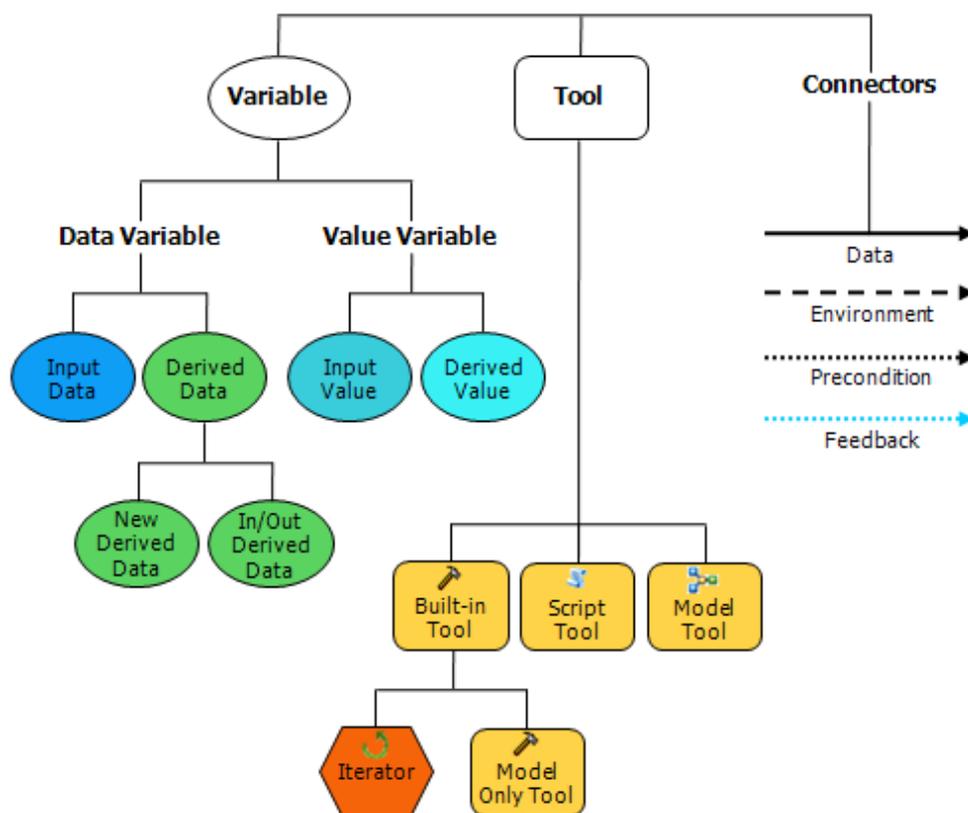


Figura 13. Diagrama de clasificación de los elementos de un ModelBuilder. Fuente: ArcGIS Resource Center.

Como se comentó en el modelo conceptual, van a ser automatizadas aquellas fases que permiten una sistematización del proceso, dejando al usuario la elección del método hidrológico-hidráulico más apropiado para cada zona de estudio.

Siguiendo el orden de las fases metodológicas se han desarrollado tres modelos:

## Modelo de preprocesado del terreno.

Este modelo permite automatizar la fase de delimitación de las cuencas hidrográficas necesaria para el estudio hidrológico. Se basa en las herramientas ArcHydroTools, conjunto de herramientas y modelos de datos que opera desde ArcGIS ofreciendo compatibilidad con los análisis de datos geospaciales y temporales. Estas herramientas permiten delimitar y caracterizar las cuencas hidrográficas en formato raster y vectorial así como definir y analizar redes hidrogeométricas, administrar datos de series temporales y configurar y exportar datos a modelos numéricos.

El modelo de preprocesado del terreno permite, a partir del modelo digital de elevaciones, procesar el terreno y obtener las capas de dirección de flujo, flujo acumulado, red de drenaje y cuencas y subcuencas. Este modelo realiza, en una única herramienta, el tratamiento de la topografía a partir del Modelo Digital de Elevaciones hasta obtener las cuencas hidrográficas de las zonas de estudio, que serán las unidades básicas para la determinación de los caudales de avenida.

El input del modelo debe ser una capa raster (Modelo Digital de Elevaciones) que contenga la información de las elevaciones de cada celda del modelo. Como capas resultado se obtienen una serie de capas en formato vectorial y raster que describen las principales características que definen las cuencas hidrológicas.

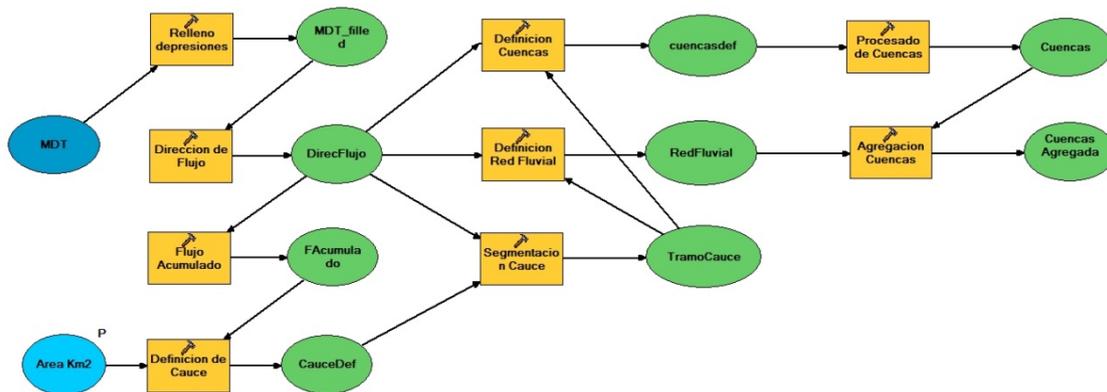


Figura 14. Esquema del ModelBuilder del Procesado del Terreno

## Modelo de Peligrosidad por Inundaciones

Este modelo tiene como finalidad automatizar el proceso de obtención del Índice normalizado de Peligrosidad por Inundaciones.

Se basa en la arquitectura de las ArcToolbox empleando las herramientas de geoprocésamiento necesarias para la aplicación de la metodología descrita en las fases anteriores. Permite la combinación de los resultados raster y la normalización de los parámetros para obtener un valor numérico en cada elemento del terreno expuesto a la inundación.

La entrada del modelo se corresponde con las capas raster de calados y velocidades para cada uno de los periodos de retorno estudiados (T 50, 100 y 500). Estas capas habrán sido generadas por el usuario mediante software externo de modelación hidráulica.

Como resultados se obtienen una serie de capas intermedias y la capa final que se corresponde con el Mapa de Peligrosidad por Inundaciones que presenta los valores del índice de peligrosidad combinando los periodos de retorno y los parámetros hidráulicos. Esta capa final es una capa raster con valores de 0 a 100 que se corresponden con los diferentes niveles de peligrosidad.

Las herramientas empleadas en el Modelo forman parte de las herramientas de geoprocésamiento de las siguientes extensiones de ArcGIS:

- 3D Analyst Tools
- Data Management Tools
- Spatial Analyst Tools

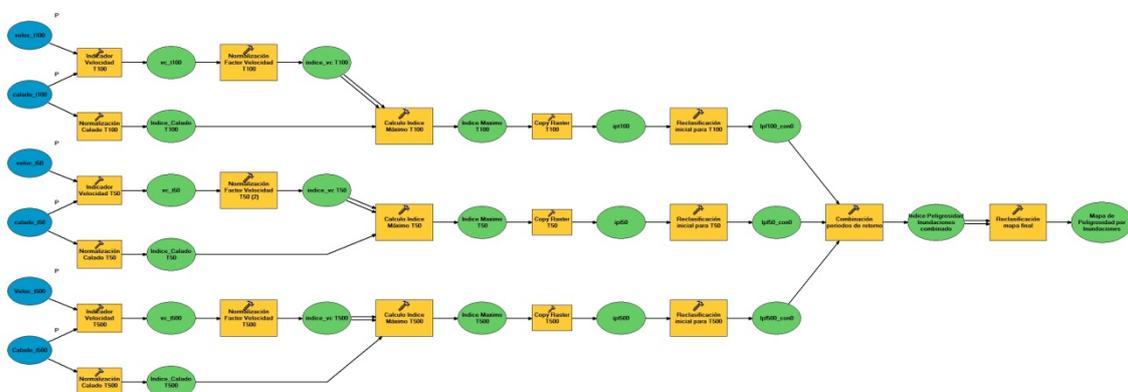


Figura 15. Esquema del ModelBuilder de la Peligrosidad por Inundaciones

## Modelo de Riesgo Específico

Este modelo tiene como objetivo obtener un mapa del riesgo específico a partir del mapa de peligrosidad calculado en el Modelo de Peligrosidad por Inundaciones y de la capa de Vulnerabilidad. Para dar cumplimiento a la ecuación que define el riesgo específico.

$$R_s = P \times V$$

Este modelo, al igual que los modelos anteriores, se basa en las herramientas de geoprocetamiento de ArcGIS.

Las variables de entrada del modelo son la capa raster de peligrosidad generada en el modelo anterior y la capa vectorial de usos del suelo generada a partir del cruce del SIOSE con la cartografía temática a escala 1:5.000, esta capa debe presentar el campo "Ponderac" donde se asigna la vulnerabilidad de cada elemento de usos del suelo, clasificada según lo dispuesto en la metodología. Como salida del modelo se obtiene una capa raster donde se delimitan las diferentes unidades de riesgo, obteniendo valores de 1 a 5 siendo 1 el elemento afectado con un riesgo bajo y 5 con un riesgo muy alto.

Las herramientas empleadas en el modelo pertenecen a las extensiones de ArcGIS:

- Conversion Tools
- Spatial Analyst Tools
- Data Management Tools



Figura 16. Esquema del Model Builder del Riesgo Específico

Este modelo puede integrarse dentro del Modelo de Peligrosidad o puede ejecutarse de Manera aislada.

## Validación del Algoritmo

Para validar el algoritmo todos los modelos han sido ejecutados y contrastados en las tres zonas piloto, es decir, en el Abanico Aluvial de El Hierro, en el núcleo de población de Panticosa (Huesca) y en el barranco de San Andrés de Santa Cruz de Tenerife.

El modelo ha sido desarrollado a partir de los datos obtenidos para el abanico aluvial de El Hierro combinando criterios hidrológico-hidráulicos y geomorfológicos. Posteriormente se han ajustado los parámetros para su correcta validación en las tres zonas piloto. Para ello, una vez creado el modelo se han realizado diversas iteraciones en las zonas piloto de manera que todos los parámetros se ajusten a la diversidad de características encontradas.

#### 4.4 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE RIESGOS DE INUNDACIONES

Los análisis de riesgos requieren la expresión espacial de las áreas asociadas a una peligrosidad, así como la ubicación geográfica de los elementos en riesgo y sus vulnerabilidades (Díez y Pujadas, 2002). Todo ello hace de la cartografía una herramienta fundamental en el análisis y evaluación de los riesgos naturales.

Los mapas de riesgos pueden definirse como el conjunto de mapas interrelacionados ya sean de Peligrosidad, Exposición-Vulnerabilidad o Riesgo propiamente dicho. Estos mapas forman una parte fundamental del Análisis de Riesgos desde sus primeras fases, ya que materializan la predicción espacial del Peligro.

Para un adecuado análisis del riesgo por inundaciones o de cualquier otro proceso, es necesario contar con una cartografía que muestre tanto las zonas que están asociadas a una determinada peligrosidad como la localización de aquellos elementos que están expuestos y pueden ser susceptibles de ser afectados por las inundaciones.

Es decir, la importancia de una cartografía de detalle en el análisis y evaluación del riesgo radica en ser una herramienta de gestión del riesgo. La cartografía de riesgo puede presentar diferentes modalidades en función del componente del riesgo que se quiera analizar. Existen mapas asociados a los tres factores del riesgo, la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad.

Las cartografías de riesgo propiamente dicho no tienen un amplio desarrollo en nuestro país. Sin embargo, son numerosos los estudios en materia de cartografía de zonas inundables o peligrosidad por inundaciones. Esta cartografía de peligrosidad por inundación, varía en función de la escala de representación, los objetivos y elementos representados.

Los **mapas de peligrosidad de inundaciones** (MPI; Durán, 1998) consisten en la representación espacial de los distintos aspectos que se analizan en la peligrosidad de las inundaciones, lo que da lugar a diferentes tipos de mapas (Díez y Pujadas, 2002):

- Mapas de peligrosidad de desarrollo espacio-temporal: estos mapas comprenden las áreas afectadas por el fenómeno y el tiempo de actuación y permanencia o sus efectos.
  - Mapas de áreas inundadas en una determinada inundación o cartografía unievento.
  - Mapas de áreas potencialmente inundables
  - Mapas de áreas o puntos anegados durante inundaciones históricas y paleoinundaciones
  - Mapas de permanencia de lámina de agua o evolución temporal
  - Mapas de los tiempos característicos
- Mapas de peligrosidad de la severidad del fenómeno natural. Estos mapas cuantifican los parámetros físicos del fenómeno.
  - Mapas de profundidad de lámina de agua
  - Mapas de velocidad del agua
  - Mapas de la carga de transporte
- Mapas de peligrosidad basados en la probabilidad del fenómeno. Normalmente expresada por el concepto de período de retorno o de frecuencia relativa. Da lugar a las cartografías más comunes como son los mapas de inundabilidad o de áreas inundadas para un periodo de retorno dado.
- Mapas de peligrosidad de riesgos asociados a las inundaciones, como son los movimientos gravitacionales que pueden influir en la estabilidad de las laderas:
  - Mapas de riesgos de daños por inundaciones (movimientos de laderas, erosión y arrastre de material sólido, sedimentación...)
  - Mapas de permeabilidad y escorrentía, con el comportamiento geotécnico de las litologías de la cuenca
  - Mapa litológico reclasificado según su excavabilidad, mapa de formaciones superficiales y mapa de estabilidades de vertientes
  - Deslizamientos, desprendimientos y procesos de erosión activa

## Mapas de exposición y vulnerabilidad

Tratan de reflejar la situación y permanencia temporal de los elementos en riesgo, fundamentalmente personas, bienes materiales y servicios, así como su fragilidad intrínseca ante la peligrosidad asociada a una inundación:

- Mapas de situación de elementos en riesgo
- Mapas de permanencia temporal de los elementos en riesgo
- Mapas de vulnerabilidad de los elementos en riesgo, reflejando la fragilidad intrínseca de cada sector (uso, disposición...) ante la inundación o la acentuación del riesgo que produce la presencia de población especialmente vulnerable. Ayala propone la distinción cartográfica entre las zonas inundables peligrosas para las personas, definidas de acuerdo al criterio de vulnerabilidad humana (calado-velocidad), frente a las zonas no peligrosas para las personas; para ello es preciso adoptar un criterio de aceptabilidad social del riesgo.

### **Mapas de peligrosidad y riesgo específico por inundaciones en el marco del proyecto:**

El desarrollo del módulo de inundaciones se basa en la elaboración de cartografía de peligrosidad por inundaciones integrada que contempla la severidad del evento simulado y la frecuencia del mismo.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio hidrológico-hidráulico se puede crear diferente cartografía de inundaciones que puede tratarse de manera complementaria. En primer lugar los principales resultados obtenidos pueden ser los mapas de velocidades de la lámina de agua y calado o profundidad del agua para cada evento simulado, en función de la frecuencia de la avenida.

A partir del Modelo de Peligrosidad generado con el algoritmo específico se elabora un mapa de peligrosidad por inundaciones cuantificado. Se trata de un mapa que representa la mayor o menor peligrosidad en una escala normalizada, integrando la información hidráulica de las avenidas frecuentes, ocasionales y extraordinarias, y con valores entre cero y cien.

Además, en el presente estudio se ha realizado la cartografía del Riesgo Específico por Inundaciones en las zonas estudiadas.

Este riesgo refleja la peligrosidad de la avenida y la mayor o menor vulnerabilidad de las unidades de usos del suelo afectadas por la avenida. El resultado es un mapa que representa el mayor o menor riesgo específico en una escala de 1 a 5 siendo cinco el valor de máximo riesgo.

## 5. RESULTADOS

El objetivo del Paquete de Trabajo 5: Módulo de Inundaciones es construir una herramienta para evaluar la peligrosidad y el riesgo por inundaciones. Los principales resultados obtenidos son los algoritmos para el desarrollo de la herramienta y los mapas de peligrosidad y riesgo específico por inundaciones. Además cabe destacar como resultado la metodología para los estudios de Inundaciones desarrollada en la presente memoria.

Por otro lado, no se debe olvidar que los estudios en las zonas piloto han permitido obtener una serie de resultados intermedios para cada una de las zonas evaluadas.

En este apartado se van a desarrollar los principales resultados siguiendo el orden del presente informe, y según han sido obtenidos en los diferentes apartados del mismo:

### 5.1 Resultados del Modelo Conceptual

Esta fase ha permitido obtener como resultado el modelo conceptual del Módulo de Inundaciones que permite esquematizar las principales fases contempladas para el desarrollo de la herramienta. En la memoria se recogían los principales aspectos del modelo conceptual, cuyo esquema desarrollado se muestra en la figura 17.

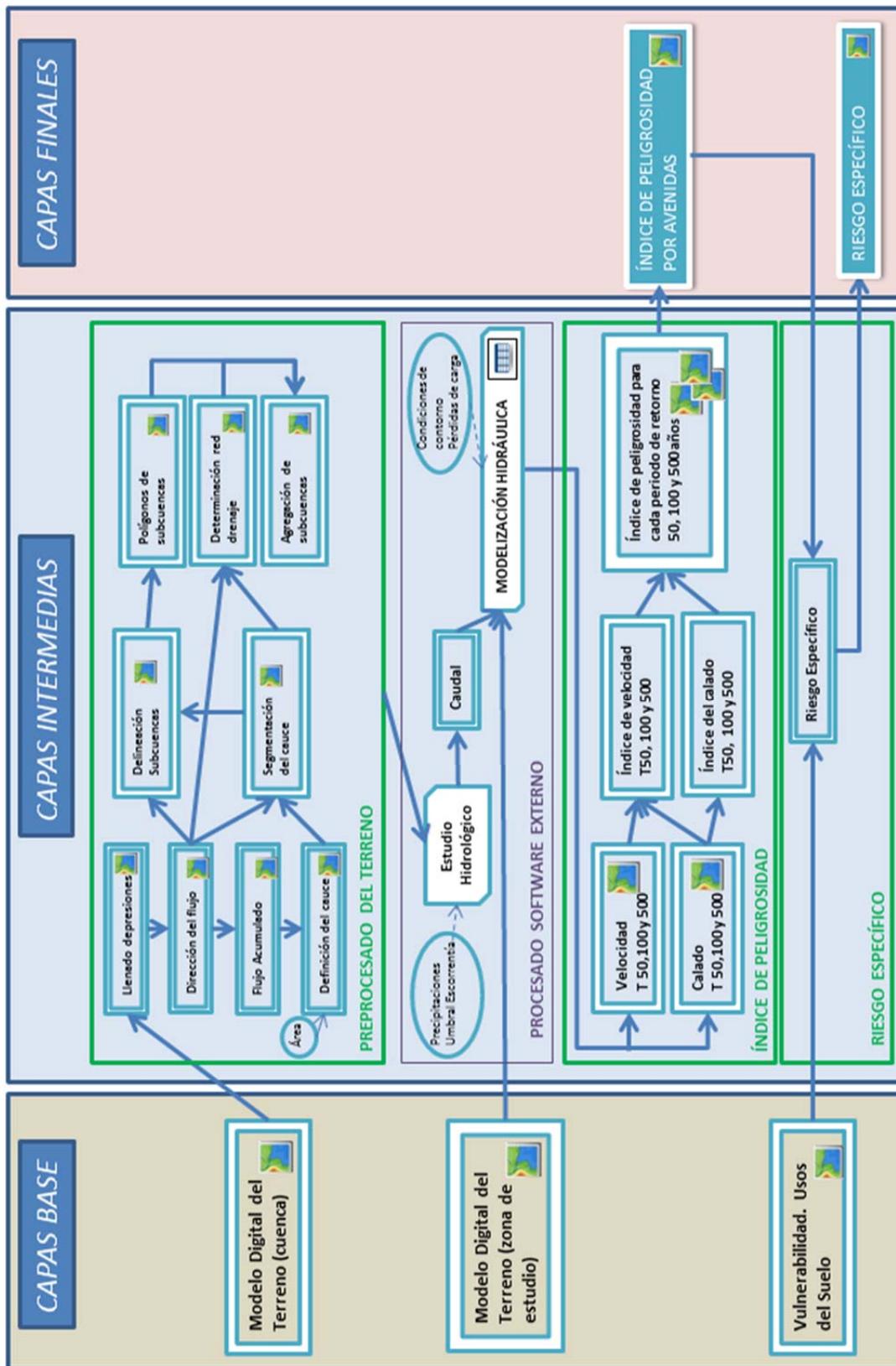


Figura 17. Modelo Conceptual del Módulo de Inundaciones

## 5.2 Resultados en las fases de la Metodología

### *Estudio cartográfico*

Los principales resultados del estudio cartográfico son los modelos digitales de elevaciones de las zonas de estudio (El Hierro, Panticosa y San Andrés).

Para cada una de las zonas de estudio se han obtenido los modelos digitales de la cuenca hidrográfica con un tamaño de pixel de 5 m. y de la zona de estudio en detalle con un pixel de medio metro de lado.

Además, de manera complementaria se han obtenido los modelos digitales de sombras de todas las zonas que permiten una mejor interpretación del relieve de la zona en cuestión. (Figuras 18 a 23)

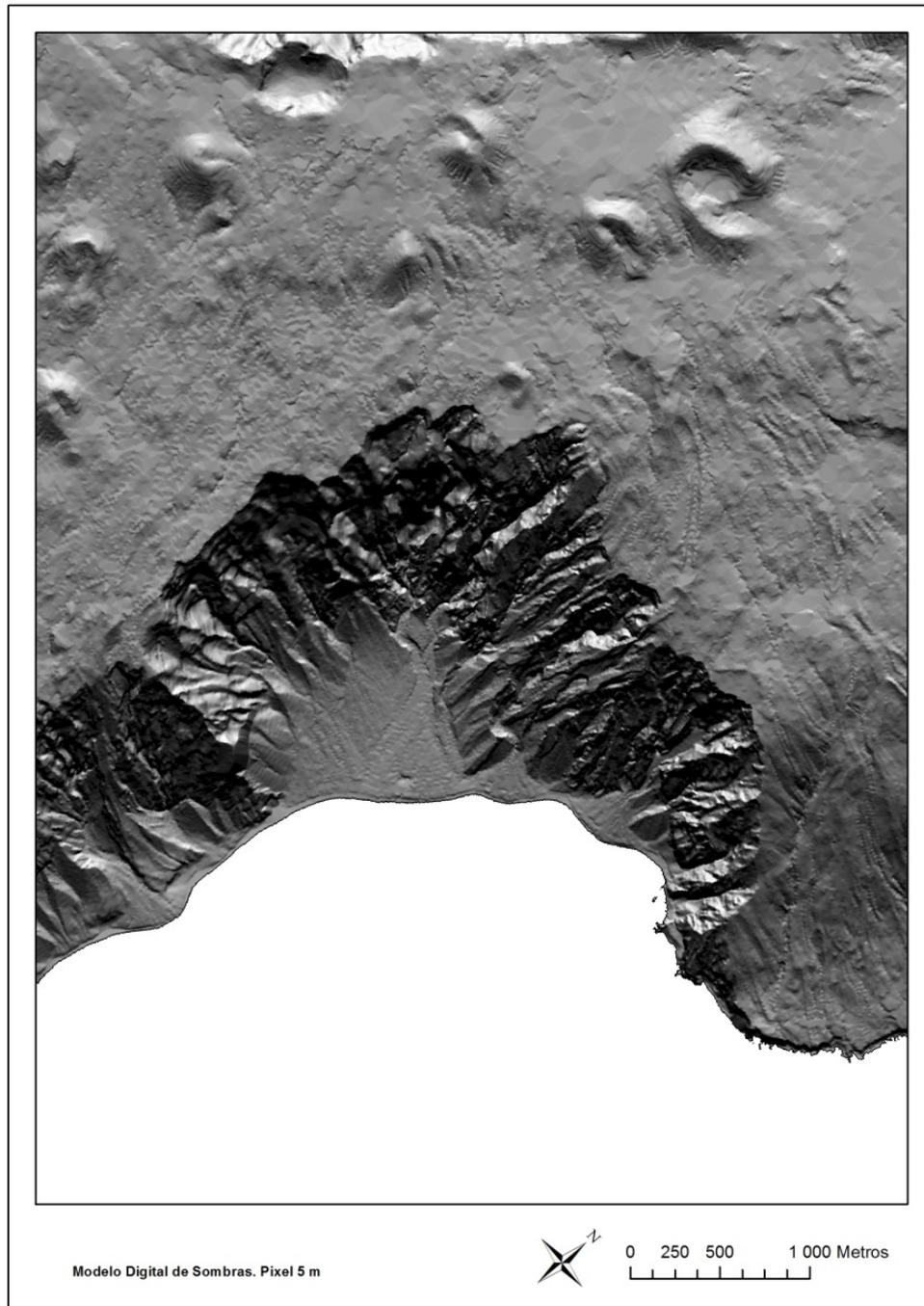


Figura 18. Modelo Digital de Sombras de la cuenca del Abanico de El Hierro. Tamaño de pixel de 5m.

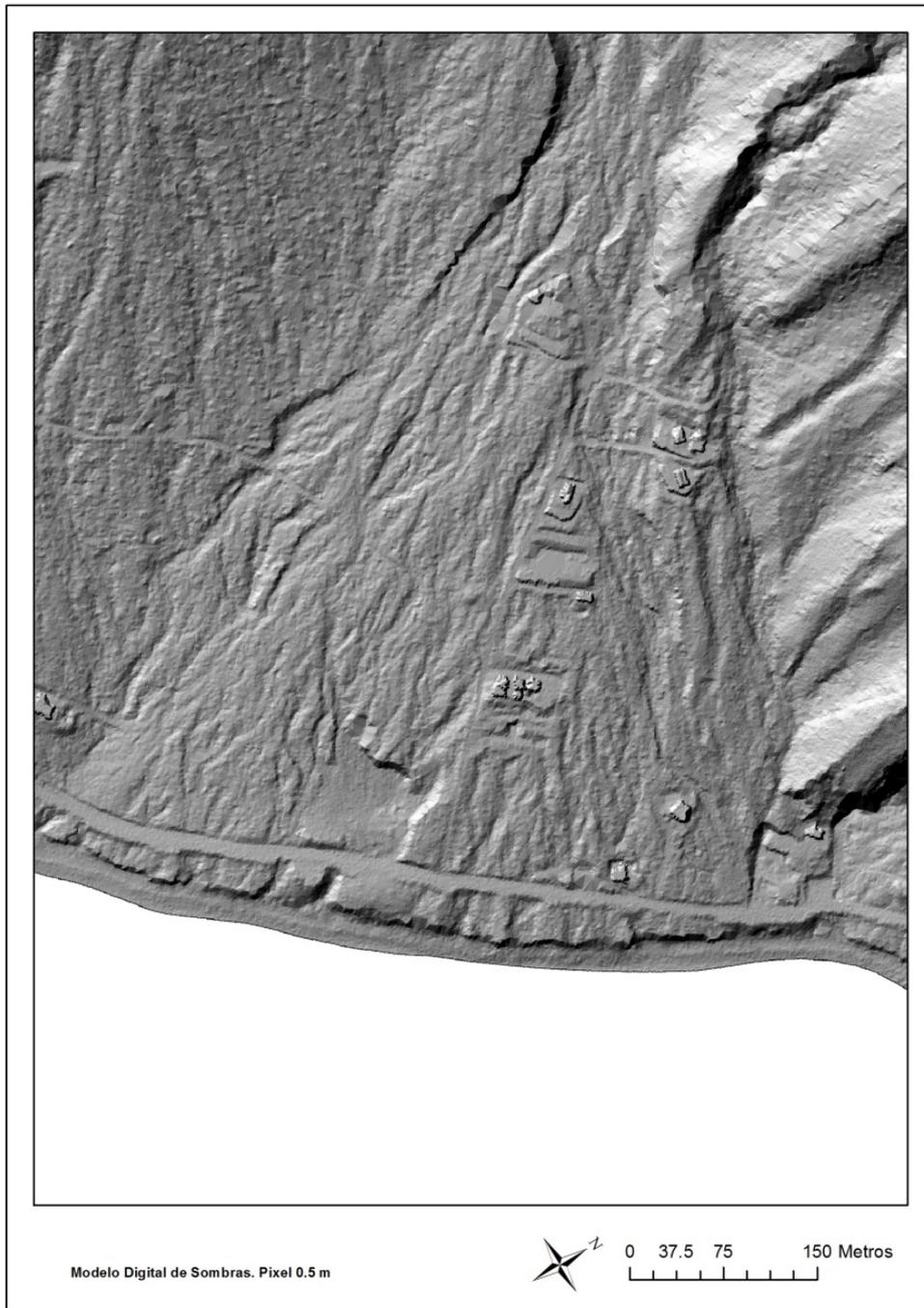


Figura 19. Modelo Digital de Sombras de la zona de estudio en detalle del Abanico de El Hierro. Tamaño de pixel de 0,5 m

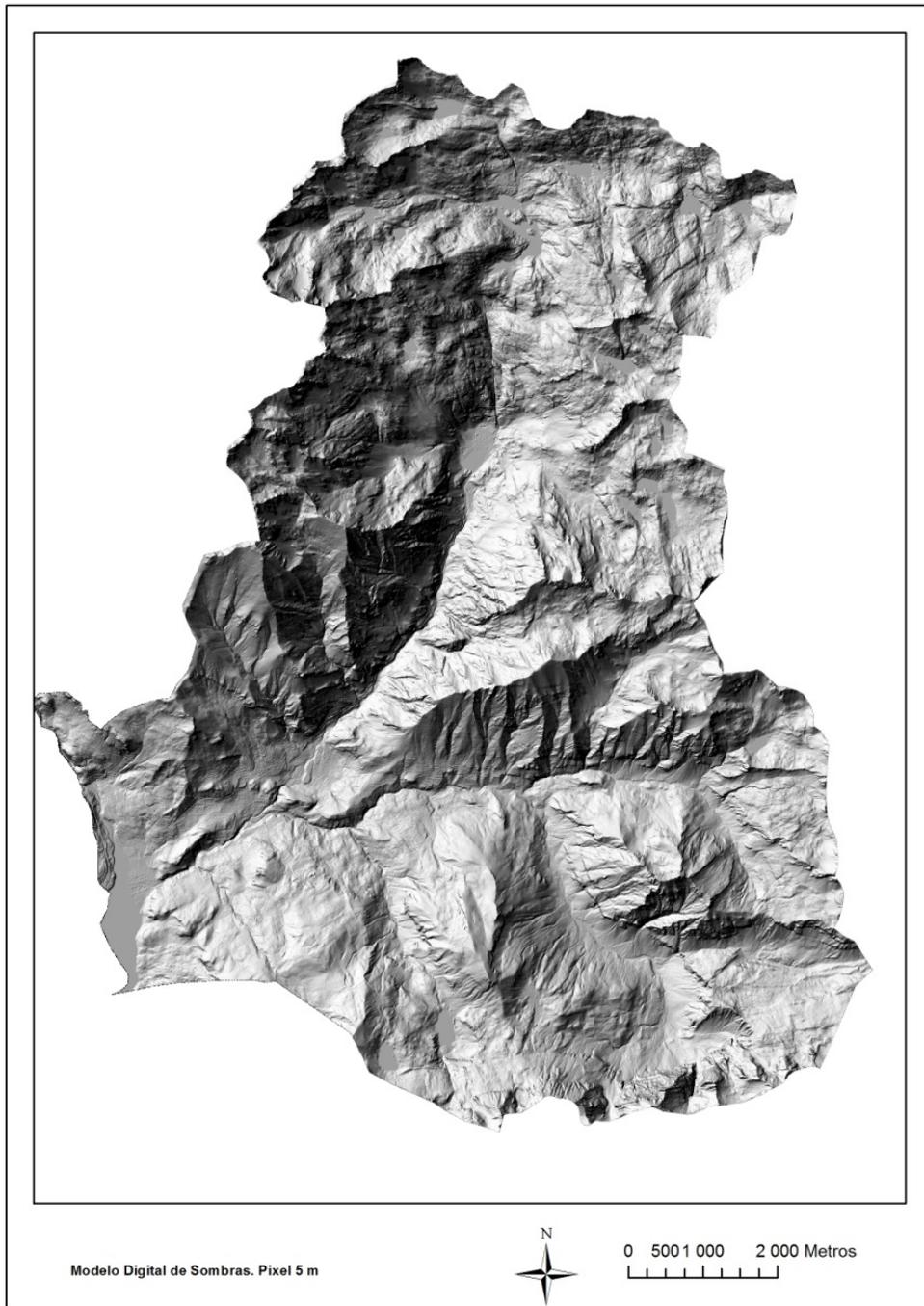


Figura 20. Modelo Digital de Sombras del Término Municipal de Panticosa. Pixel 5 m.

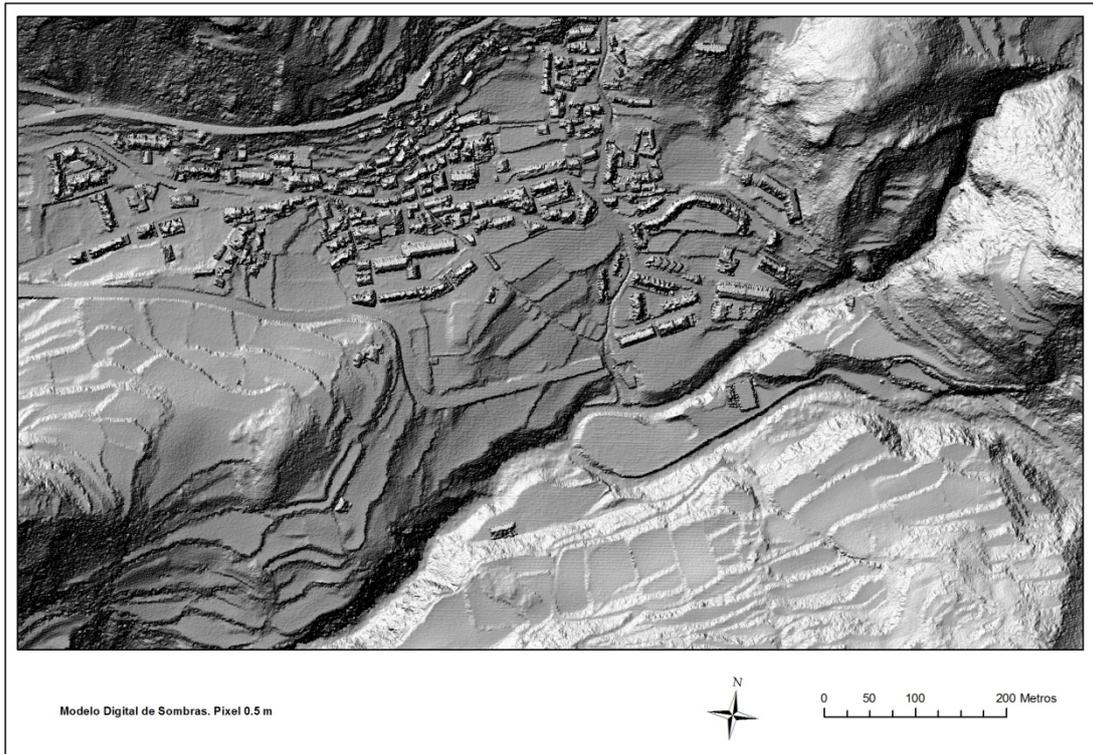


Figura 21. Modelo Digital de Sombras del núcleo de población de Panticosa. Pixel 0,5 m.

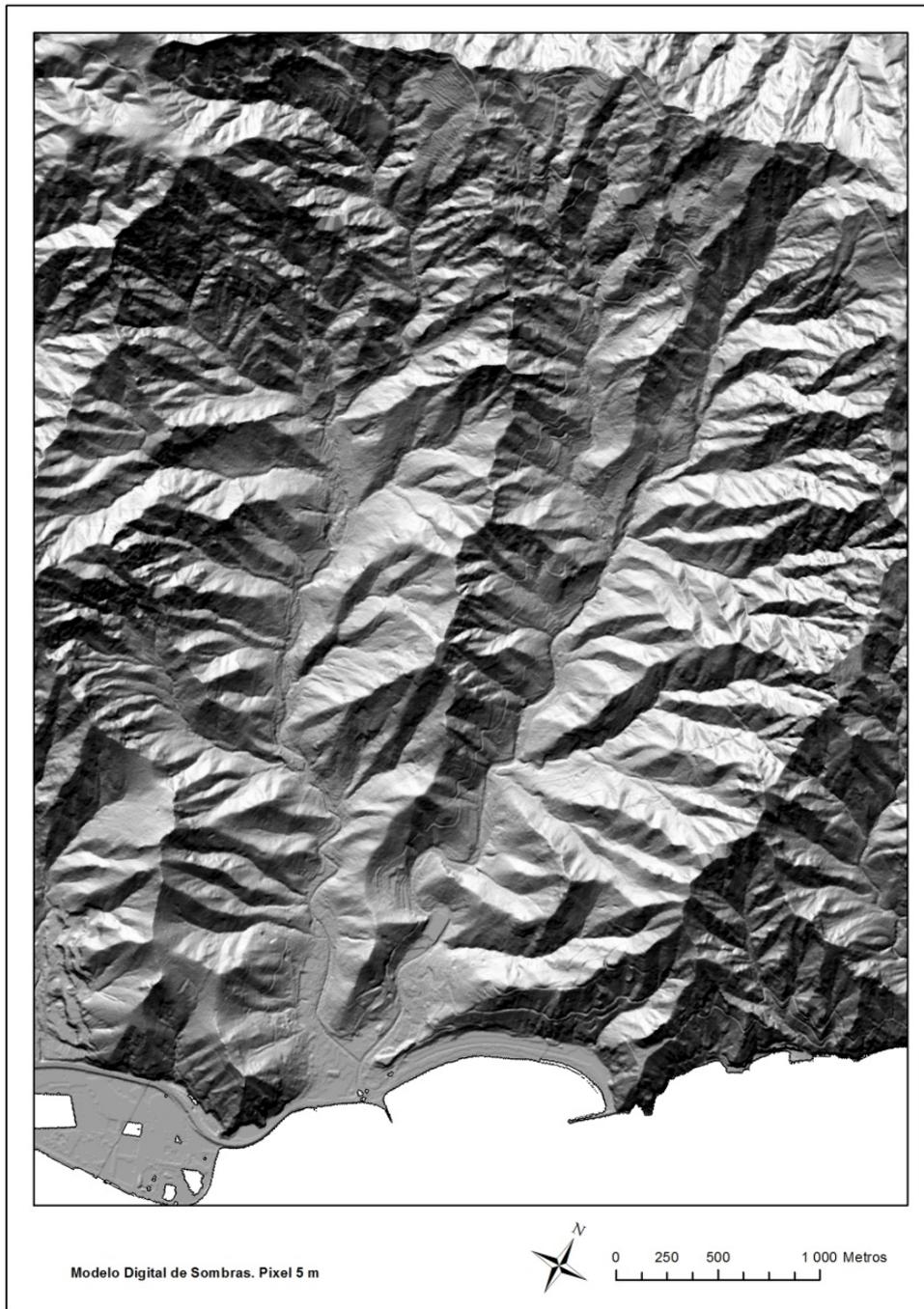


Figura 22. Modelo Digital de Sombras del Barranco de San Andrés. Pixel 5 m.



Figura 23. Modelo Digital de Sombras de la zona de detalle del Barranco de San Andrés. Pixel 0,5 m.

## Estudio Hidrológico

La fase del estudio hidrológico tiene como objetivo principal obtener los caudales de avenida. Para el proyecto en cuestión se han empleado diferentes metodologías en función de la zona de estudio.

En primer lugar se realizó el preprocesado del terreno con el objetivo de obtener las cuencas hidrográficas y la red de drenaje de cada zona piloto así como diferentes capas asociadas entre las que se encuentran el mapa de dirección de flujo y el de flujo acumulado. En las figuras 24 a 27 se representan las cuencas y subcuencas hidrográficas de las tres zonas de estudio así como la red de drenaje de las mismas.

En cuanto a la estimación de caudales, debido a las características de cada zona se han aplicado las metodologías que mejor se adaptan a cada una de ellas y a la fuente de información que se posee. El cálculo del caudal se ha realizado para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, son los periodos establecidos en la directriz básica de inundaciones y empleados para la determinación del índice de peligrosidad por inundaciones.

En la zona Piloto de El Hierro, se realizó el cálculo del caudal en la sección de control del ápice del mismo. La metodología empleada ha sido el Método Racional modificado por Témez debido a las características de la zona de estudio con una cuenca hidrográfica que no supera los 4 km<sup>2</sup> y la posibilidad tratar la cuenca como un elemento unitario.

**Tabla 7 . Caudal punta y precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en la zona de El Hierro**

Cuencas	Pmax24 T50 (mm)	Pmax24 T100 (mm)	Pmax24 T500 (mm)	Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal T100 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal T500 (m <sup>3</sup> /s)
<b>Abanico Aluvial de El Hierro</b>	285.54	326.64	386.19	59.47	72.67	92.33

En el núcleo de población de Panticosa, debido las dimensiones de la cuenca (unos 97 km<sup>2</sup>) y las características de la misma, se ha empleado un método pseudodistribuido, el método del hidrograma unitario mediante la aplicación HEC-HMS. Como resultado se ha obtenido el caudal punta de los ríos Caldarés y Bolática aguas arriba de la confluencia de ambos.

Las precipitaciones máximas diarias se han obtenido mediante la aplicación MAXPLUWIN y la determinación de la precipitación areal de los datos obtenidos para un conjunto de puntos sistemáticos dentro de las subcuencas.

**Tabla 8. Caudal punta y precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en la zona de Panticosa.**

Subcuencas	Pmax24 T50 (mm)	Pmax24 T100 (mm)	Pmax24 T500 (mm)	Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal T100 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal T500 (m <sup>3</sup> /s)
<b>Caldarés</b>	137	154	195	164	199	288.5
<b>Bolática</b>	134	151	191	149	182.8	266.5

En el Barranco de San Andrés se ha realizado una delimitación de los barrancos que drenan al cauce principal y se han calculado los caudales punta mediante el Método Racional modificado por Témez para aquellos barrancos cuya superficie es superior a 2,5 hectáreas en el punto de entrada de la zona de estudio en detalle.

Los datos de precipitaciones se han obtenido mediante el cálculo de la precipitación areal a partir de las isoyetas de PMD distribuidas del consejo insular de aguas de Tenerife.

**Tabla 9. Caudal punta y precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años para las subcuencas del Barranco de San Andrés.**

Subcuenca	Pmax24 T50 (mm)	Pmax24 T100 (mm)	Pmax24 T500 (mm)	Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal T100 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal T500 (m <sup>3</sup> /s)
<b>1</b>	180.4	212.9	293.6	57.6	74.2	117.2
<b>2</b>	170.0	197.1	271.7	54.8	69.0	110.2
<b>3</b>	156.1	187.5	276.6	0.6	0.9	1.5
<b>4</b>	153.3	184.6	273.7	1.5	2.0	3.5
<b>5</b>	149.5	180.1	268.6	1.3	1.7	3.0
<b>6</b>	145.1	175.0	262.6	2.0	2.7	5.0
<b>7</b>	138.8	167.8	253.0	0.5	0.6	1.1
<b>8</b>	136.0	164.7	249.4	0.7	0.9	1.6
<b>9</b>	142.7	170.1	249.0	3.3	4.4	7.7

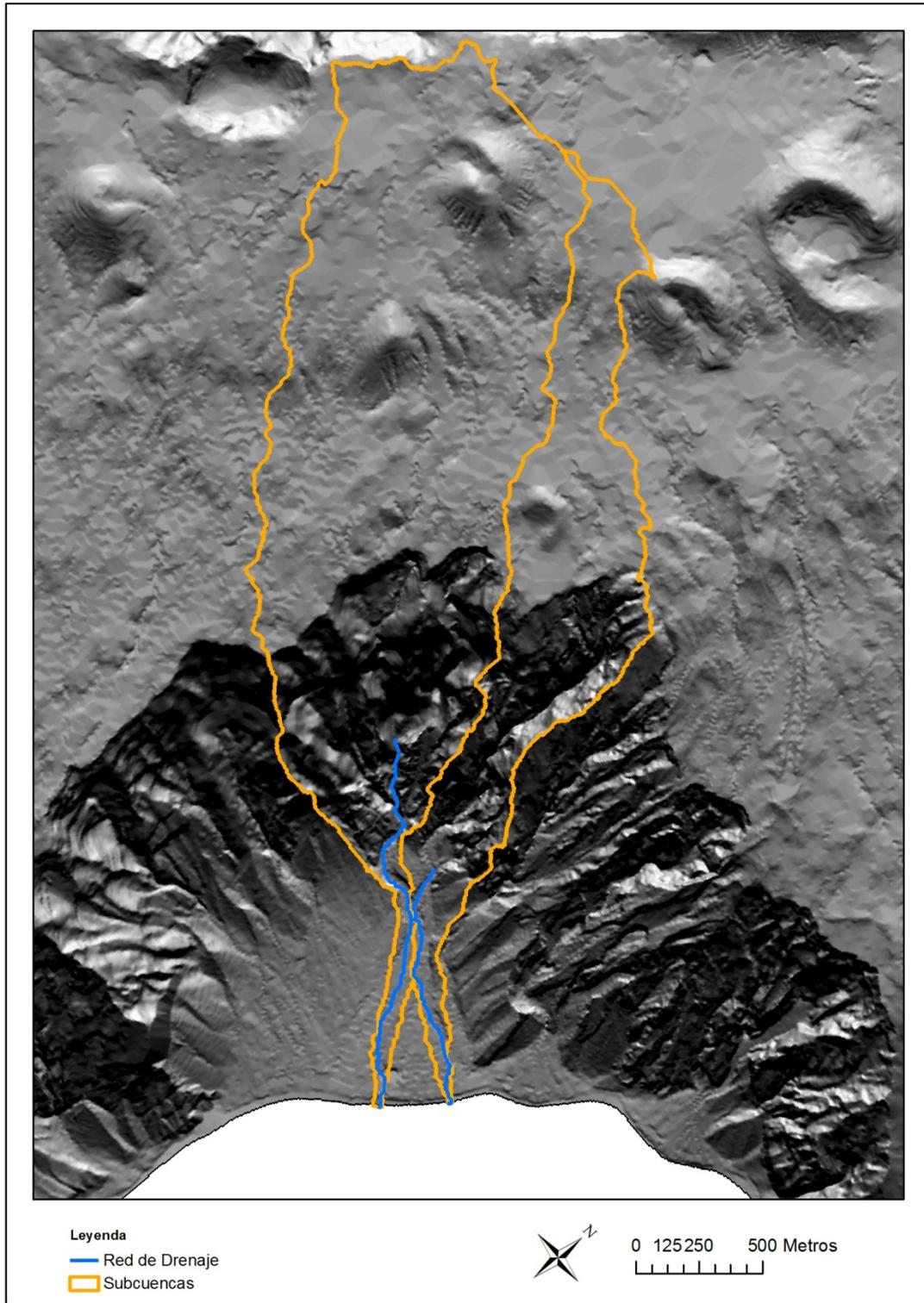


Figura 24. Cuencas y Red de Drenaje en el Abanico Aluvial de Las Playas (El Hierro)

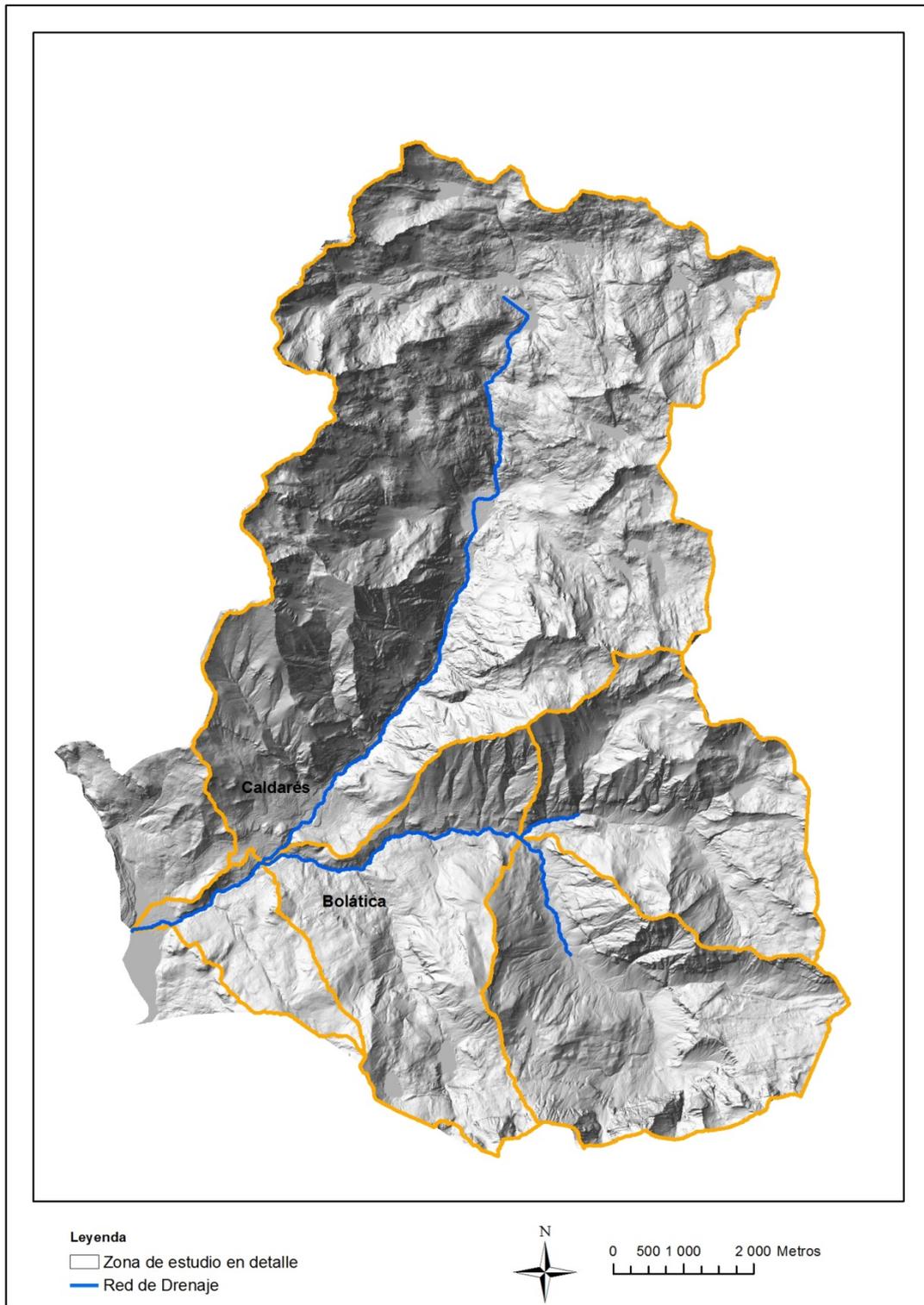


Figura 25. Cuencas y Red de Drenaje en Panticosa (Huesca)

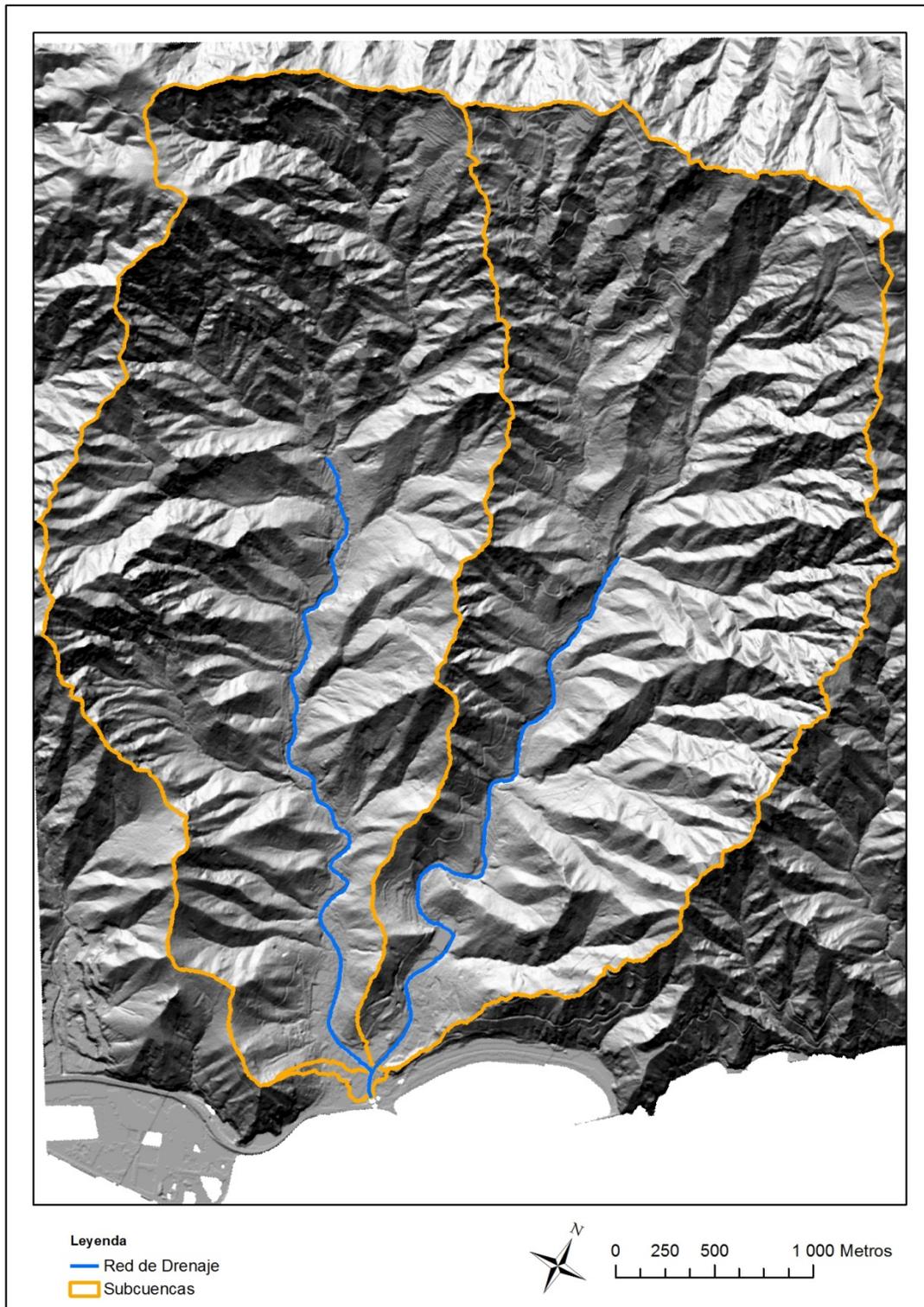


Figura 26. Cuencas y Red de Drenaje Principales en San Andrés (Tenerife)

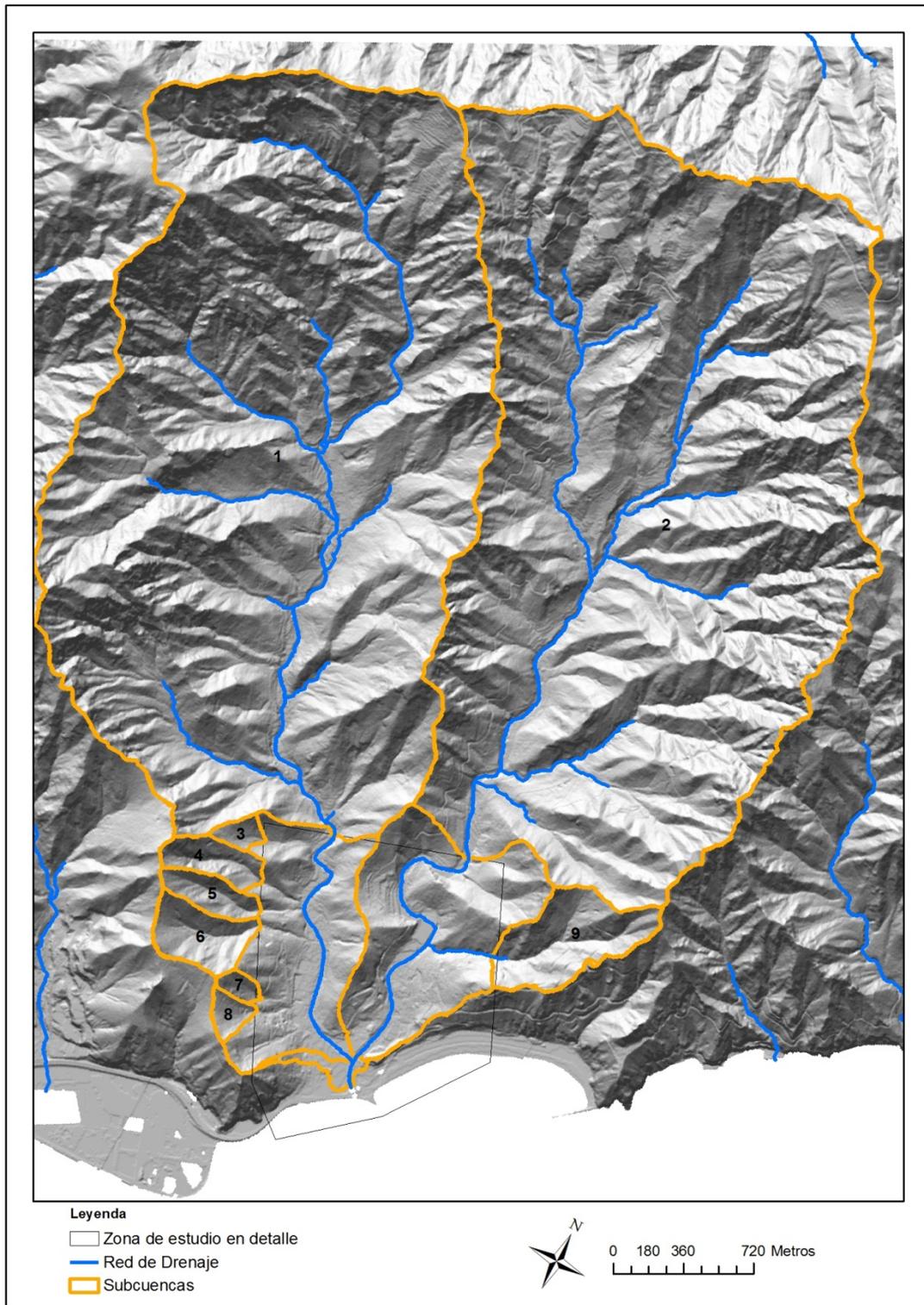


Figura 27. Subcuencas y Red de Drenaje estudiados en la modelación hidrológica-hidráulica en San Andrés (Tenerife)

## *Estudio hidráulico*

Dentro del estudio hidráulico el principal resultado obtenido son los mapas de los parámetros hidráulicos para cada periodo de retorno en las zonas piloto. Estos mapas son el resultado de las simulaciones hidráulicas realizadas con el software de modelación bidimensional IBER. La representación de los parámetros hidráulicos velocidad y calado caracterizan el flujo de la avenida para cada uno de los eventos considerados y permiten cuantificar la avenida en función de su mayor o menor peligrosidad.

El resultado son unas capas raster que asignan un valor de profundidad de la lámina de agua y velocidad de la misma en cada punto de la zona inundable por la avenida de 500 años. En total se obtuvieron las siguientes capas:

- Velocidades máximas para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el Abanico Aluvial de El Hierro.
- Calados máximos para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el Abanico Aluvial de El Hierro.
- Velocidades máximas para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el núcleo de población de Panticosa.
- Calados máximos para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el núcleo de población de Panticosa.
- Velocidades máximas para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el barranco de San Andrés.
- Calados máximos para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el barranco de San Andrés.

## *Peligrosidad por Inundaciones*

A partir de los mapas de calados y velocidades para cada periodo de retorno se calculó, en primer lugar, el índice de profundidad y el índice del producto. Mediante la combinación de ambos se obtuvo el Índice normalizado de Peligrosidad por Inundaciones en cada zona piloto en función de las características de profundidad y velocidad de la lámina de agua.

El cálculo del índice se realizó mediante la implementación del algoritmo “Peligrosidad por Inundaciones” integrado en el ModelBuilder.

Como resultado se obtuvieron los siguientes mapas, que pueden consultarse en el ANEXO I:

- Mapa de peligrosidad por inundaciones integrado en el Abanico Aluvial de El Hierro.
- Mapa de peligrosidad por inundaciones integrado en el núcleo de población de Panticosa.
- Mapa de peligrosidad por inundaciones integrado en el Barranco de San Andrés.

Estos mapas permiten obtener una ponderación cuantitativa de las zonas que presentan una mayor peligrosidad al paso de las avenidas, asimismo delimitan las zonas inundables asignando un valor de 0 a 100, donde 100 se corresponde con la máxima peligrosidad atendiendo a los criterios mencionados. Se trata de un valor normalizado que permite una buena comparación de unas zonas con otras.

Además del resultado final correspondiente al mapa de peligrosidad para cada una de las zonas, se han obtenido una serie de resultados intermedios que se corresponden con el valor del índice del calado, el índice del producto y los índices de peligrosidad combinando ambos para cada periodo de retorno.

Para la zona del Abanico aluvial del Hierro, cabe destacar que, si bien las zonas inundables abarcan gran parte de la formación aluvial, la mayor peligrosidad se concentra en dos canales principales que constituyen las principales vías de distribución del flujo.

En el caso del núcleo de población de Panticosa, las zonas con mayor peligrosidad se encuentran dentro del cauce natural del río, si bien al paso de las avenidas se reactivan canales secundarios de los ríos Caldarés y Bolática. Al ser cauces bien encajados prácticamente la totalidad del flujo que puede presentar mayor peligrosidad se encuentra en el propio cauce natural a excepción del aparcamiento situado en la zona sur del núcleo de población.

Para la zona de San Andrés, las mayores velocidades y calados se presentan dentro del propio cauce del río, si bien, dada la existencia de numerosos barrancos de pequeña entidad que recogen el flujo de subcuencas menores también se ven afectadas determinadas zonas del núcleo de población.

### ***Vulnerabilidad***

La vulnerabilidad, como ya se comentó en el apartado de metodología, se evaluó a partir de la cartografía del SIOSE que representa de manera homogénea el territorio nacional. Esta cartografía se empleó en combinación con la cartografía temática a escala 1:5.000 de núcleos de población, vías de comunicación e hidrografía proporcionada por las comunidades autónomas. Esta combinación permite un mayor detalle a la hora de representar las diferentes entidades vulnerables.

El principal resultado de esta fase es la cartografía de vulnerabilidad de las zonas de estudio en detalle donde se presenta el grado de vulnerabilidad en cada una de las unidades de usos del suelo en función de su mayor o menor afección por el paso de la avenida.

En el ANEXO II puede verse la cartografía de usos del suelo y su correspondiente vulnerabilidad para cada una de las zonas piloto:

- Abanico aluvial de El Hierro: Es una zona con un uso del suelo principal compuesto por matorral xerófilo macaronésico que presenta una vulnerabilidad baja frente a las inundaciones. Los elementos expuestos que presentan mayor vulnerabilidad son una serie de edificaciones aisladas y la carretera que discurre paralela a la línea de costa.
- Panticosa: Los elementos con mayor vulnerabilidad se encuentran en la zona del núcleo de población donde están presentes las edificaciones y vías de comunicación como principales elementos vulnerables. Además, existen dos aparcamientos, uno de ellos en la zona de confluencia de los principales ríos. El resto de la superficie se corresponde con pastos y formaciones boscosas.
- San Andrés: Las unidades de mayor vulnerabilidad se localizan en el núcleo de población y en las vías de comunicación y edificaciones situadas principalmente en el fondo de los barrancos.

### *Riesgo*

El resultado fundamental del estudio en su conjunto son los mapas de Riesgo Específico para cada una de las zonas piloto. Según lo establecido en el apartado de metodología, la obtención del Riesgo Específico se basa en el cruce de la peligrosidad con la vulnerabilidad, es decir, es el riesgo por unidad de exposición.

El resultado es una capa raster que asigna a cada elemento de la misma (cada pixel o celda) un valor de riesgo en función de la peligrosidad por inundaciones que presente y del uso de suelo en el que se encuentre.

Como puede verse en el ANEXO III se obtienen los siguientes resultados:

- Abanico aluvial de El Hierro: El riesgo específico es mayor en la zona de la carretera y en alguna edificación aislada por ser las infraestructuras con mayor vulnerabilidad. Es de destacar que, si bien hay edificaciones que no se ven afectadas por las avenidas con las condiciones topográficas actuales, también podrían ser objeto de estudio o análisis en detalle por encontrarse en zonas próximas a las mismas.
- Panticosa: El mayor riesgo específico se corresponde con la zona del aparcamiento situado al sur del núcleo de población, en la confluencia de los

ríos Caldarés y Bolática. Esta zona, tanto el aparcamiento propiamente dicho como la edificación presente en el mismo son los elementos que presentan un mayor riesgo específico. Por el contrario, el núcleo de población, al tener una mayor altitud y estar alejado de los cauces principales no se ve afectado por las avenidas de estos dos ríos.

- San Andrés: El mayor riesgo específico se encuentra en las zonas del núcleo de población y determinados tramos de la vía de comunicación que discurre paralela al cauce del barranco.

### *Cartografía de Peligrosidad, Vulnerabilidad y Riesgo*

Los resultados obtenidos en el estudio han sido tratados para su correcta representación. Para una adecuada presentación de los mismos la cartografía de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo específico, así como el resto mapas generados en el desarrollo del proyecto se van a representar a dos niveles:

- Representación analógica: Se encuentra representada en mapas de tamaño A3 en los Anexos. Dada la diversidad de tamaños para cada una de las zonas, la escala de los mapas se ha adaptado a cada zona de estudio, aplicando la que permita una mejor representación de los resultados
- Representación digital: De manera complementaria, los principales resultados se han representado en el visor del proyecto.

## **5.3 Resultados de los Algoritmos de Cálculo**

El resultado principal de esta fase son los algoritmos de cálculo que implementados a través de la herramienta del ModelBuilder, que permiten la automatización de los procesos comentados en la metodología.

Todos los modelos se encuentran englobados de las cajas de herramientas personalizadas que han sido generadas en el marco del software ArcGIS. Estas herramientas son guardadas como archivos con formato .tbx.

Los modelos o algoritmos generados mediante el Model Builder son los siguientes:

- Modelo de Preprocesado del terreno: este modelo permite, a partir del modelo digital de elevaciones, obtener las cuencas hidrográficas y red de drenaje del mismo.
- Modelo de Peligrosidad por Inundaciones: Este modelo calcula, a partir de los resultados del estudio hidráulico (calados y velocidades) la peligrosidad por inundaciones en una zona determinada. Dando como resultado una capa raster

con valores de 0 a 100 en función de la mayor o menor peligrosidad en cada punto.

- Modelo de Riesgo Específico: Este modelo parte de la definición de Riesgo Específico, cruzando las capas de peligrosidad y vulnerabilidad y dando como resultado una capa raster de riesgo por inundaciones donde cada elemento presenta un valor de 1 a 5 siendo 5 las zonas de mayor riesgo asociado

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se detallan los avances obtenidos así como las limitaciones encontradas en el desarrollo del Módulo de Inundaciones.

En primer lugar comentar que la presente memoria proporciona una visión general del proceso para la elaboración de estudios de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo específico por inundaciones adaptado a las zonas piloto de estudio. En la misma se recopilan las principales metodologías existentes en materia de peligrosidad por inundaciones y se desarrolla la metodología empleada en las zonas de estudio para abordar el estudio riesgo específico por inundaciones.

A continuación se van a exponer los principales resultados y limitaciones encontradas en las diferentes fases de la metodología:

El estudio cartográfico de detalle ha sido realizado a partir de datos LIDAR. Esta información constituye uno de los datos topográficos de mayor precisión existente en la actualidad que permite realizar modelos digitales del terreno con una resolución de hasta 0,5 m de tamaño de pixel. Este nivel de detalle es particularmente importante en el estudio hidráulico debido a que la principal fuente de error del mismo procede del modelo digital de elevaciones empleado. Por ello es necesario actualizar la información de los datos LIDAR o de la cartografía utilizada cuando ocurra un evento que altere de manera significativa la topografía del terreno ya sea por levantamiento de construcciones, erosión del terreno o caída de bloques, entre otros.

Cabe exponer que en el caso del Barranco de San Andrés, la topografía del terreno no pudo ser validada en campo, por lo que sería conveniente realizar un levantamiento de las secciones de los tramos del cauce próximos a las principales infraestructuras. Este levantamiento permitiría realizar una topografía aún más precisa en las zonas donde pueda haber una clasificación errónea de los datos LIDAR que no reflejen correctamente la delimitación de las infraestructuras.

El estudio hidrológico-hidráulico constituye una herramienta fundamental en el análisis de la peligrosidad y riesgo por inundaciones. El estudio ha sido realizado con los datos disponibles para cada zona piloto. Dada la ausencia de datos de aforo han sido empleados métodos hidrometeorológicos para la estimación de la escorrentía, que constituyen una simplificación del proceso de transformación precipitación-escorrentía.

Comentar que las áreas inundables obtenidas en la simulación hidráulica se refieren a la escorrentía canalizada, no en fase de ladera. Se han tenido en cuenta las principales cuencas de aporte con el tamaño mínimo comentado en la metodología. Por otro lado destacar que al no disponer de información sobre las infraestructuras de drenaje en las zonas urbanas, éstas no han sido tenidas en cuenta en la simulación.

Debido a la ausencia de datos foronómicos, las simulaciones hidráulicas han sido validadas a partir de criterios geomorfológicos mediante el estudio de las principales formaciones aluviales pero sin calibración hidráulica por no contar con información de estaciones de aforo que permitiera un mayor ajuste de los parámetros.

En cuanto a los mapas de vulnerabilidad, el objetivo de seleccionar el SIOSE como base de los usos del suelo es contar con unos criterios comunes para el territorio nacional y una cartografía homogénea para todas las zonas. Además, el empleo de la cartografía 1:5.000, disponible en la mayoría de las comunidades autónomas, tiene el objetivo de delimitar las unidades más vulnerables frente a las inundaciones (es decir las edificaciones y vías de comunicación), de una manera más precisa. Si bien, cabe comentar que en la determinación del Riesgo Específico por Inundaciones sería conveniente realizar una delimitación de las unidades vulnerables con un mayor detalle con el fin de emplear una escala comparable con la capa de peligrosidad (que tiene como base topográfica el LIDAR) y que permita una delimitación más definida de los umbrales del riesgo.

El algoritmo de cálculo tiene como ventaja principal permitir automatizar la obtención del índice de peligrosidad y riesgo específico a partir de la información proporcionada por el usuario. Dada la complejidad de los estudios hidrológico-hidráulicos y la imposibilidad de establecer un criterio único para la determinación de los parámetros hidráulicos estos procesos se realizaran a partir de un software externo. Por lo tanto el modelo de Peligrosidad por Inundaciones permite la entrada de las capas raster de calados y velocidades generadas por el usuario a partir del software específico de modelación hidráulica que utilice el usuario.

El modelo para el cálculo del Riesgo Específico puede integrarse en el modelo de peligrosidad al utilizar como entrada del modelo la capa resultado de peligrosidad. Este modelo realiza una reclasificación del índice de peligrosidad y una combinación del mismo con la capa de vulnerabilidad. Tiene la principal ventaja de permitir la automatización del proceso de delimitación de las zonas de riesgo específico por inundación.

## 7. CONCLUSIONES

La metodología detallada en la memoria proporciona una visión global de los estudios de peligrosidad y riesgo específico por inundaciones. Esta metodología constituye una herramienta útil para establecer los pasos básicos del análisis de peligrosidad por inundaciones.

Los modelos calculados constituyen unos instrumentos útiles en la ordenación del territorio por facilitar los procesos necesarios para el análisis de riesgo específico y por lo tanto representar una herramienta que permite priorizar las zonas que presentan un mayor riesgo específico y deben ser objeto de actuación.

Los estudios de las zonas piloto han constituido un elemento fundamental en el Módulo de Inundaciones por servir de base para el desarrollo de la metodología aplicada, y por permitir la validación de los algoritmos del Índice de Peligrosidad y Riesgo Específico.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYALA-CARCEDO, Francisco Javier (1990): "Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de mapas de riesgos geológicos". Boletín Geológico y Minero, ITGE, Madrid. Vol. 101-3, págs. 456-467.
- AYALA-CARCEDO, F.J; OLCINA CANTOS, J. (2002): "Riesgos Naturales". Ariel Ciencia. Editorial Ariel. Madrid.
- CARRACEDO, J.C.; RODRÍGUEZ BADIOLA, E.; GUILLOU, H.; DE LA NUEZ, J. y PÉREZ-TORRADO, F.J. (2001). "Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries". Estudios Geológicos, 57: 1-124.
- DÍEZ-HERRERO, A. (2002a): "Condicionantes geomorfológicos de las avenidas y cálculo de caudales y calados". Riesgos Naturales. Editorial Ariel, Ariel Ciencia, Barcelona, Cap. 49, pp. 921-952.
- DÍEZ-HERRERO, A. (2002c): "Aplicaciones de los sistemas de información geográfica al análisis del riesgo de inundaciones fluviales". Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión de los Riesgos Geológicos y el Medio Ambiente, Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, Madrid, nº 3, 85-112.
- DÍEZ-HERRERO, A.; LAÍN HUERTA, L. y LLORENTE ISIDRO, M. (2008). "Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración". Instituto Geológico y Minero de España (Madrid).
- DÍEZ-HERRERO, A.; BALLESTEROS, J.A.; LLORENTE, M.; BODOQUE, J.M.; STOFFEL, M.; EGUÍBAR, M.A.; FERNÁNDEZ, J.A.; GÉNOVA, M.; LAÍN, L. y RUBIALES, J.M. (2008b): "Towards a classification of dendrogeomorphological evidences and their utility in flood hazard analysis". Geophysical Research Abstracts 10: 07837.
- FAIRFIELD, J. y LEYMARIE, P. (1991). "Drainage networks from grid elevation models". Water Resources Research 27(5): 709-717.
- FELÍCISIMO, A.M. (1994): "Modelos Digitales del Terreno. Introducción y Aplicaciones en Ciencias Ambientales". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Univesidad de Oviedo.
- FERRER, J.: "Análisis estadístico de caudales de avenida". Monografías CEDEX. M26.
- FERRER, M.; RODRIGUEZ, J.; ESTRELA, T.; (1995) "Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica". Ingeniería del Agua, Vol. 2, número 4. Pg 58.
- FUSTER, J.M.; HERNÁN, F.; CENDRERO, A.; COELLO, J.; CANTAGEL, J.M.; ANCOCHEA, E.; IBARROLA, E. (1993): "Geomorfología de la Isla de El Hierro". Boletín de la Real Sociedad Española de Historia. Sección Geológica; 88, 1-4.

- GARBRECHT, J. y MARTZ, L.W. (1996). Comentado en “Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation, and Hydrologic Simulations” por W. Zhangan y D. R. Montgomery. *Water Resources Research* 32(5): 1461-62.
- GARCÍA RUIZ, J.M.; GÓMEZ VILLAR, A. y ORTIGOSA IZQUIERDO, L.M. (1987). “Aspectos dinámicos de un cauce fluvial en el contexto de su cuenca: el ejemplo del río Oja”. Monografías del Instituto Pirenaico de Ecología (C.S.I.C.) e Instituto de Estudios Riojanos, nº 3, 112 p. Jaca-Logroño.
- GARDINER, V. (1974). “Drainage Basin Morphometry”. *Technical Bulletins of the British Geomorphological Research Group*, 14, 48 pp.
- GÓMEZ, M; MACCHIONE, F; RUSSO, B. (2010): “Modelo Físico para el estudio de los criterios de riesgo en zonas urbanas”. XXIV Congreso latinoamericano de hidráulica Punta del Este, Uruguay.
- GRAVELIUS, H. (1914). “Flubkunde. Gosche’sche Verlagshan dlung”. Berlin, In.
- GUTIERREZ ELORZA, M. (1994). “Geomorfología de España”. Ed. Rueda. 526 p.
- HORTON, R.E. (1932). “Drainage basin characteristics”. *Transactions of the American Geophysical Union*, 13, 350-361.
- HORTON, R.E. (1945). “Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology”. *Geological Society of America Bulletin*.
- IBISATE GONZÁLEZ DE MATAUCO, A. (2004). “Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del Rio Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas”. *Boletín de la A.G.E.*, nº38, 311-329.
- JARDÍ, M. (1985). “Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen”. *Revista de Geografía*, nº XIX, 41-68.
- KNIGHTON, D. (1984): *Fluvial Forms and Proceses*. Arnold, London, 218 pp.
- LAIN, L.; LLORENTE, M.; ROMERO, C.: “Cartografía geomorfológica de los abanicos detríticos activos de la isla de El Hierro (Canarias, España)”. IGME.
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. (1964): “Fluvial Processes in Geomorphology”. V.H. Freeman, San Francisco, 522 pp.
- LÓPEZ, F., NAVARRO, F., ROMERO, A., CONESA, C., CASTILLO, V., MARTÍNEZ, J. y GARCÍA, C. (1988): *Geometría de cuencas fluviales: las redes de drenaje del Alto Guadalentín*. Proyecto Lucdeme IV, Madrid, Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MARTÍN-SERRANO, A.; SALAZAR, A.; NOZAL, F. Y SUÁREZ, A. (2004-2008): *Mapa geomorfológico de España, Escala 1:50.000. Guía para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 128 pp. + CD-ROM.

- MARTÍN VIDE, J.P. (2006): "Ingeniería Fluvial". Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2006.
- MILLER, V. C. (1953). "A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch mountain area: Va. and ten". Office Naval Research Project NR Tech. Rept, 3. Columbia University.
- MINISTERIO DE FOMENTO: "Máximas lluvias diarias en la España peninsular". Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras. Serie Monografías (1999).
- MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B. y LADSON, A.R. (1991). "Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications". Hydrological Process, 5(1): 3-30.
- MORISAWA, M. (1968): "Streams. Their dynamics and morphology". McGraw-Hill, N. York, 175 pp.
- MORISAWA, M. (1985): "Rivers. Form and process. Geomorphology Texts 7". Longman, London, 222 pp.
- PEDRAZA, J.; PEÑA, J.L. Y TELLO, B. (1988): "La cartografía geomorfológica". En: Gutiérrez, M. y Peña, J.L. (Eds.): Perspectivas en Geomorfología, Monografías SEG nº 2, 207-223.
- PEDRAZA, J. de; CARRASCO, R.M.; DÍEZ, A.; MARTÍN DUQUE, J.F.; MARTÍN RIDAURA, A. y Sanz, M.A. (1996): Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones, Editorial Rueda, Madrid, 414 pp.
- POTTER, W. D. (1953). "Rainfall and topographic factor that affect run-off". Transactions of the American Geophysical Union, 34, 67-73.
- RÍOS ARAGÜES, S. (2001): "El Medio Físico y su peligrosidad en un sector del Pirineo Central". Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Medio Ambiente, nº 1/2001, Zaragoza, 135 pp.
- ROMERO DÍAZ, M.A. y LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1987). "Morfometría de redes fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir". Papeles de Geografía (Física). Nº12, 47-62.
- SÁNCHEZ MARTÍNEZ, F.J.; LASTRA FERNANDEZ, J. (2011): "Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables". Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid
- SCHUMM, S.A. (1956). "Evolution of drainage systems and slopes in badlans at Perth-Amboy. New Jersey". Geological Society of America Bulletin.
- SCHUMM, S.A. (1977): "The Fluvial System". John Wiley & Sons, New York, 338 pp.

- SEILER, R.A.; HAYES, M. y BRESSAN, L.; (2002): "Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring". *International Journal of Climatology*. 22: 1365-1376.
- SHERMAN, L.K. (1932). "The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage basins". *Transactions of American Geophysical Union*, nº43, 332-339.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (1975): "Urban hydrology for small watersheds, Technical release", 55, USDA, Washington D.C.
- STRAHLER, A.N. (1958). "Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms". *Geological Society of America Bulletin*, 69, 279-300.
- STRAHLER, A. (1964). "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks in Chot", V. T. (Ed): *Handbook of applied hydrology*. New York, 4.40-4.74.
- TARBUCK y LUTGENS (1999): *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física*. Prentice Hall. Madrid, 616 pp.
- TÉMEZ, J.R. (1991). "Extended and Improved Rational Method". Version of the Highways Administration of Spain. *Proc. XXIV AIHS Congress*, Vol. A, 33-40.
- THOMAS, D.M. y BENSON, M.A.(1970): "Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics. *Geol. Surv. Water-Supply Pap (U.S)*, 1975
- TRIBE, A. (1992). "Automated Recognition of Valley Heads from Digital Elevation Models". *Earth Surface Processes and Landforms* 16(1): 33-49
- USACE. U.S. ARMY (1957): "Flood Prediction Techniques". U.S. Department of the Army, Washington. D.C., TB 5-550-3.
- USACE. U.S. Army Corps of Engineers (2010): *HEC-GeoHMS, Users Manual*, Hydrologic Engineering Center, Davis (California).
- USACE. U.S. Army Corps of Engineers (2010): *HEC-HMS, Users Manual*, Hydrologic Engineering Center, Davis (California).
- VV.AA (2010): "IBER. Manual de referencia hidráulico".
- VV.AA (1990): "Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial". MOPU
- VV.AA (2004): "Manual: Cálculo hidrometeorológico de aportaciones y crecidas. CHAC". CEDEX
- ZHANG, W. y MONTGOMERY, D.R. (1994). "Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation, and Hydrologic Simulations". *Water Resources Research* 30 (4): 1019-1028.
- ZONENSEIN, J.; MIGUEZ, M.G.; MAGALHAES, L.P.C.; VALENTIN, M.G.; y MASCARENHAS, F.C.B. (2008): "Flood Risk Index as an Urban Management

Tool". 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.