

# **GeoMEP**

## Modelo de Evaluación de Pérdidas por Peligros Geológicos.

Aplicación al Caso de las Islas Canarias.

**Miguel Llorente Isidro**



Instituto Geológico y Minero de España y  
Consortio de Compensación de Seguros

Ministerio de Economía y Competitividad

# GeoMEP

## Modelo de Evaluación de Pérdidas por Peligros Geológicos.

Aplicación al Caso de las Islas Canarias.

**Miguel Llorente Isidro**

Instituto Geológico y Minero de España y  
Consortio de Compensación de Seguros

Ministerio de Economía y Competitividad





### **Director del proyecto por el IGME**

Miguel Llorente Isidro

### **Responsable del proyecto por el CCS**

Alfonso Nájera Ibáñez

### **Colaboradores por orden alfabético**

Blanco Santos, Fernando; Cañadas García-Baquero, Félix; Cañadas García-Baquero, Juan; Carracedo Cifuentes, Rafael; Galindo Jiménez, Inés; García Canales, Carmen; García Mayordomo, Julián; Laín Huerta, Luis; Manrique Ruiz, Alfonso; Martínez Allegue, Carlos; Martínez Gómez, Sandra; Mombiedro, Rafael; Morales de Francisco, José M.; Nieto Libro, Ana; Paredes Bartolomé, Carlos; Pérez Lentini, Javier; Plata González, Ana M.; Prieto, Sara; Sánchez Blázquez, Ignacio; Soriano Clavero, Belén; Valenti Ramírez, Eva.

### **Comisión de Seguimiento del Convenio**

CCS: Luis García Prieto, Alfonso Nájera Ibáñez, Alfonso Manrique Ruiz, Belén Soriano Clavero, Carmen García Canales.

IGME: Juan José Durán Valsero, Ángel Martín-Serrano, Juan Antonio López Geta, Miguel Llorente Isidro, Luis Laín Huerta, Inés Galindo Jiménez, José Manuel Baltuille Martín.

*Con la colaboración del Departamento de Ingeniería Geológica y Minera de la Universidad Politécnica de Madrid.*

Editado por:  
Consorcio de Compensación de Seguros

Copyright:  
© Consorcio de Compensación de Seguros  
© IGME (Instituto Geológico y Minero de España)  
NIPO papel: 720-15-133-1  
e-NIPO: 720-15-134-7  
Depósito Legal: M-34018-2015

Distribución gratuita

## **PRESENTACIÓN**

El Consorcio de Compensación de Seguros es una figura central del sistema de cobertura aseguradora de catástrofes naturales de España y una referencia internacional en este sector. Si bien su principal labor es de carácter indemnizatorio, la entidad es consciente de la necesidad de incrementar la concienciación en materia de prevención de desastres naturales, así como la necesidad de promover programas de investigación que sirvan como motor del conocimiento y del desarrollo en esta materia. Por este motivo, el Consorcio de Compensación de Seguros lleva más de una década apoyando iniciativas de este carácter, cuyos resultados se expresan en forma de publicaciones como la presente, jornadas divulgativas y seminarios técnicos y científicos.

En esta ocasión, se aborda un detallado análisis de los riesgos geológicos de naturaleza eventualmente catastrófica en las Islas Canarias con el objeto de mejorar el conocimiento de los riesgos existentes y aproximar una estimación razonable de la incidencia en términos económicos para el Consorcio del posible impacto de un evento extraordinario de esta naturaleza.

Pero más allá de este objetivo concreto, se pretende también con esta publicación trasladar a todos los interesados las conclusiones alcanzadas como estímulo para nuevos estudios y como recurso de referencia en materias relacionadas con la prevención y mitigación de desastres.

Consorcio de Compensación de Seguros



## PRÓLOGO

En la última década la humanidad ha experimentado una sucesión de eventos que han transformado la percepción de las catástrofes naturales y cómo afrontarlas. Las cifras con las que se describen estos desastres son del orden de miles de millones de euros en pérdidas económicas y peor aún, en cientos de miles de víctimas. Estas demoledoras cifras son la consecuencia directa e inmediata de los desastres, pero más allá del lugar en que acontecen, se producen transformaciones sociales con reflejo en las políticas ambientales del mundo entero, desde cuestiones tan elementales como las energéticas hasta el aprovechamiento del territorio. Sirva de ejemplo la inversión internacional en sistemas de alerta temprana de tsunamis para el Océano Índico tras el impacto del tsunami de Sumatra de 2004 o el cambio en las políticas energéticas europeas tras el desastre de Fukushima de 2011. Pero ¿hasta qué punto están justificados estos cambios? ¿Qué grado de conocimiento existe sobre dónde pueden ocurrir los desastres? Sin saber qué puede ocurrir en un territorio, cualquier actuación puede resultar inútil o incluso contraproducente. Y dejar de lado actividades productivas por un miedo infundado no deja de ser otra forma de desastre.

Trabajos como éste no contestan plenamente todas las preguntas, pero sí aportan luz identificando y caracterizando algunos de los elementos que podrían acontecer, y subrayando los vacíos que faltan por cubrir. Todo ello debe servir como incentivo para reunir más esfuerzos orientados hacia conocer mejor el medio en el que vivimos y en última instancia asegurar un futuro mejor.

Director del Instituto Geológico y Minero de España



# Índice

<b>1. Introducción .....</b>	<b>9</b>
1.1. Generalidades .....	9
1.2. Objetivos.....	11
1.3. Materiales .....	12
1.4. Métodos.....	13
<b>2. Marco conceptual y definiciones .....</b>	<b>19</b>
2.1. Clasificaciones de los riesgos naturales .....	27
2.2. Considerandos principales .....	41
<b>3. Características de la zona de estudio.....</b>	<b>43</b>
3.1. Geografía física y humana.....	43
3.1.1. Localización, superficie y orografía.....	43
3.1.2. Clima.....	45
3.1.3. Flora y fauna .....	53
3.1.4. Economía .....	55
3.1.5. Demografía .....	56
3.2. Contexto geológico.....	59
3.3. Características geológicas generales .....	63
3.4. Origen de las Islas Canarias.....	67
3.4.1. Teorías basadas en el punto caliente .....	67
3.4.2. Teorías tectónicas.....	71
3.5. La formación de las islas en Canarias .....	75
3.5.1. Fases submarinas y complejos basales .....	75
3.5.2. Fases de crecimiento subaéreo.....	77
3.5.3. Evolución de la actividad volcánica en Canarias .....	78
3.5.4. Grandes deslizamientos .....	81
<b>4. Estudio de inundaciones .....</b>	<b>85</b>
4.1. Introducción .....	85
4.2. Análisis hidrológico .....	90
4.2.1. Estudio pluviométrico.....	90
4.2.2. Estudio de escenarios de precipitación .....	97
4.2.3. Regionalización de la precipitación.....	106
4.2.4. Cálculo de escorrentía superficial.....	114
4.3. Modelo hidráulico empírico en un SIG.....	123
4.4. Análisis geomorfológico.....	132
4.5. Análisis histórico .....	142
<b>5. Estudio de la sismicidad .....</b>	<b>153</b>
5.1. Introducción .....	153
5.2. Marco tectónico .....	158
5.2.1. Discontinuidades tectónicas .....	158
5.2.2. Catálogo sísmico .....	160
5.2.3. Fuentes sismogénicas .....	161
5.3. Evaluación probabilística del peligro sísmico .....	162
5.4. Efecto de sitio .....	171
5.4.1. Geotécnia.....	171
5.4.2. Geología .....	173
5.4.3. Topografía.....	177
5.5. Vulnerabilidad y correlación PGA-Intensidad .....	180

<b>6. Estudio del volcanismo .....</b>	<b>199</b>
6.1. Introducción .....	199
6.2. El volcanismo histórico en Canarias .....	202
6.3. Modelo de cálculo .....	204
6.3.1. Evento volcánico .....	205
6.3.2. Probabilidad espacial de nuevos eventos .....	208
6.3.3. Modelo de recurrencia .....	210
6.3.4. El generador de eventos .....	211
6.4. Simulación de coladas de lava .....	211
6.5. Selección de escenarios .....	213
<b>7. Estudio de bienes expuestos .....</b>	<b>229</b>
7.1. Introducción .....	229
7.2. La BBDD alfanumérica y su preprocesado .....	231
7.3. La BBDD gráfica y su preprocesado .....	240
7.4. Vehículos y personas .....	242
7.5. Exposición a inundaciones .....	243
7.6. Exposición sísmica .....	246
7.7. Exposición a volcanismo .....	247
<b>8. Resultados .....</b>	<b>249</b>
8.1. Riesgo por inundaciones .....	249
8.1.1. El peor escenario por cuenca vertiente e isla .....	260
8.1.2. El peor escenario de T500 por isla .....	260
8.1.3. El peor escenario del archipiélago en T500 .....	261
8.2. Riesgo sísmico .....	261
8.3. Riesgo volcánico .....	274
<b>9. Conclusiones .....</b>	<b>287</b>
9.1. Exposición .....	289
9.2. Inundaciones .....	289
9.3. Sismicidad .....	290
9.4. Volcanismo .....	291
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>293</b>

# 1. Introducción

## 1.1. Generalidades

Con la implementación masiva de los sistemas de computación personal se han producido numerosos y significativos avances en las ciencias de la Tierra. En particular, en todo cuanto concierne a la posible ocurrencia de fenómenos naturales con capacidad suficiente como para alterar la vida cotidiana. Estos fenómenos son los llamados peligros naturales, y si bien su estudio es tan antiguo como la propia historia del hombre (Olcina y Ayala, 2002), la forma de evaluarlos está cada vez más orientada hacia una perspectiva cuantitativa, en contraposición a las aún vigentes evaluaciones cualitativas. Cómo valorar la posible ocurrencia de un peligro natural no es una cuestión que se haya resuelto aún. El motivo es que los sistemas naturales que dan lugar a los peligros son tan complejos que la comprensión completa de los mismos aún parece lejana. Con este horizonte por meta, se planteó la creación de un modelo que fuera capaz de estimar pérdidas a futuro del modo cuantitativo más objetivo posible.

Para ello se ha tomado el archipiélago de Canarias como zona de ensayo. El Instituto Geológico y Minero de España desarrolla diferentes proyectos y actividades en el marco geográfico de las Islas Canarias desde hace décadas, abordando cuestiones relativas a la peligrosidad volcánica, a peligrosidad por movimientos del terreno (deslizamientos, desprendimientos) o a inundaciones torrenciales, entre otras.

El estudio de los peligros geológicos en regiones volcánicas adquiere una dimensión esencial en cuanto a la ordenación territorial se refiere, entendiéndose a ésta desde su más amplia perspectiva, es decir: planificación urbana y edificación; planificación de infraestructuras de transportes y de instalaciones; gestión y aprovechamiento de regiones naturales o gestión del territorio en general. Otras aplicaciones de los estudios de peligros geológicos están relacionadas con la información que aportan, siendo ésta de primera necesidad, por ejemplo, para el desarrollo de planes de protección civil o para realizar estimaciones de pérdidas económicas y con ello establecer los marcos de prevención y de seguros más convenientes. Por otra parte, los estudios de peligros geológicos aportan el marco informativo imprescindible para el establecimiento de medidas de protección adecuadas, resulten éstas en medidas de predicción y alerta, o en medidas estructurales o no estructurales de defensa

frente a la ocurrencia de eventos de distinta naturaleza, o medidas de autoprotección de toda clase.

La singularidad volcánica, en lo que a peligrosidad natural se refiere, atiende a la multitud e intensidad de procesos geológicos activos con potencial destructivo que tienen lugar, y que responden tanto a la actividad volcánica propiamente dicha como a procesos asociados o inducidos por aquélla. Así, de forma directa, en regiones volcánicas activas se pueden esperar peligros por emisión de materiales (cenizas y bombas volcánicas, coladas lávicas, nubes ardientes, emisiones de sustancias tóxicas); por explosiones o fallos de los edificios volcánicos (explosiones freatomagmáticas, creación de calderas) y por procesos desencadenados por la actividad volcánica (lluvia ácida, lahares). Además, como consecuencia del fenómeno volcánico, es esperable un cierto grado de actividad sísmica (debido principalmente al movimiento de gases y fluidos en la corteza). De actividad eruptiva subaérea en regiones con presencia de manto de nieve o hielo, se pueden esperar procesos de fusión repentina de éstos y la subsiguiente generación de coladas de lodos, inestabilidad de laderas, etc. De forma indirecta, también cabe esperar procesos de torrencialidad, debido principalmente a las fuertes pendientes de éstos jóvenes territorios y, en muchos casos, debido también a su elevada altitud, lo que asociado con precipitaciones moderadas puede derivar en episodios de escorrentía superficial de tipo avenida-rápida y a procesos de erosión superficial importantes.

En concreto, en las Islas Canarias han ocurrido recientemente diversos procesos geológicos activos, tales como avenidas torrenciales, movimientos de ladera, y dos crisis sismo-volcánicas. Pero estos hechos no son aislados, ya que a lo largo del periodo histórico existe constancia de que este tipo de situaciones son relativamente frecuentes y, en términos geológicos, son aspectos que forman parte de la rica naturaleza del archipiélago.

Estos eventos de la dinámica natural de la Tierra, no serían especialmente reseñables fuera del ámbito científico si no fuera porque existen bienes y personas que, siendo vulnerables a estos procesos geológicos activos, se sitúan en los lugares donde acontecen. Es más, en Canarias, la densidad de población es del orden de tres veces la media nacional, con un aumento de la población muy significativo en un periodo de tiempo corto y reciente. Dicho de otro modo, suponiendo la peligrosidad geológica constante, con el aumento de la población

y de los bienes expuestos, cabe esperar un incremento en las pérdidas potenciales por peligros geológicos.

Para el Consorcio de Compensación de Seguros, además del interés científico y de divulgación de los conocimientos en relación con los procesos geológicos potencialmente peligrosos, le es necesario llegar a conocer de algún modo aproximado, el capital del que debería disponer en caso de tener que hacer frente a un episodio singular.

## 1.2. Objetivos

El Consorcio de Compensación de Seguros planteó al Instituto Geológico y Minero de España una pregunta formulada de modo directo y sencillo “¿cuánto capital líquido es necesario disponer para hacer frente a una catástrofe originada por una inundación, un terremoto o un volcán?”. Contestar esta pregunta es muy complejo y está sujeto a innumerables fuentes de error, incertidumbres e inexactitudes de toda clase. Aproximarse a dar una cifra es un reto científico y técnico que roza la osadía, debiendo definir y acotar previamente muchos aspectos. En este sentido y teniendo en cuenta los objetivos de la Directiva SOLVENCIA II (Directiva 2009/138/CE, que regula la actividad de seguro y de reaseguro y su ejercicio, y que reglamenta entre otras cosas la gestión del riesgo), así como buscando establecer una metodología que pueda servir para aplicarse a otras regiones del territorio, se adoptaron algunas consideraciones preliminares que permitieron definir mejor los objetivos. En primer lugar, la escala de trabajo debía ser pequeña o muy pequeña, es decir, que los resultados fueran válidos para la escala “de los códigos postales” o “de los términos municipales” (según los polígonos de *Cartociudad* y los derivados de la Base Cartográfica Nacional a escala 1/25.000, BCN25), lo que responde a la organización de los datos del Consorcio de Compensación de Seguros. En segundo lugar, debía ser una metodología homogénea para todo el archipiélago, con el menor grado de subjetividad posible y seleccionada de entre las metodologías disponibles y reconocidas como válidas de modo general. En tercer lugar se acordaron los límites relativos a cada uno de los peligros en los que el Consorcio de Compensación de Seguros tiene competencias e interés, así como el ámbito geográfico y los materiales y métodos mínimos a utilizar. En cada capítulo de este libro se detallan estas y otras cuestiones, pero a modo de resumen, los objetivos concretos del proyecto para poder abordar la cuestión planteada son los siguientes:

- Identificación de los peligros naturales por inundaciones en términos de extensión inundable para un evento extraordinario (de periodo de retorno de entre 200 y 500 años).
- Identificación de los peligros naturales por sismicidad natural extraordinaria.
- Identificación de los peligros naturales por coladas volcánicas.
- Búsqueda de una posible correlación entre la precipitación como desencadenante de las avenidas torrenciales y las pérdidas económicas registradas por el Consorcio de Compensación de Seguros.
- Identificación de los elementos expuestos.
- Valoración económica de los bienes expuestos.
- Cálculo del riesgo por inundaciones, volcanismo y sismicidad.

A su vez, para poder alcanzar los objetivos planteados, se ha organizado el proyecto por temáticas del siguiente modo:

- Estudio de avenidas torrenciales
- Estudio de la peligrosidad volcánica
- Estudio de la peligrosidad sísmica
- Estudio de los bienes expuestos y cálculo del riesgo

### **1.3. Materiales**

El planteamiento principal hace que resulte inviable por plazo y presupuesto, ejecutar un proyecto de esta naturaleza siguiendo métodos convencionales de modelación numérica o que implique trabajo de campo y calibraciones muy detalladas. Dado que para el caso de las inundaciones, no existen datos de zonas inundables fácilmente disponibles y con homogeneidad para todo el archipiélago (y todos los cauces), se hizo necesario elaborar un modelo de análisis preliminar que permitiera obtener esta información. Los datos obtenidos, ni pretenden ni pueden sustituir de ningún modo a los estudios que llevan a cabo las autoridades del agua (Consejos Insulares de Agua), ni tampoco sustituye a ningún otro estudio de inundabilidad que se pueda llevar a cabo.

Para el caso de la sismicidad se cuenta con la cartografía de peligrosidad de la Norma de Construcción Sismo-resistente Española, si bien se han utilizado otros avances científicos disponibles y se ha llevado a cabo una aproximación a la

microzonación sísmica. Para el caso del volcanismo se ha trabajado con los datos del proyecto Volcantén del IGME (Laín et al., 2007).

Para los tres tipos de peligros naturales abordados en el proyecto, y como cartografía básica, se comenzó a trabajar con la BCN25 y con Cartociudad. Como modelo digital de elevaciones fue necesario acudir a los modelos numéricos del terreno MDT05 (modelo digital de elevaciones obtenido para el PNOA del IGN con técnicas Lidar con paso de malla de 5m). Como bases de datos temáticas se ha trabajado con las BBDD geológicas del IGME (Geología Digital Continua, GEODE y otras fuentes de datos cartográficas); la cartografía del proyecto VOLCANTÉN del IGME, con el Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE, del IGN); las BBDD gráficas y alfanuméricas del Catastro; la cartografía de IDECAN geotécnica y su derivado al Código Técnico de Edificación; con información estadística del Instituto Nacional de Estadística (INE) y del Instituto de Estadística Canario (ISTAC). También se ha trabajado con las BBDD del Consorcio de Compensación de Seguros sobre Siniestralidad. En cuanto a datos pluviométricos se ha trabajado con el catálogo completo de la AEMET para las Islas Canarias y en cuanto a la sismicidad se ha trabajado con el catálogo sísmico del IGN.

## 1.4. Métodos

Existen tantas formas de aproximarse al conocimiento de las consecuencias de eventos peligrosos, como grupos de trabajo dedicados a ello. En el ámbito de los seguros existen distintas herramientas dedicadas *ex profeso* a este propósito, como HAZUS (un Sistema de Información Geográfico desarrollado por la FEMA), las herramientas de la plataforma CAPRA (CapraGIS, Crisis2007, y otros), o las plataformas de otras compañías como AIR Catastrophe Model; RMS, Risk Modeling Software; RQE, Risk Quantification and Engineering (Catastrophe Risk Modeling Software Platform, de EQECAT). Algunos de estos modelos son de tipo “caja negra”, es decir, herramientas (de código cerrado) con difícil acceso a la documentación técnica y a las ecuaciones constitutivas. Powers (2006) añade también que algunas herramientas de análisis de riesgo son poco claras en lo que se refiere a los aspectos de subjetividad de los complejos modelos empleados en pro del sistema propietario. Open-source risk software (OSR) representa una solución emergente en este sentido (OpenSHA, OpenSees), pero hay que añadir que a la variedad de modelos le acompaña la variedad de formatos, y la diversidad en cuanto a disponibilidad de datos. Murnane (2007) sintetizó a

cuatro los elementos principales de los que carecen los modelos propietarios de análisis de catástrofes o de riesgos, que son:

- 1) La estandarización de los datos (resultando muy difícil incorporar nuevas fuentes de información o actualizar las capas que sirven de base para un análisis).
- 2) La flexibilidad (resultando difícil incorporar nuevos algoritmos de peligro o de daño).
- 3) La transparencia (limitando el entendimiento y los usos del modelo).
- 4) La verificación o veracidad de los mismos (por ausencia de una discusión pública de las capacidades del modelo).

Todo ello sin olvidar que los modelos tienden a estar validados contra escenarios muy específicos que no son necesariamente extrapolables a las características de cada sitio, lo que puede conducir a errores importantes en la modelización.

En términos generales, los modelos persiguen mostrar resultados de tipo probabilístico (en forma de curvas de probabilidad-daño); de tipo máxima pérdida probable (PML, *probable maximum losses*); de tipo promedio de pérdidas anuales (*average annual losses*), o de tipo determinístico (para anticipar pérdidas esperables de un evento determinado o para simular un escenario concreto). En todos los modelos hay un marco de fondo de tipo Sistema de Información Geográfica, bien de forma muy explícita (como CapraGIS o Hazus) hasta bastante opacos en los términos cartográficos.

Para este estudio, se ha optado por implementar soluciones mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica como herramientas de propósito general en el más amplio de los sentidos, desde aplicación de métodos de análisis multivariable, hasta modelación integrada en SIG de distintos procesos e integrando resultados de análisis procedentes de diferentes plataformas y formatos. Se ha seleccionado como plataforma principal de trabajo el SIG corporativo del IGME (ArcGIS en su versión 9.3.1 licencia ArcINFO) y otras herramientas de apoyo para la obtención de distintos tipos de datos.

El esquema metodológico general que se ha empleado en este estudio representa un esfuerzo capital en la aplicación de la ecuación general de riesgo contemplada en la Directiva INSPIRE sobre zonas de riesgos naturales, tomada a su vez de [UNISDIR \(2009\)](#):

$$R = P \cdot E \cdot V$$

Donde  $R$  es el Riesgo expresado en las unidades de  $P$  y  $E$ ;  $P$  es la peligrosidad (expresada como una probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de unas características determinadas, o de alguna o varias de sus variables, simples o combinadas);  $E$  es la exposición (en términos de valor económico) y  $V$  es la vulnerabilidad (en porcentaje como función de  $P$  sobre la tipología de  $E$ , es decir, un mismo objeto se verá dañado en mayor o menor medida dependiendo del grado de impacto que reciba).

La obtención de las variables que comprenden esta formulación no es ni mucho menos evidente. En este proyecto, al haberse formulado la cuestión como “el valor para una determinada eventualidad”,  $P$  configura el marco de la exposición (en un concepto geoespacial de extensión o alcance), y la vulnerabilidad se integra como un factor ponderador, que si bien en volcanismo se considera igual a uno (daño total al bien), para inundaciones y sismicidad se ha implementado como una función correlacionando la tipología del bien respecto al posible impacto en grado de  $P$ .

Como se puede observar, la peligrosidad es el factor fundamental en los tres aspectos considerados en este trabajo, para cuya obtención se han seguido tres esquemas en apariencia diferentes pero que responden a un único y general esquema conceptual (Figura 1 a Figura 4). Una vez obtenida la información cartográfica de peligrosidad, ésta se emplea para la determinación de la exposición, y en el caso de la sismicidad y la inundación, también para la determinación de la vulnerabilidad. La exposición se obtiene a partir del cruce de las BBDD de peligrosidad con las BBDD del Catastro. En inundaciones y volcanismo, sólo se considera a un bien como expuesto si cae dentro de la representación cartográfica del flujo, mientras que para sismicidad, todo el territorio está sujeto a algún grado de  $P$ . Las BBDD del Catastro han sido procesadas para contener el número mínimo de atributos necesarios para determinar el valor catastral de los bienes inmuebles de cada parcela y el valor real y asegurado (por combinación con distintas fuentes de información), obteniendo así el valor aproximado del capital en riesgo.

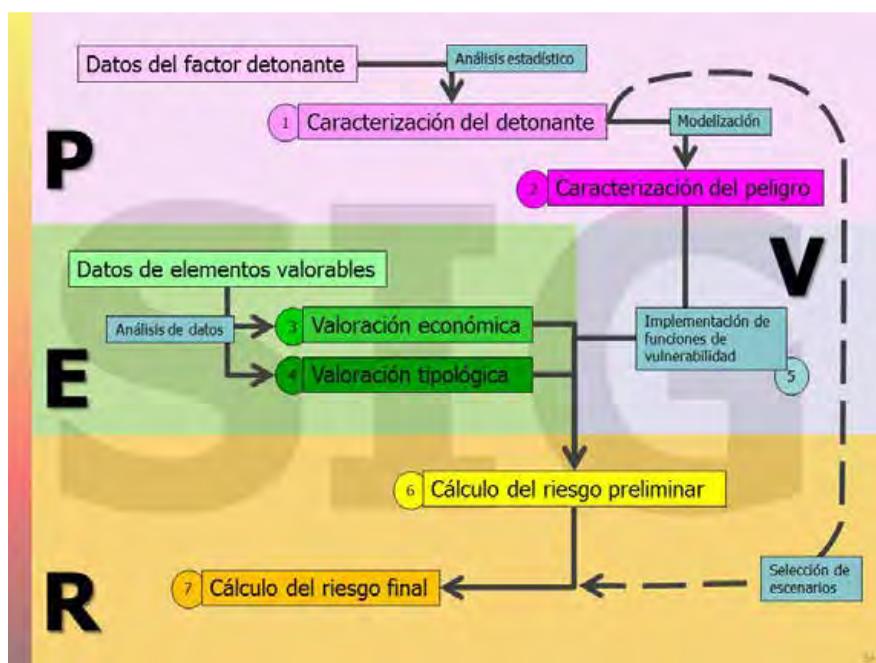


Figura 1. Esquema metodológico general para la obtención del riesgo.

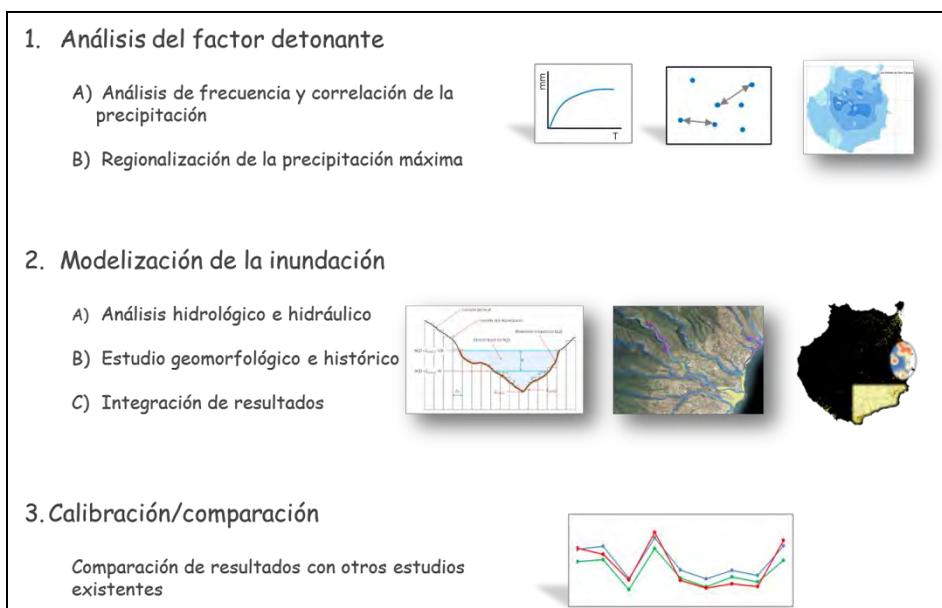


Figura 2. Esquema metodológico para la obtención de la peligrosidad por inundaciones.

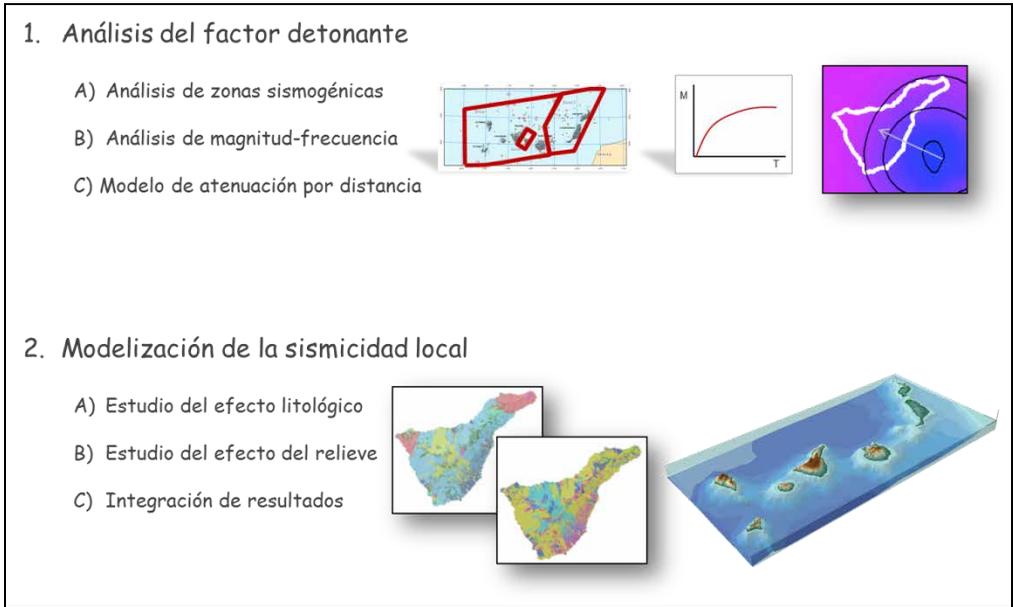


Figura 3. Esquema metodológico para la obtención de la peligrosidad sísmica.

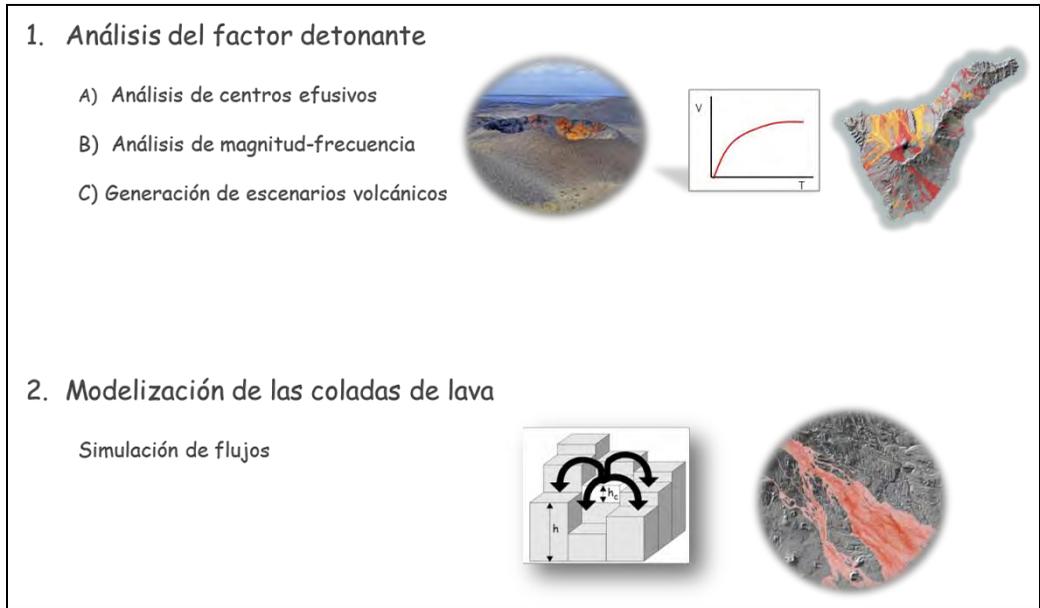
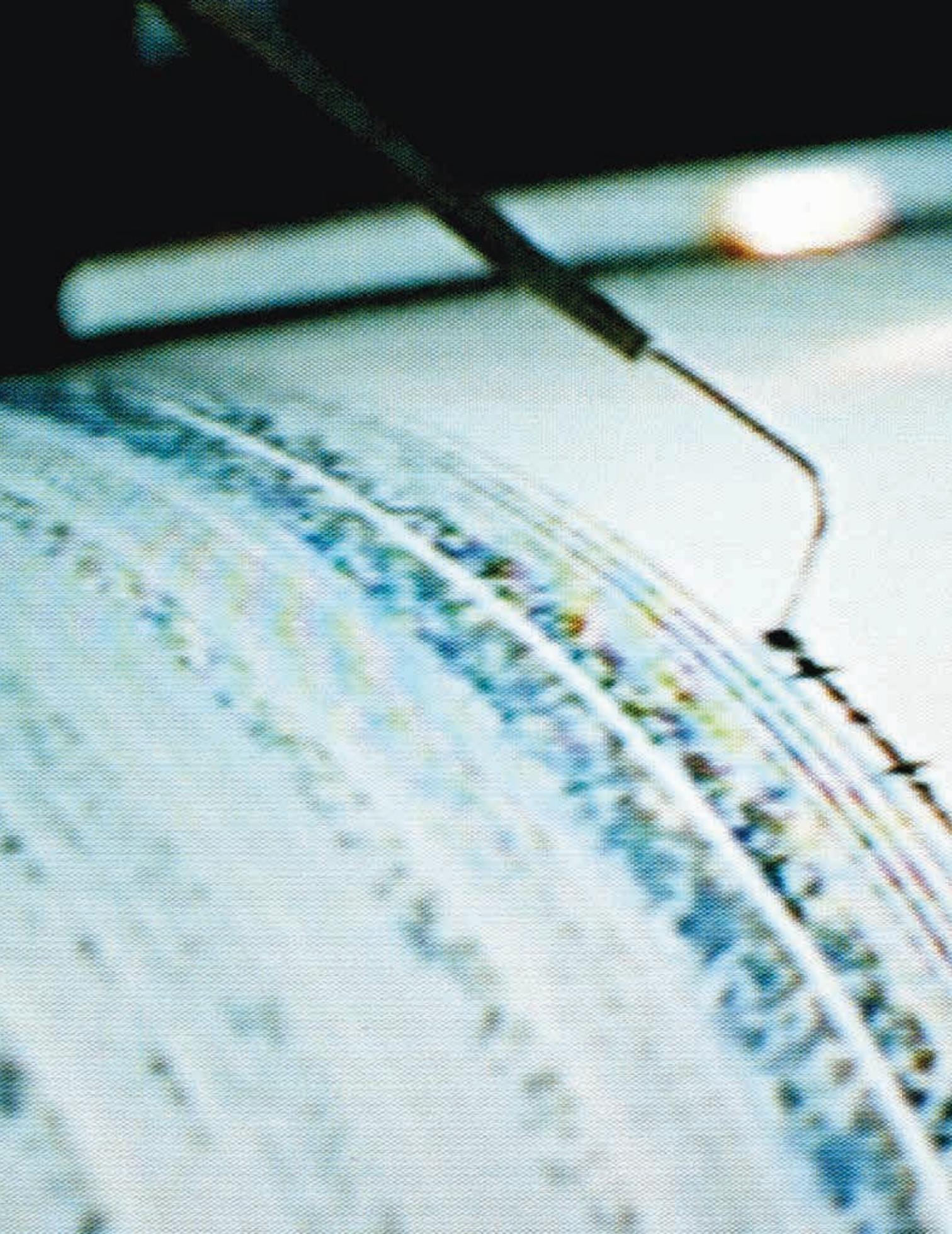


Figura 4. Esquema metodológico general para la obtención de la peligrosidad volcánica.



## 2. Marco conceptual y definiciones

Los riesgos naturales siempre han despertado interés, algo que con la aparición de las tecnologías de comunicación en masa no ha hecho más que crecer y convertirse en una cuestión relativamente cotidiana y popular. [Ayala \(2002\)](#) hizo un repaso por el impacto de las catástrofes naturales en las sociedades antiguas, poniendo de manifiesto hasta qué punto la percepción de los fenómenos naturales adversos han influido en la configuración de religiones y mitos durante milenios. Si bien en la actualidad el número de eventos informados parece verse alterado por circunstancias globales de gran calado, no parece que la cantidad de procesos potencialmente peligrosos hayan aumentado significativamente ([Llorente, 2007](#); Figura 5). No obstante, aún se está lejos de haber configurado una disciplina en sí misma de los Riesgos Naturales, como da a entender la inexistencia de un sistema de clasificación de Riesgos Naturales que esté ampliamente aceptado y las incontables discrepancias terminológicas incluso en los conceptos más elementales.

Sí existe en la comunidad científica dedicada al estudio de estos fenómenos, un claro consenso en distinguir algunos de los elementos esenciales que entran en juego. Los dos elementos fundamentales que intervienen son: lo antrópico y lo no-antrópico, normalmente referidos como lo humano y lo natural (o tecnológico cuando es no-natural); y la interrelación que se establece entre ellos es que lo no-antrópico afecta en lo antrópico de algún modo. La manera de afectar o influir puede ser positiva o negativa, pero la afección de interés en este caso es la negativa.

La segunda distinción ampliamente aceptada es de carácter temporal separando lo futurible o potencial, de lo pasado o real (Figura 6). Desde aquí en adelante, la confusión terminológica se dispara. Algunos de los términos empleados son: riesgo, peligro, desastre, catástrofe, evento, amenaza, vulnerabilidad, exposición, daño, impacto, pérdidas. [Aven y Renn \(2010\)](#) hacen una recopilación que sirve de ejemplo sobre las acepciones que puede adquirir el término “riesgo”, identificando diez interpretaciones diferentes. Navegando por la literatura científica se pueden llegar a hacer sinónimos prácticamente cualquiera de los términos entre sí sin siquiera entrar a discutir la terminología precisa de los fenómenos que intervienen.

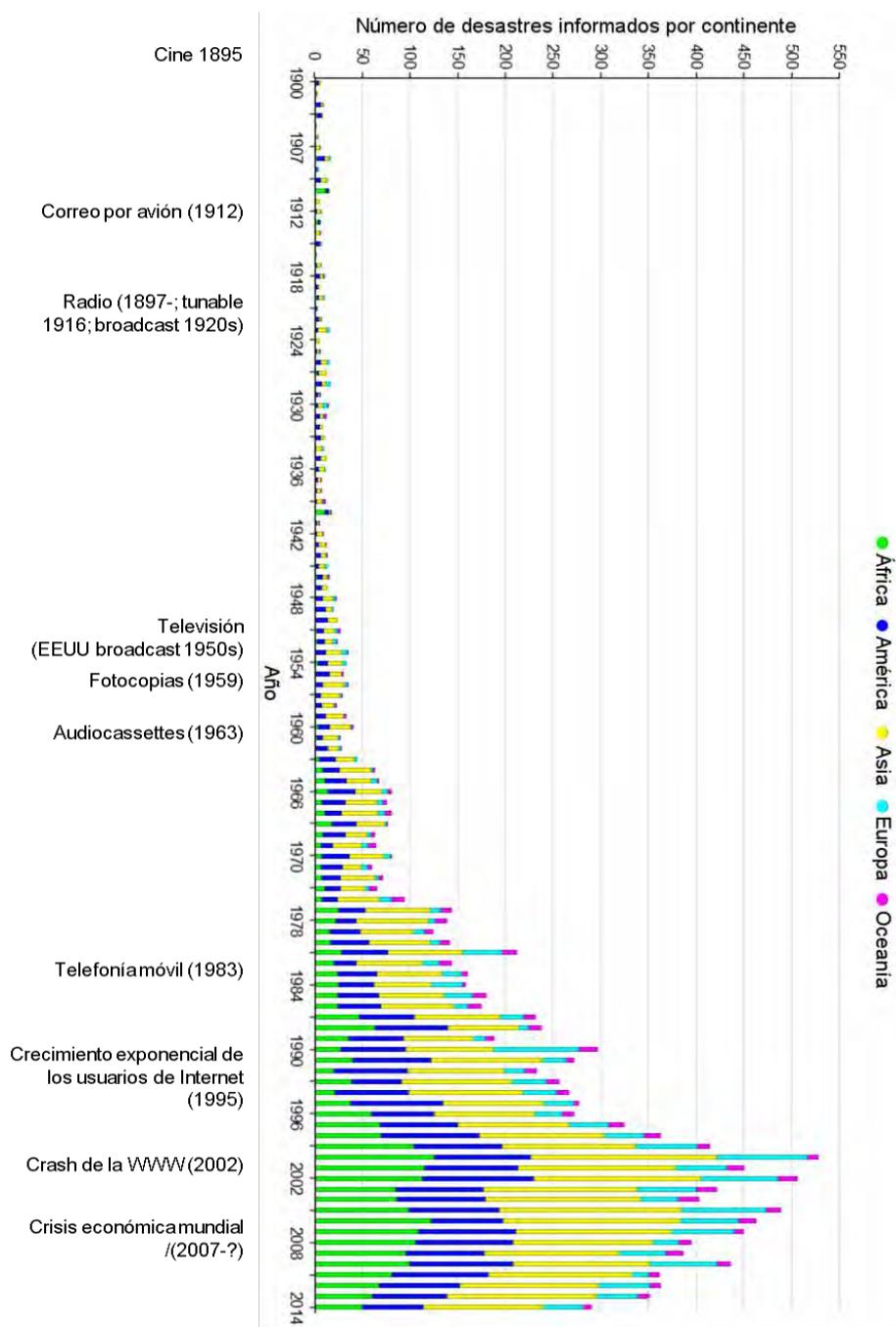


Figura 5. Número de desastres notificados en el periodo de 1900 a 2011 según la EMDAT, 2014 y principales acontecimientos de comunicación en masa (modificado de Llorente et al., 2007).

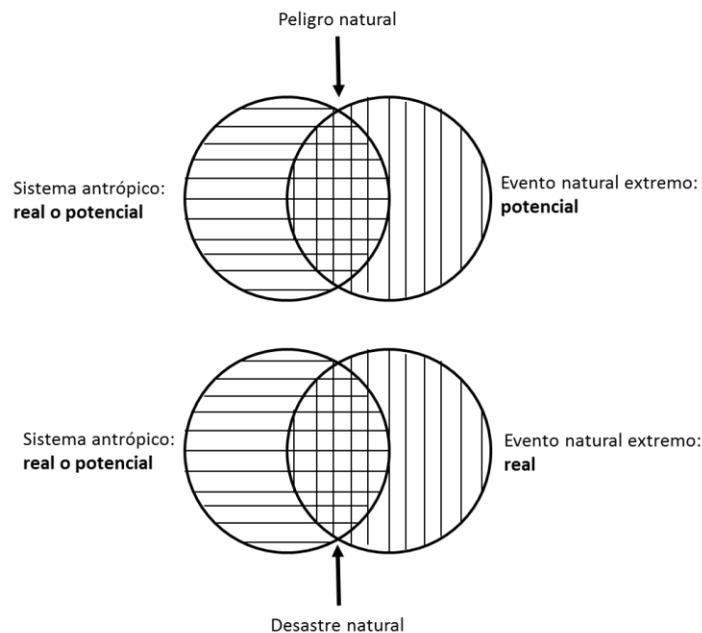


Figura 6. Principales elementos que intervienen en la disciplina de los Riesgos Naturales según Tobin y Montz (1997).

La enorme confusión terminológica se debe a que cualquier elemento o aspecto antrópico está sujeto a sufrir una alteración por casi cualquier motivo imaginable cuyos efectos podrían no ser los deseados por la persona o personas afectas, y por tanto, cualquier ámbito de la ciencia o de la técnica estará, tarde o temprano, evaluando esos efectos desde su propia perspectiva y haciendo uso de toda la flexibilidad que permite el lenguaje. Podría parecer que esto entra en contradicción con la categórica afirmación del sociólogo [Blumer \(1931\)](#) de que *no se puede desarrollar teoría alguna o investigación científica sin una clasificación*, sin embargo, el mero planteamiento de un escenario o sistema de análisis es en cierta medida una forma de clasificar: lo que es de interés y lo que no lo es en un contexto determinado, o lo que viene siendo el apartado de objetivos y alcance de muchos estudios de riesgos naturales. Una situación intermedia entre el planteamiento de un problema (o sistema) y el establecimiento de una clasificación es, para el caso que nos ocupa, lo que acaban siendo los relativamente escasos intentos por clasificar los riesgos naturales. En las

clasificaciones y en la definición misma del concepto de riesgo se asume que existe una relación causal entre acciones o eventos y sus efectos; y además se asume que los efectos indeseables pueden evitarse o mitigarse modificando los eventos o acciones causales (Renn, 1992) o cualquier otro término que intervenga en la concepción del riesgo. Las distintas aproximaciones a esta relación causa-efecto se pueden ver en la Figura 7.

En esta relación causa-efecto interviene otro factor esencial si se asume en la definición de riesgo la condición de futurible, que es la incertidumbre. La incertidumbre en los estudios de riesgos naturales tiene a su vez dos componentes, la probabilidad de que ocurra un evento o acción causal y los errores asociados al proceso de comprender el funcionamiento del sistema analizado. Típicamente la relación causa-efecto es de tipo positiva creciente con la incertidumbre en probabilidad de ocurrencia en una relación claramente no lineal, acotada superior e inferiormente. Es decir, que a menor probabilidad, que representa mayor incertidumbre, mayores efectos se espera que tal ocurrencia pudiera ocasionar, y los límites inferior y superior de los efectos pueden ir desde el 0% (ningún efecto no deseado) al 100% (destrucción total o ningún efecto deseado). El objetivo último de todo estudio de riesgos naturales es eliminar o minimizar esos efectos considerados adversos, para lo cual es necesaria una inversión. La inversión a realizar normalmente está relacionada positivamente con la incertidumbre. La pregunta de hasta dónde hay que invertir para prevenir un efecto dado cae directamente en el ámbito de la subjetividad de lo que se pueda considerar en cada instante como asumible o no asumible, lo que a su vez depende de la percepción social, política y económica de los riesgos naturales.

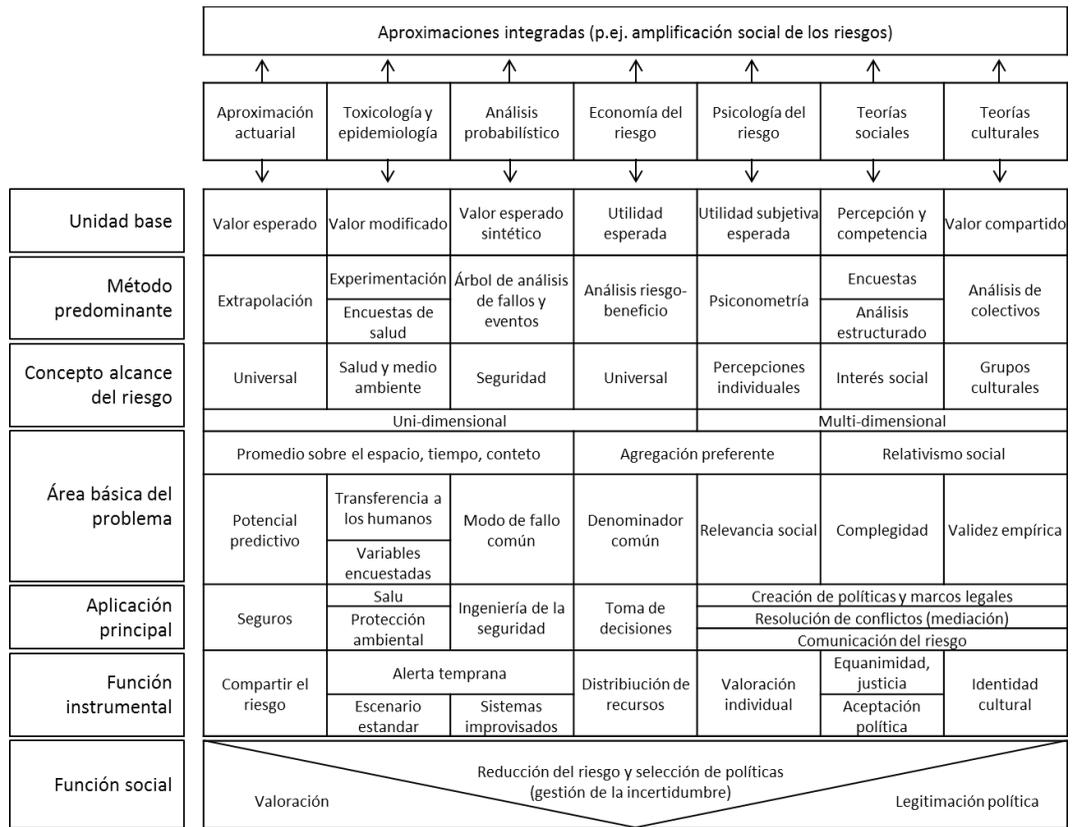


Figura 7. Clasificación sistemática de las perspectivas desde las que se abordan los riesgos (modificado de Renn, 1992).

De forma independiente de cuál sea el enfoque, es utópico intentar predecir siquiera los efectos más significativos que se puedan derivar directamente de la ocurrencia de un evento, aun cuando se pueda establecer una relación causa-efecto más o menos clara. Esto se pone de relieve de forma magnánima en las bases de datos de desastres y en los informes técnicos y noticias sobre desastres, donde es más que frecuente encontrar reacciones desencadenadas con mayores consecuencias que las causadas por el evento en sí mismo o por la ocurrencia de fenómenos asociados o acoplados, fenómenos inducidos o fenómenos consecutivos. Tal es el caso de los deslizamientos de China de 1920, los incendios Japón de 1923, o los tsunamis de Sumatra de 2004 o de Japón de 2011, todos ellos grandes desastres desencadenados por terremotos (EM-DAT, 2012). Es precisamente esta situación de reacción en cadena y acoplada la que da lugar a clasificaciones y a conjuntos de datos difíciles de explotar porque resulta muy

complejo aislar un sistema puro de tipo causal. También por este motivo existen iniciativas para el análisis llamado multi-riesgo (o análisis de riesgo basado en multi-peligro o multi-causa) cuando ni siquiera hay consenso respecto a qué conforma una unidad de análisis o relación única de causa-efecto (Marzocchi et al., 2009). Por si fuera poco, es conocido desde hace tiempo que el propio objetivo de reducción de un determinado conjunto de efectos adversos puede dar lugar a otros efectos que pueden ser incluso más perjudiciales que los efectos mitigados debido a las complejas interacciones entre los procesos que intervienen (Finlay y Fell, 1997) o debido a un conocimiento limitado (o baja interdisciplinariedad en los estudios) de las consecuencias de una determinada actuación sobre el territorio. Un ejemplo de esto último lo conforman los proyectos llamados de “restauración fluvial”, donde una actuación como la construcción de diques y rectificación de cursos fluviales (con el objetivo de reducir efectos adversos del desbordamiento de cauces) ha influido muy negativamente en ecosistemas o incluso incrementando los problemas aguas abajo de la actuación (por estrechamiento del hidrograma e incrementando los caudales punta en relación a la situación previa sin la medida protectora). No obstante, este último ejemplo es, en algunos casos, fruto de un cambio en la aceptabilidad de los efectos de un determinado proceso, pasando a ser inaceptables las consecuencias adversas ya no sobre las personas sino también algunos de los efectos sobre el entorno, lo que no por ello aleja el concepto subyacente de una aproximación estrictamente antropocéntrica.

Analizando la Base de Datos del Consorcio de Compensación de Seguros de indemnizaciones por inundaciones en el archipiélago canario, se puede observar un comportamiento de las indemnizaciones errático, es decir, para un incremento en el agente desencadenante del evento no sólo no se produce un incremento en las indemnizaciones pagadas, sino que en algunos casos se produce un decremento. Se plantean las siguientes hipótesis para explicar el comportamiento del daño decreciente en comparación con el agente causante creciente:

- Cambios en la cuenca vertiente (incendios, reforestación), que hacen que el factor desencadenante se transforme en un proceso de una u otra magnitud (es decir, que el detonante, la precipitación, no es representativo ni característico del causante).
- De un evento a otro se produce un incremento de protección reduciendo por tanto la cantidad de elementos sujetos a un impacto directo.

- De un evento a otro se produce una disminución del valor económico en la zona afectada, bien por un menor número de bienes, por la depreciación de los bienes o por la no reposición de los bienes dañados en eventos anteriores (o al menos la no reposición en el mismo lugar).
- Disminución de bienes asegurados.
- Aleatoriedad intrínseca al proceso por concurrencia de fecha/hora singular (día festivo/día laborable; noche/día).
- Cambios en los criterios de cobertura.
- Sucesos mixtos o complejos (inundaciones, fuertes vientos y deslizamientos).
- Escasez de datos (dudosa representatividad muestral).

En los casos en los que el daño es creciente con un causante creciente, las hipótesis que se plantean son:

- Sin cambios significativos en la cuenca vertiente, que hacen que el factor desencadenante sea representativo o característico del causante.
- El número de bienes expuesto es igual o superior en eventos sucesivos
- Reposición de bienes dañados en eventos anteriores en el mismo lugar.
- Incremento de bienes asegurados.
- Debilidad estructural por daño anterior.
- Mayor número de reclamaciones.
- Variaciones en el criterio de cobertura.

En todo caso, la práctica demuestra que las curvas teóricas de daños potenciales pueden estar muy lejos de las curvas reales de daños.

Esta discusión abstracta no impide en absoluto que se sigan buscando soluciones a una pregunta formulada de manera incompleta (y basada en el preconcepto de causalidad) y que constituye la esencia del análisis de riesgos: ¿qué consecuencias se pueden esperar en el futuro de un determinado proceso y, si resultaran inaceptables, cómo evitarlas?

En todo estudio de riesgos se asumen por tanto algunos o todos de los siguientes elementos:

1. Existe una relación causa-efecto entre los procesos naturales y la actividad cotidiana de las personas o del entorno (más o menos próximo) en que éstas viven.

2. Los procesos pueden tener lugar en un futuro más o menos próximo con una incertidumbre más o menos determinada.
3. Entre los posibles efectos, existen algunos que no serían aceptables; dichos posibles efectos son objeto de interés para evitarlos o minimizarlos, y entre ellos los hay de dos tipos:
  - a. Efectos directos, es decir, la relación causa-efecto resulta obvia e inmediata para el analista porque es coetánea con el proceso o cuasi-coetánea; p.ej., el desprendimiento de una roca podría impactar sobre un edificio, cuya reparación tiene un coste; o la anegación de un campo que ahoga una cosecha cuyo valor de mercado se puede estimar.
  - b. Efectos indirectos, es decir, la relación causa-efecto o bien no es inmediata o bien es el resultado de un conjunto de desencadenantes en efecto cadena; p.ej., una carretera cortada impide el tránsito de vehículos, entre los cuales hay un servicio de transporte que al no poder consumarse produce unas pérdidas; o la caída del precio de las acciones en la bolsa de valores; la pérdida de competitividad de una comunidad, el incremento de la criminalidad tras una evacuación, etc.

Suponiendo válidos estos preceptos, una aproximación clásica en el ámbito de las Ciencias de la Tierra es abordar los riesgos desde la perspectiva del análisis del causante.

El causante no es fácil de definir aun aceptada la relación causa-efecto. El objetivo teórico reside en la identificación del proceso inmediatamente anterior responsable de un efecto dado. Por ejemplo, en el caso del terremoto de Japón de 1923, el terremoto es al mismo tiempo un factor desencadenante de los incendios (si no hubiera habido terremoto, esos incendios tal vez no habrían tenido lugar), un factor en sí mismo (causando daños a estructuras por la propagación de ondas de superficie) y un agravante de la situación de desastre (incendios en estructuras dañadas, dificultades de acceso a los equipos de extinción de incendio y rescate).

En la era de Internet, donde la demanda de información crece al mismo ritmo que el potencial de comunicación, han surgido muchos retos, entre ellos, el reto de la comunicación de aspectos relacionados con la cartografía de riesgos. Por este motivo y por todo lo anteriormente mencionado, surgió en 2009 y en el

marco de la iniciativa INSPIRE (Directiva Europea 2007/2/EC) un grupo de trabajo específico para los Riesgos Naturales, el Thematic Working Group on Natural Risk Zones (TWG-NZ). El objetivo último del grupo (constituido en 2010) residió en crear una infraestructura de datos (cartográficos) capaz de asimilar prácticamente cualquier enfoque o aproximación al estudio de riesgos naturales, buscando al mismo tiempo, aportar una cierta homogeneidad terminológica y conceptual, lo que en definitiva es la creación de una disciplina. Tal vez se pueda conducir un estudio sin una clasificación científica detallada más allá de lo que resulta o no de interés para un caso particular, pero crear una infraestructura de datos en la que el dato y el conocimiento sobre éste están tan dispersos, es (cuando menos) una tarea titánica. No obstante, se consiguió alcanzar una estructura de datos con la aceptación de un grupo de expertos europeos (Thomas et al. 2014), no sin centenares de observaciones de la comunidad a la que se abrió el turno de palabra en distintas ocasiones.

## 2.1. Clasificaciones de los riesgos naturales

En la primera reunión del TWG-NZ en 2010 en Ispra, se plantearon dos cuestiones como inmediatas y fundamentales a resolver: la definición de riesgo y la clasificación de riesgos naturales. La relación causal del riesgo se planteó como debate secundario para aclarar el ámbito del grupo de trabajo, quedando rápidamente limitado a efectos directos, zanjando así toda duda sobre la relación causal pese a todo lo anteriormente mencionado y con el objetivo de acotar el sistema. Para la definición de riesgo se dio por válida la definición de UNISDR (2009) por ser la más ampliamente aceptada:

*Riesgo = la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas.*

Se asumió que existe una flexibilidad lingüística en el público en general, de tal modo que el concepto “riesgo” se puede emplear indistintamente para la probabilidad de que ocurra un evento (p.ej. riesgo de incendio), las consecuencias del evento (riesgo de muerte), la combinación de ambos (riesgo de muerte por incendio), la exposición (estar en riesgo), etc. Pero a efectos de infraestructura, se recomienda la adaptación terminológica a la terminología y esquema UML desarrollado para INSPIRE.

La expresión abstracta de esta sentencia no es ni mucho menos evidente y estuvo sujeta a interminables horas de debate, sobre todo porque la ecuación no quedaba balanceada en términos de unidades, tanto porque existen muchos enfoques y muy distintos sobre el mismo concepto, como porque la aproximación al riesgo puede ser cuantitativa, cualitativa o subjetiva, no siendo menos válidas o relevantes unas u otras aproximaciones según cada caso (disponibilidad de datos, presupuesto, objetivos, métodos). La aproximación clásica recogida en UNISDR (2009) y referida en esos términos incontables veces en la literatura científica y técnica, sigue estando sujeta a interpretaciones totalmente dispares e incoherentes en términos de unidades, y los conceptos subyacentes no dejan de encontrar nuevas acepciones, como bien recoge el informe del IPCC (2012). En dicho informe, se hace un pequeño, pero clarificador repaso por distintos trabajos poniendo de manifiesto cómo los componentes del riesgo han ido ganando acepciones con el paso del tiempo, dificultando aún más la abstracción de la ecuación del riesgo. Asumiendo un importante grado de flexibilidad, parece que existe una tendencia a aceptar como ecuación válida para la definición de Riesgo a la siguiente formulación:

$$R = P \cdot E \cdot V$$

Donde  $R$  es riesgo,  $P$  es peligrosidad,  $E$  es exposición y  $V$  es vulnerabilidad.

La lógica subyacente a esta ecuación establece que para que haya un daño esperable debe haber una causa del daño ( $P$ ), un objeto de valor con un valor determinado ( $E$ ) que sea alcanzado por  $P$  y una cantidad de daño esperable contra ese objeto ( $V$ ) como consecuencia del impacto del agente causante,  $P$ .

Por tanto,  $P$  debería integrar los aspectos relacionados con el factor causal, que son, la incertidumbre asociada a su ocurrencia futura y uno o varios de los aspectos que definen su naturaleza, es decir, una magnitud, una intensidad o una relación compleja (o subjetiva) de magnitudes e intensidades.  $E$  y  $V$  deberían representar lo que falta en la ecuación para que ésta esté balanceada y  $R$  realmente represente los posibles efectos futuros. Así,  $E$  debería asimilar el valor de los elementos en los términos en que éstos sean valorados (personas, valor monetario, singularidad, servicio, etc.) y  $V$  conforma el nexo entre  $P$  y  $E$  para dar lugar a  $R$ , sentando la relación porcentual de  $E$  que estando afectada por  $P$  pasa a ser  $R$ . Si  $P$  se considera una función de probabilidad versus una o varias magnitudes o intensidades,  $E$  y  $V$  son a su vez función de dicha función de  $P$ .

Esta aproximación conduce a dos conclusiones sin las cuales se incumple la definición de UNISDR (2009):

1.  $R$  tiene unidades de probabilidad, de magnitud o intensidad del agente causante, y de valor (económico o de otro tipo).
2. El elemento fundamental en la determinación de  $R$  es  $P$ , porque  $P$  a su vez determina  $E$  (en modo binario de lo que está y no está afectado por  $P$ ) y  $V$  (en tanto que  $P$  define el tipo de impacto que recibe  $E$ , al variar en el espacio la magnitud o intensidad de un proceso de determinada probabilidad; o al contrario, al variar la probabilidad en el espacio de un determinado proceso).

De este modo, la ecuación quedaría mejor expresada de la siguiente forma:

$$R = R(P, E(P), V(E, P))$$

Las discusiones sobre la definición de  $E$  son subjetivas, como ya se ha mencionado, por su asociación a lo que en cada momento se valore y cómo se valore cada elemento o cada conjunto, sistema o subsistema.  $V$ , dado que es un impacto directo, depende tan sólo de las propiedades de  $E$  y de las características que definen  $P$ . Sin embargo, siempre se puede considerar una definición más amplia y compleja (concepto de resiliencia, del marco de acción de Kobe-Hyogo para 2005-2015).

El alcance de esta aproximación se ha puesto de manifiesto en multitud de ocasiones como muy limitado, ya que los efectos indirectos pueden ser aún más graves que los efectos directos, lo que en parte motivó otros enfoques en el análisis de riesgo alejados de  $P$ , como el caso del marco de acción de Kobe-Hyogo para 2005-2015, identificando el incremento en la resiliencia como fundamental para la reducción de desastres. Este concepto de resiliencia se refiere a la capacidad de una comunidad para recuperarse frente a un impacto dado. Este enfoque podría llegar a desvincular el análisis de catástrofes del origen del desastre, ya que para una sociedad, la recuperación de sus actividades no necesariamente está ligada a una ubicación geográfica o a unos elementos productivos determinados. Un buen ejemplo de esto lo representa el Huracán Katrina, cuyo impacto en Nueva Orleans en 2005 marcó un record en daños económicos (NOAA, 2011), y sin embargo, la recuperación de la población o de la ciudad como sistema en términos de habitantes, servicios y actividades (no en términos geográficos) ha sido prácticamente total en menos de cinco años pese a

que los efectos sigan siendo visibles sobre el terreno. Si se incorporan las medidas de mitigación en la ecuación de riesgo y teniendo en cuenta que los efectos del huracán Katrina fueron mitigados de modo muy exitoso (aunque no por ello aceptables), cabe pensar que el riesgo era muy bajo, lo que no significa que el impacto en sí mismo pueda considerarse como no aceptable, bien porque las medidas de mitigación (principalmente la evacuación forzosa) tampoco lo fueran (quizá por el incremento tan significativo en los índices de criminalidad post-desastre) o bien por los fallos en las medidas protectoras, o bien por otras razones, como la inaceptación a que un evento natural altere un quehacer cotidiano.

Por otra parte la determinación de probabilidades de ocurrencia es factible en procesos con un cierto grado de ciclicidad (a escala antrópica), como la precipitación (ciclo hidrológico), pero resulta mucho más complejo en casos donde la ciclicidad no está en absoluto presente, como es el caso de los sólidos transportados por una corriente, los desprendimientos de rocas, o los procesos volcánicos.

Con todo ello, la clasificación de los tipos de riesgo es abordable como clasificaciones de los componentes, es decir, como clasificaciones del proceso peligroso, o de los elementos expuestos, y secundariamente en términos de su probabilidad.

La clasificación de los elementos expuestos forma parte principalmente de las ciencias sociales y económicas (en el sentido más amplio) y la evaluación de la vulnerabilidad es ámbito tanto de éstas (capacidad de las sociedades para recuperarse) como de las ciencias relacionadas con la resistencia de materiales y estructuras.

La clasificación de los agentes causales, es decir, de los procesos, forma parte del ámbito de las Ciencias de la Tierra (también en el sentido más amplio posible). [Olcina y Ayala \(2002\)](#) propusieron clasificar los peligros en función de los siguientes aspectos:

- Génesis y tipología
- Ambiente de localización
- Previsibilidad
- Nivel de actividad
- Duración

- Radio de acción
- Vector de daño

La perspectiva genetista es, con diferencia, la más extendida. No obstante, las clasificaciones que más se utilizan son las que se han confeccionado con algún propósito más allá de organizar el conocimiento científico de los procesos, como son las clasificaciones de desastres, erróneamente asimiladas al ámbito de los peligros y ocasionando grandes dificultades en la explotación de los datos. El ejemplo más claro lo constituye la clasificación de la Base de Datos de Emergencias (Emergency Database, EM-DAT, Tabla 1 y Tabla 2), desarrollada y mantenida por el Centro de Investigación sobre Epidemiología de Desastres (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*, CRED) con acuerdo común con la compañía reaseguradora Munich Re (Below et al., 2009). El motivo principal que lleva a la comunidad a utilizar esta clasificación de desastres en el ámbito de los riesgos y peligros es su facilidad de uso y disponibilidad y que la terminología resulta muy familiar en el primer vistazo, pese a que las definiciones son muy pobres, ambiguas o inexistentes. Peor aún, si cabe, existen redundancias, duplicidades de términos y subtipos vacíos. La base de datos cumple muy bien con los propósitos para los cuales se diseñó e incluso más allá, pero no es útil para establecer estructuras de datos o para el ámbito cartográfico fuera del marco de la recolección de eventos con orientación hacia el ámbito de los seguros.

Tabla 1. Clasificación de la EM-DAT ([www.emdat.be](http://www.emdat.be)), con errores de redundancia y subtipos vacíos.

Subgrupo de desastre	Tipo principal de desastre	Subtipo de desastre	Sub-subtipo de desastre
Geofísico	Terremoto	Movimiento del suelo	
		Tsunami	
	Volcán	Erupción volcánica	
		Caída de rocas	
	Movimientos en masa (secos)	Avalancha	Alud
			Avalancha de detritos
		Deslizamiento	Flujo de barro
			Lahar - flujo de detritos
		Subsidencia	Subsidencia súbita
			Subsidencia prolongada
Meteorológico	Tormenta	Tormenta tropical	
		Ciclón extra-tropical (tormenta de invierno)	
	Tormenta local / convectiva		Tormenta eléctrica, rayos
			Tormenta de nieve, tempestad
			Tormenta de arena, de polvo
			Tormenta severa (genérica)
			Tornado
			Tormenta orográfica (fuertes vientos)
Hidrológico	Inundación	Inundación fluvial general	
		Inundación relámpago	
		Rissaga, inundación costera	
	Movimientos en masa (húmedos)	Caída de rocas	
		Flujo de detritos	
		Avalancha de detritos	
	Deslizamientos	Flujo de detritos	
		Avalancha de detritos	
	Avalancha	Alud	
		Avalancha de detritos	
	Subsidencia	Subsidencia súbita	
		Subsidencia prolongada	
	Climatológico	Temperaturas extremas	Ola de calor
Ola de frío			Heladas
Condiciones invernales extremas			Presión de nieve
			Formación de hielo
		Lluvia helada	
Sequía		Sequía	
Incendio forestal		Incendio forestal	
	Incendio de tierras (pasto, matorral, arbusto, etc.)		
Biológico	Epidemia	Enfermedades infecciosas por virus	
		Enfermedades infecciosas por bacterias	
		Enfermedades infecciosas por parásitos	
		Enfermedades infecciosas por hongos	
		Enfermedades infecciosas por priones	
		Plaga de insectos	Saltamontes/langosta/gusanos
		Estampidas de animales	

Tabla 2. Definiciones de los subgrupos de la clasificación de la EM-DAT ([www.emdat.be](http://www.emdat.be)).

Geofísico	Eventos originados de tierra sólida
Meteorológico	Eventos ocasionados por procesos atmosféricos desde pequeños o de poca duración a meso-escala (en el rango de minutos a días)
Hidrológicos	Eventos causados por desviaciones en el ciclo ordinario del agua y/o desbordamiento de cuerpos de agua debido a condiciones de viento
Climatológicos	Eventos causados por procesos desde meso a macro escala de largo plazo (en el rango de variabilidad climática intra-estacional a multi-década)
Biológicos	Desastres causados por la exposición de organismos vivos a gérmenes y sustancias tóxicas

Otro de los problemas de clasificar los peligros naturales está en que las fronteras tipológicas no pueden establecerse de un modo claro, existiendo una gradación paulatina entre unos tipos de procesos y otros, como ocurre, por ejemplo, con la transición entre los procesos de fluencia de agua o escorrentía superficial con los deslizamientos de tierra (Figura 8).



Figura 8. Relación entre los procesos fluviales y los movimientos de ladera. El color de fondo indica la relación de predominio entre carga sólida y agua (Bodoque et al., 2006).

Además, resulta más fácil de lo que cabría esperar el terminar estableciendo clasificaciones con terminología de procesos que no necesariamente sean potencialmente peligrosos. Por ejemplo: “procesos kársticos”, donde la disolución de la roca es condición necesaria pero no suficiente para desencadenar un evento peligroso, lo cual aleja las clasificaciones de su principal propósito, como se ha puesto de manifiesto en los comentarios recibidos durante el proceso de discusión pública del trabajo del TWG-NZ y en las encuestas realizadas en entornos seleccionados de expertos en Riesgos Naturales. Durante el proceso de las encuestas se ha observado además, que existe una influencia muy

significativa en los expertos consultados, a clasificar los peligros naturales de modo que se resalte la competencia de unos u otros gremios, lo que no contribuye a obtener una clasificación imparcial. Esta observación corrobora la afirmación intuitiva de [Olcina y Ayala \(2002\)](#): “*las clasificaciones que buscan atribuir a una sola de las ciencias de la naturaleza una especie de monopolio explicativo, y en el fondo competencial, carecen de base*”. Una solución salomónica sería unir bajo un mismo tipo a aquellos tipos en los que la guerra competencial es más acentuada, un conflicto de intereses que también refleja la realidad de transición suavemente gradual entre unos procesos y otros, lo que contribuye a justificar la aproximación más diplomática y más ajustada a la realidad por multidisciplinar. Resulta más complicado encontrar soluciones similares cuando la clasificación del proceso atiende más bien al factor desencadenante, como es el caso de los huracanes, en los que muchos de los daños son realmente producto de las inundaciones de las lluvias que acompañan a los huracanes. Pero en realidad es más exacto decir que el término huracán (o volcán u otro cualquiera de los habitualmente utilizados en las clasificaciones) describe un complejo sistema en el que por mucho que prevalezca un fenómeno, el término está describiendo contextos o sistemas físico-químicos complejos, y no tanto peligros o riesgos. Una clasificación de factores desencadenantes conduciría inexorablemente a una redundancia de términos, por ejemplo, un tsunami puede ser originado por la explosión de un edificio volcánico, por la invasión de una masa de agua por un desprendimiento, por un terremoto bajo una masa de agua con un salto vertical notable en la superficie rocosa, etc. En este caso, el término describe un proceso en contextos muy diferentes.

Librarse del contexto con el objetivo de encontrar una clasificación lo más coherente posible no es inmediato, sobre todo porque procesos similares en su naturaleza reciben términos específicos en función del contexto. Por ejemplo, un flujo de lodo puede desencadenarse por distintos motivos, y si uno de ellos es la fusión de hielo por actividad volcánica, entonces recibe el nombre de *lahar*, que no es una cuestión meramente de término y contexto, pues precisamente por el contexto y la especificidad en el término se hace referencia también a la composición mineralógica o sedimentológica del flujo, a las rutas que seguirá el flujo (condicionadas por la morfología volcánica), etc. Un proceso similar serían los *huaycos*, término peruano para describir flujos de barro y detritos desencadenados por lluvias intensas en laderas con superficies inestables, detríticas o fácilmente erosionables. Otro ejemplo serían los tsunamis, que pueden ser originados por una variedad de procesos (terremotos, deslizamientos,

erupciones volcánicas, meteoritos, etc.; Bryant, 2008). En algunos procesos, el desencadenante puede ser antrópico, pero la propagación del fenómeno no depende del hombre, como es el caso de la mayoría de los incendios forestales, provocados por el hombre pero propagados en favor de una vegetación en condiciones (o por naturaleza, en el caso de las pirófitas) favorables a la propagación de un fuego. Más aún, comprender el contexto en el que se produce un evento resulta fundamental para su adecuada evaluación. En este sentido, se pueden emplear como macrocontextos de peligros a los siguientes cinco en función del ámbito de localización o contextual, y con ello se podría establecer el primer nivel de jerarquía para una clasificación:

- Geológico o hidrológico: procesos en el ámbito de la geosfera, la hidrosfera o en la interfase entre ambos.
- Meteorológico o climatológico: procesos en el ámbito de la atmósfera a corto o largo plazo o en el ámbito de variables ambientales.
- Biológico: procesos en el ámbito de la biosfera.
- Cósmico: procesos no originados en la Tierra o de ámbito planetario u supra-planetario.
- Antrópico: proceso en el ámbito de la antroposfera.

Habitualmente a todos los procesos fuera del ámbito antrópico se les denomina “peligros naturales”, sin embargo, es difícil encontrar procesos puramente antrópicos o puramente naturales. Esto se debe no sólo a que unos pueden desencadenar otros en ambos sentidos (un ejemplo clásico es el desastre de la presa de Vajont, en Italia; Semenza, 2010), sino que además, unos y otros pueden conducir a un agravamiento de las potenciales consecuencias (como las inundaciones de 2007 en Alcázar de San Juan, agravadas por un talud ferroviario; Figura 9).

Los contextos de segundo nivel más importantes identificados vía consultas a expertos (y modificado del trabajo desarrollado para la Directiva INSPIRE) y revisión en la literatura científica son los que se recogen en la Tabla 3.



Figura 9. Vista aérea de las vías del tren que redujeron la capacidad de desagüe del cauce.

Tabla 3. Clasificación de los principales contextos de los peligros naturales.

Macro-contexto	Sub-contextos básicos	Definición
<b>Geológico / hidrológico</b>	Volcánico	Apertura en la corteza terrestre que permite el ascenso de magma y otros subproductos.
	Sísmico	Propagación de ondas de cuerpo y de superficie por los materiales geológicos
	Movimiento de laderas	Movimiento de los materiales en laderas.
	Subsidencias y colapsos	Movimiento vertical del suelo
	Inundación	Anegamiento temporal por agua de regiones habitualmente emergidas.
	Materiales o sustancias tóxicos	Presencia de sustancias con propiedades nocivas
<b>Meteorológico / Climatológico</b>	Sequía	Ausencia de precipitación en un intervalo superior al habitual.
	Temperaturas extremas	Persistencia de temperaturas anómalamente altas o bajas.
	Fuertes vientos	Movimiento a alta velocidad de las capas bajas de la atmósfera.
	Rayos	Descarga de electricidad atmosférica.
<b>Biológico</b>	Infestaciones	Desarrollo anormalmente abundante de organismos vivos.
	Epidemia	Ocurrencia anómalamente abundante de enfermedades.
	Alérgenos	Presencia anormalmente abundante de alérgenos.
	Incendios	Propagación de fuego.
<b>Cósmico / planetario</b>	Impactos meteoríticos	Impacto en la Tierra de cuerpos sólidos del espacio exterior.
	Alteración de campos	Variaciones en los campos magnéticos o gravitatorios terrestres.
	Radiaciones	Radiación proveniente del espacio exterior.

Los sub-contextos identificados como principales en la Tabla 3 representan grandes áreas de conocimiento con interrelaciones muy estrechas y forzadas por aspectos de tradición y competencias. Encontrar un tercer nivel de jerarquía resulta ya más complicado porque es a partir de aquí cuando entran a describirse procesos con terminologías muy concretas y orígenes muy diversos que conducen inevitablemente a redundancias. Además, las clasificaciones de procesos tienden a ser extensas y complejas. Sirva como ejemplo la clasificación de inundaciones (Figura 10), la de movimientos del terreno (Figura 11) una pseudo-clasificación conjunta que establece la delgada frontera entre ambos

procesos y la clasificación de peligros en el contexto volcánico (Figura 12 y Figura 13) y cómo existen procesos comunes a los tres contextos.

En relación con los elementos expuestos, el principal objetivo es diferenciar los principales y más relevantes elementos que las personas valoran. Tan amplio y ambiguo es el concepto de valoración que cualquier cosa podría integrarse. Tanto así, que en muchas ocasiones se ha llamado “mapa de riesgo” a la mera representación del peligro sobre un mapa topográfico y planimétrico de base, dejando que el lector del mapa interprete libremente las consecuencias que para él personalmente podría tener la ocurrencia de un evento como el representado. Sin embargo, dado que la representación de un peligro (de un contexto peligroso) no es sencilla (se representan uno o varios parámetros o variables simples o combinadas de un complejo sistema), las consecuencias no pueden ser deducidas fácilmente. Los principales grupos de elementos potencialmente afectados se pueden agrupar en los siguientes cuatro tipos (Figura 14):

1. Económico: todo aquello que puede ser reducido a un denominador común en términos monetarios, de propiedad o infraestructura o de actividad económica.
2. Social: si los objetos afectados o los sujetos de análisis son personas, bien de manera individual o colectiva o como relaciones personales (servicios o política).
3. Patrimonial: todo objeto, estructura, o elemento antrópico o natural cuyo precio, aunque exista, no alcanza a expresar el valor que una sociedad le otorga por su especial significado o excepcionalidad (una obra de arte, un edificio histórico, un punto de interés geológico).
4. Ambiental: cuando los elementos afectados son ecosistemas protegidos, masas de agua o elementos antrópicos potencialmente contaminantes.

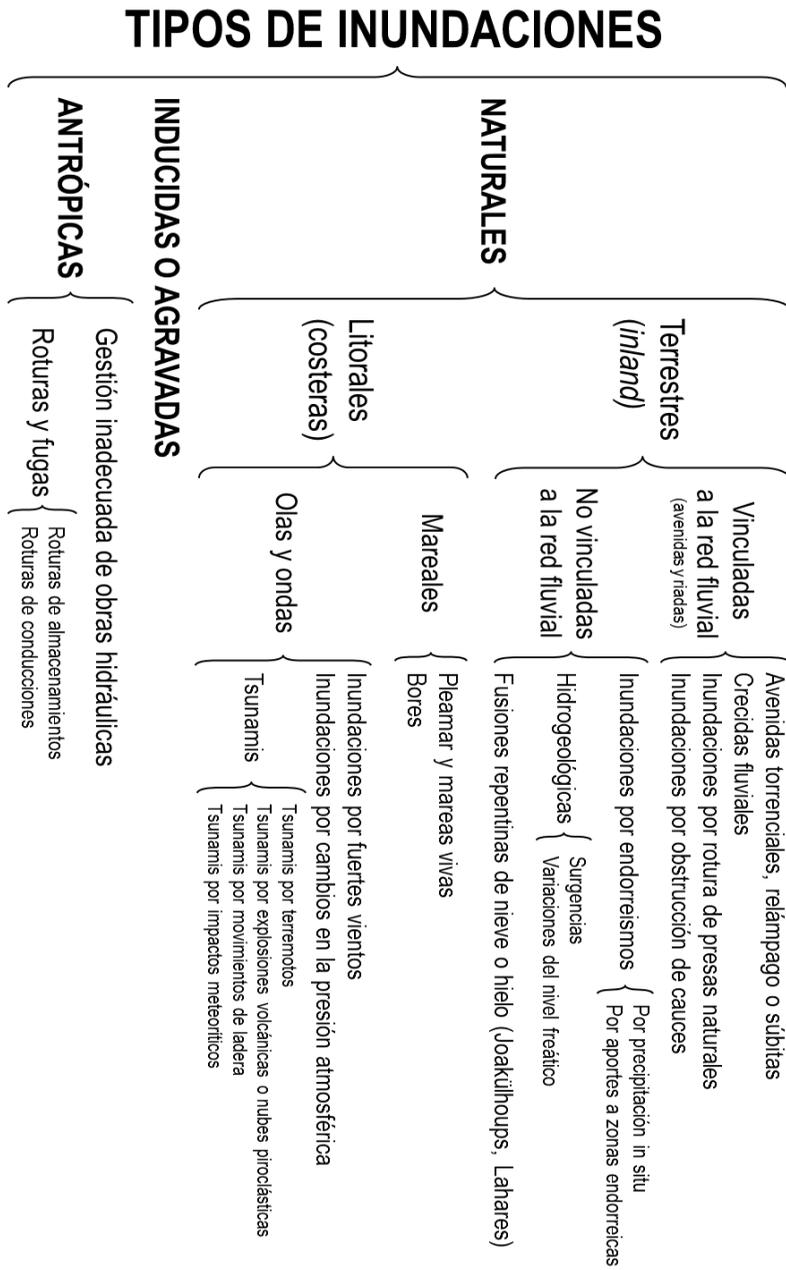


Figura 10. Clasificación de las inundaciones de acuerdo a su origen (modificado de Díez et al., 2008).

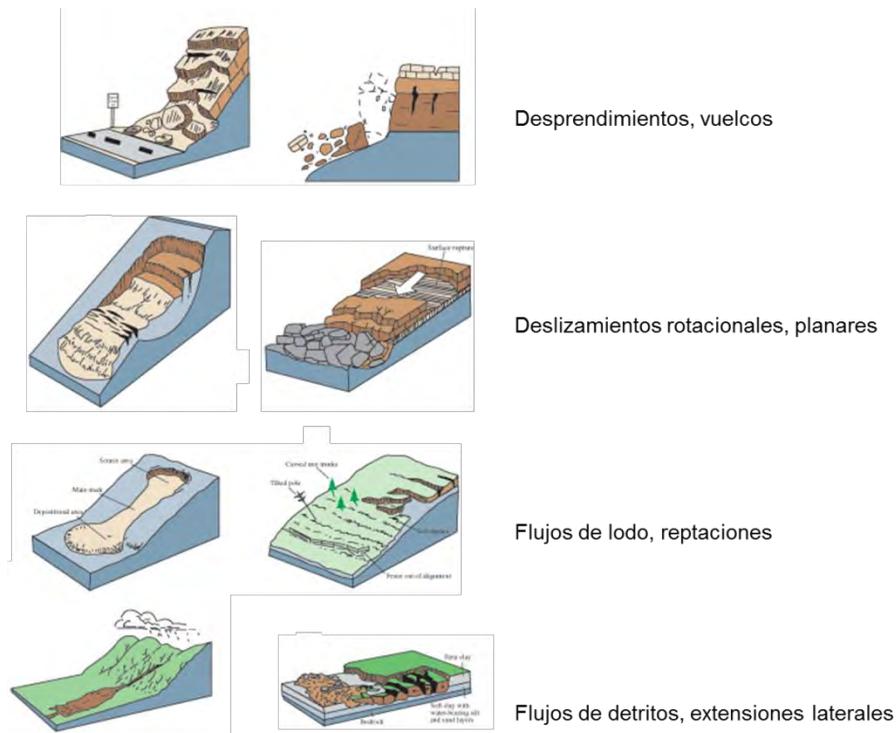


Figura 11. Clasificación modificada y simplificada de Varnes (1978) de movimientos del terreno .

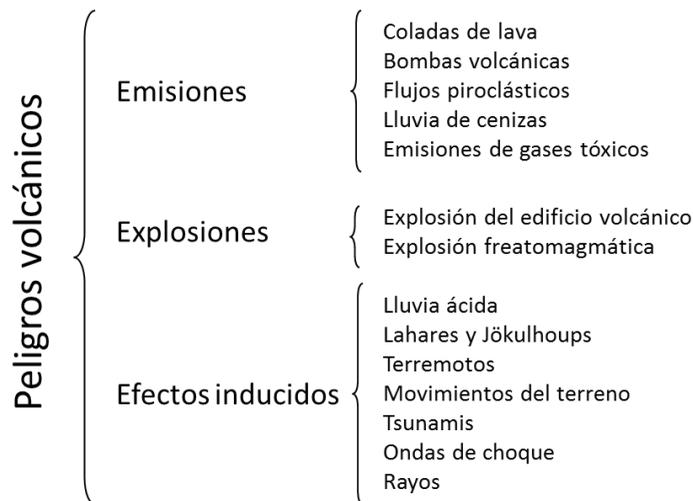


Figura 12. Tipos de peligros volcánicos (modificado de Scott, 1989).

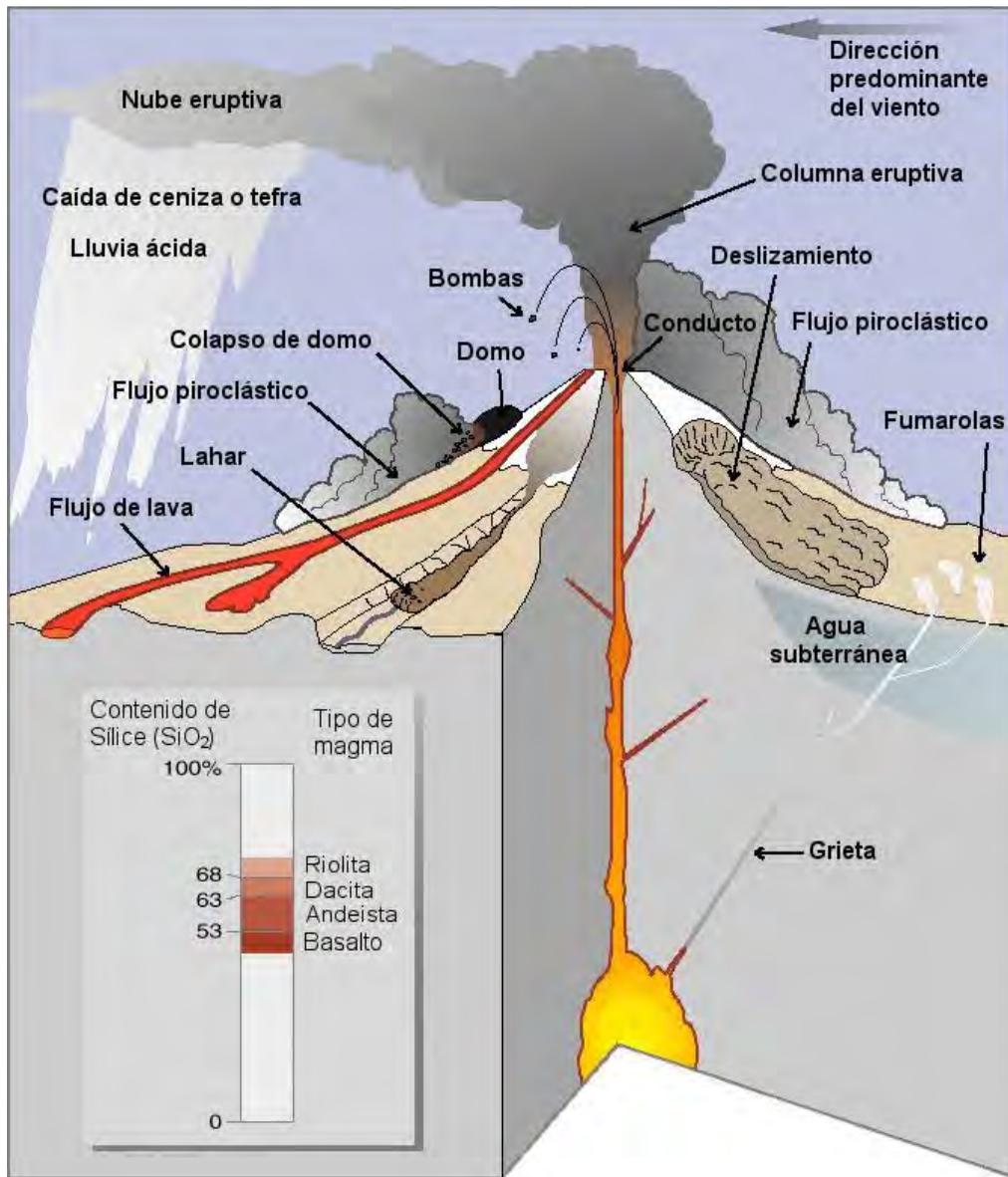


Figura 13. Peligros geológicos típicos del contexto volcánico. Modificado de USGS (2000).

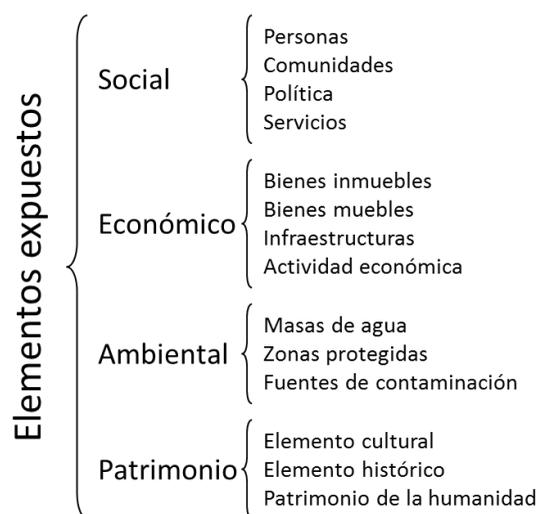


Figura 14. Clasificación de elementos expuestos.

## 2.2. Considerandos principales

Como se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior, delimitar bien el sistema, el ámbito o el alcance de lo que se considera posible evaluar, resulta crucial para establecer unos objetivos factibles tanto en plazo y presupuesto como en rigor científico y técnico. En este sentido, hay que señalar de un modo especial que este proyecto no persigue servir a otros propósitos que aquéllos que dieron lugar al Convenio suscrito entre las partes interesadas. Cualquier otro uso que potencialmente puedan tener o se les dé a estos datos será una responsabilidad exclusivamente del usuario y no del productor de esta información ni de ninguna de las partes que han contribuido en este trabajo.

A efectos del cálculo de la peligrosidad, se plantearon los siguientes límites al estudio:

1. Las inundaciones analizadas son avenidas relámpago, que siguiendo la clasificación de la Figura 10, son naturales, terrestres y vinculadas a la red fluvial. Y las únicas variables de interés y a determinar, aunque se estimen otros parámetros para alcanzar aquéllas, es el alcance en términos de máxima superficie de inundación instantánea en cada punto y su calado. El causante de esta inundación, será una precipitación cuyo periodo de retorno estimado sea de unos 500 años. No se tienen en cuenta

en este estudio los embalses o represamientos, ni las presas de contención de sedimentos, puentes o ningún otro obstáculo a la línea de flujo natural. Por línea de flujo natural se entiende en este estudio, al flujo derivado del cálculo con el Modelo Digital de Elevaciones del IGN, el MDT05, con una corrección hidrológica en términos de eliminación de endorreísmos.

2. A efectos del volcanismo, y debido a la ausencia de datos y presupuesto para poder realizar otras estimaciones con fundamento científico, se considerarán tan sólo las coladas de lava, que según la Figura 12, son un tipo de peligro volcánico por emisión de material. No se considerarán por tanto los efectos de explosiones, de efectos inducidos, ni de emisión de otro tipo de materiales (cenizas, bombas, gases). En cuanto a la probabilidad de ocurrencia, debido a lo complejo que resulta establecer modelos de recurrencia fiables, se ha optado por seleccionar un conjunto de 14 escenarios posibles y más representativos del proyecto VOLCANTÉN del IGME, de entre los más de 60 escenarios calculados. El parámetro de interés, al igual que en el caso de las inundaciones, es exclusivamente el alcance de las coladas de lava.
3. A efectos de sismicidad, se considerarán los efectos macrosísmicos de los eventos tectónicos, no sismo-volcánicos ni mixtos, y su respuesta microsísmica o efectos de sitio en términos de amplificación sísmica o aceleración pico del suelo (*Peak Ground Acceleration*, PGA). No se tendrán en cuenta posibles efectos inducidos (desprendimientos, deslizamientos, licuefacciones).

Habida cuenta de esta estricta delimitación, cabe esperar que los resultados de este proyecto disten de la realidad, pues al haber considerado tan sólo una parte de cada uno de los procesos, cabe pensar que toda estimación realizada pueda quedar sujeta a distinto grado de subestimación. Es decir, que el resultado representa un mínimo para un conjunto de escenarios en los que un proceso determinado alcanza un máximo en alguno de sus elementos causantes o en alguna de sus variables. No se ha de obviar que los procesos de alto periodo de retorno pueden y suelen ir acompañados de otros fenómenos potencialmente peligrosos.

## 3. Características de la zona de estudio

### 3.1. Geografía física y humana

#### 3.1.1. Localización, superficie y orografía

Las Islas Canarias están ubicadas al Oeste de la costa africana, con una distancia mínima de unos 100 km desde Puerto del Rosario, en la Isla de Fuerteventura, hasta Tarfaya (Marruecos). En concreto, se sitúan entre los 27°36' y 29°30' N y los 13°20' y 18°16' W (Figura 15).

El archipiélago canario tiene una superficie total emergida de unos 7.450 km<sup>2</sup>, siendo Tenerife la mayor de las islas (con algo más de 2.030 km<sup>2</sup>), seguida por Fuerteventura (1.660 km<sup>2</sup>) y Gran Canaria (1.560 km<sup>2</sup>). Continúan prácticamente en una progresión geométrica, Lanzarote (845 km<sup>2</sup>), La Palma (710 km<sup>2</sup>), La Gomera (370 km<sup>2</sup>) y El Hierro (270 km<sup>2</sup>). A excepción de Lanzarote y Fuerteventura, todas las islas alcanzan en su punto más elevado altitudes superiores a los 1.400 m sobre el nivel medio del mar. La cumbre más alta es El Teide, en Tenerife, con 3.718 m, seguida por el Roque de Los Muchachos (La Palma, con 2.426 m), y El Pico de las Nieves (en Gran Canaria, con 1.949 m). Estos importantes relieves en superficies relativamente pequeñas hacen que las pendientes medias sean muy elevadas. En concreto, la pendiente media del archipiélago es de 19,6° (según el MDT05, Modelo Digital de Elevaciones del IGN a 5 m de pixel), siendo La Gomera la más abrupta (con una pendiente media de 30 grados), seguida por La Palma (26 grados) y Gran Canaria (22 grados).

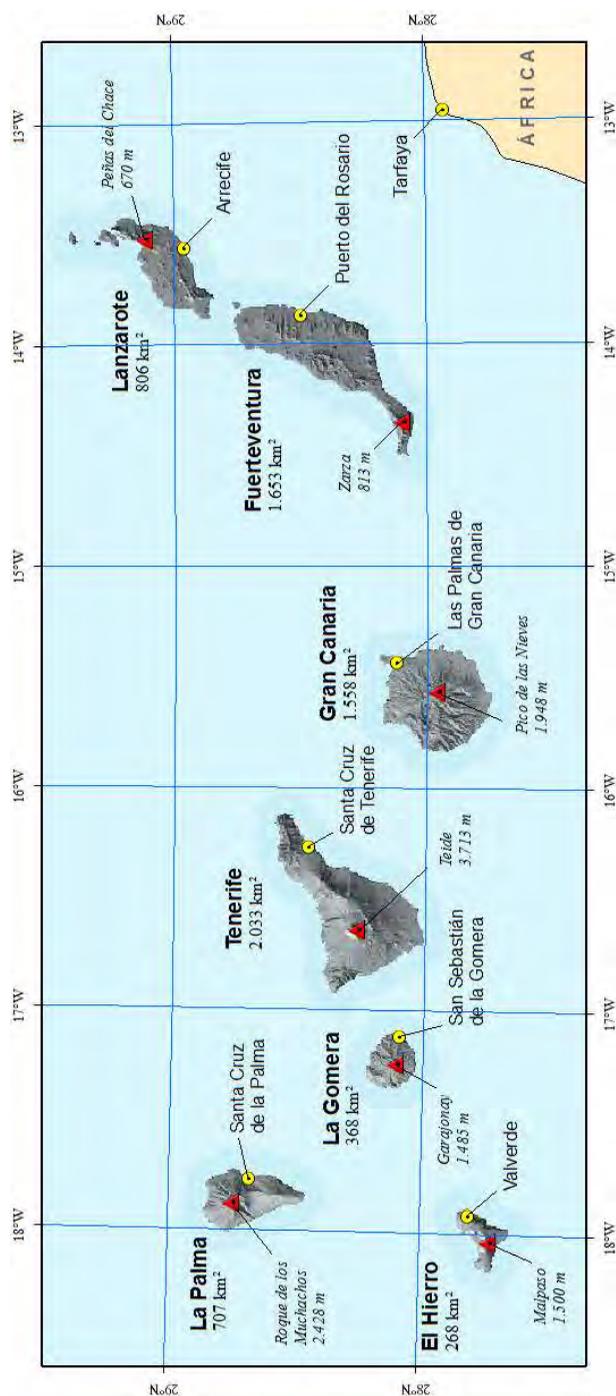


Figura 15. Localización del archipiélago canario, principales ciudades y máxima elevación de cada isla, con indicación de superficie.

### 3.1.2. Clima

El clima de las Islas Canarias está condicionado por varios factores, entre los que destacan los vientos alisios, la cercanía con el continente Africano, las corrientes marinas frías, y el relieve. Los vientos alisios, que soplan de componente noreste, atemperan el clima durante el verano, mientras que las corrientes marinas influyen durante todo el año, dando lugar a temperaturas medias anuales relativamente estables. De la zona templada, las Islas Canarias reciben el anticiclón de las Islas Azores, y de la zona subtropical reciben el aire sahariano de África. La retirada del anticiclón de Azores hacia Noroeste, produce que las borrascas de la zona templada afecten a Canarias, dando lugar a un tiempo bastante inestable. Por su parte, el importante relieve del archipiélago, tiene un efecto muy notable en la distribución de las precipitaciones, la nubosidad y la temperatura (Figura 16 y Figura 17). Todo ello hace que el clima de las Islas Canarias esté considerado a rasgos generales como subtropical oceánico, pero también, que existan importantes variaciones interinsulares e intrainsulares. Si bien la temperatura oscilan entre los 18 y los 21°C en las zonas costeras (siendo la vertiente sur algo más cálida que la norte y siendo las islas de Fuerteventura y Lanzarote las más cálidas) a medida que se asciende, la temperatura cae, lo que permite la existencia de nieves perpetuas en El Teide (Figura 17). El aire sahariano alcanza el archipiélago cuando el anticiclón de Azores se debilita, lo que a veces da lugar a una importante invasión de polvo (Figura 18).

La precipitación media anual acumulada refleja la variabilidad interinsular e intrainsular: mientras que Fuerteventura y Lanzarote registran valores de precipitación media anual acumulada inferior a 200 mm y con pocas variaciones internas, las demás islas presentan precipitaciones muy variables, en el orden de los 400 mm, siendo las vertientes norte más lluviosas que las vertientes sur, y dejándose observar la huella del relieve. La isla de La Palma es la más húmeda, acumulando máximos medios anuales superiores a los 800 mm en la vertiente norte y en la vertiente este (Figura 16). En general, los meses más lluviosos son diciembre y enero, y los más secos son junio, julio y agosto (Figura 19). En la Tabla 4 se muestran los valores medios anuales más altos del periodo instrumental, donde se puede observar cómo la década de 1980 resultó ser la más lluviosa. En la Tabla 5, se muestran los valores de precipitación diaria acumulada más importantes, que rozan los 600 mm en El Hierro, mostrando su marcado carácter torrencial. Las precipitaciones torrenciales se producen sobre todo en las cinco islas occidentales, debido al relieve, que en condiciones de inestabilidad

atmosférica favorece la formación de corrientes convectivas. Estas precipitaciones dan lugar con bastante frecuencia a fenómenos de inundación de tipo relámpago, con importante arrastre de material sólido y por tanto con gran potencial destructivo. Existen muchas referencias de inundaciones con efectos muy significativos (Tabla 6), pero sólo a partir de 1950 se cuenta con datos meteorológicos sistematizados suficientes.

Tabla 4. Valores medios anuales más altos de la cantidad de precipitación en las Islas Canarias (AEMET, 2012).

Lugar	Media anual (mm)	Valor más alto (mm)	Año
Vallehermoso-Igualero / La Gomera	634,0	1.083,1	1987
Tacoronte-Caridad / Tenerife	632,2	989,8	1989
Moya-Lomo La Majadilla / Gran Canaria	593,0	973,9	1979
Garafía-Tricias / La Palma	585,4	886,8	1987
San Mateo-Cueva / Grande Gran Canaria	574,2	951,2	1984

Tabla 5. Valores más altos de la precipitación diaria (AEMET 2012).

Lugar	Precipitación (mm)	Fecha
San Andrés / El Hierro	590,0	24/02/1988
Sauces-Espigón Atravesado / La Palma	450,0	27/02/1988
Caldera de Taburiente-Taburiente / La Palma	399,3	10/02/1978
Vilaflor / Tenerife	358,9	11/04/1977
Mazo-Tigalate / La Palma	350,0	17/12/1991

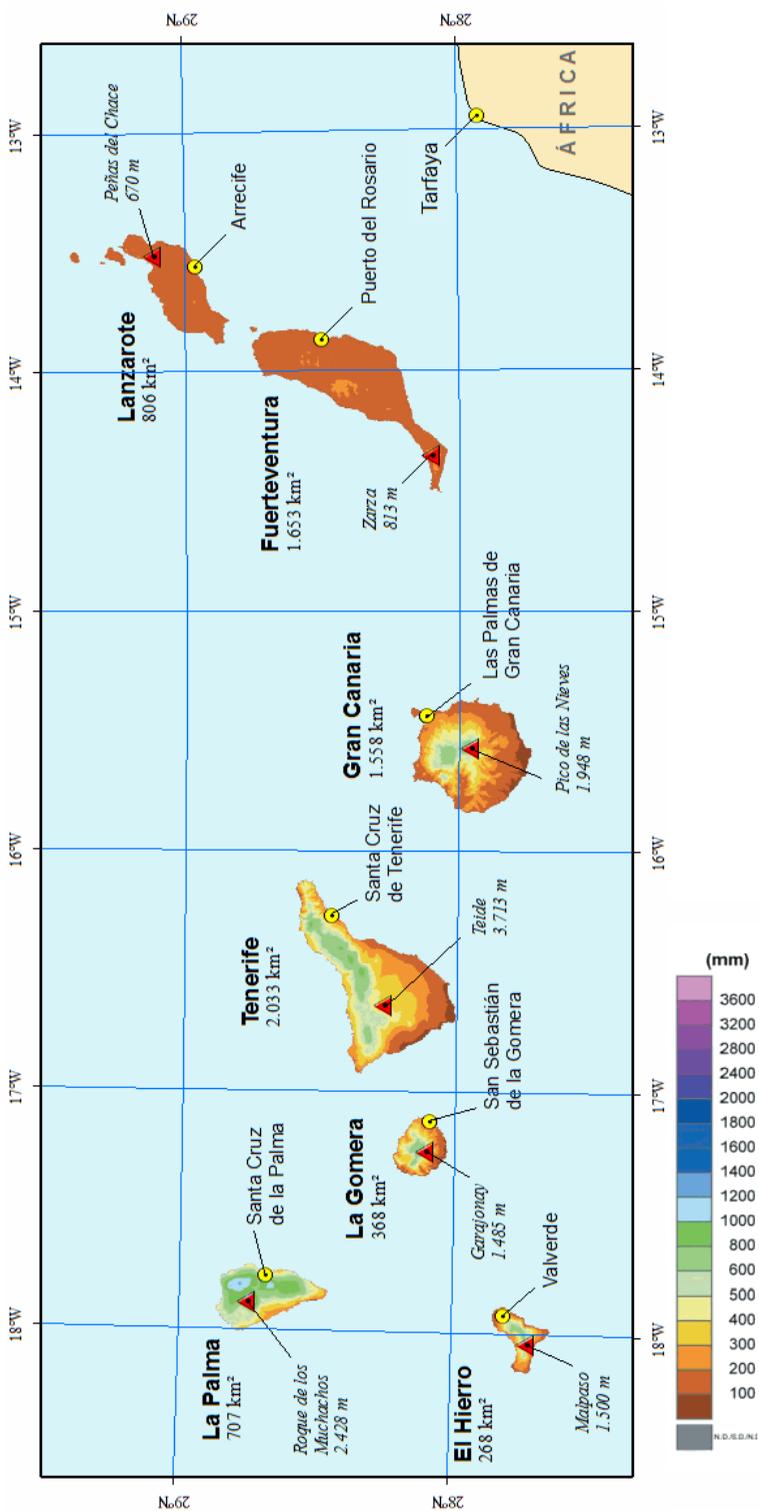


Figura 16. Precipitación anual media en el archipiélago canario (modificado de AMET, 2012).

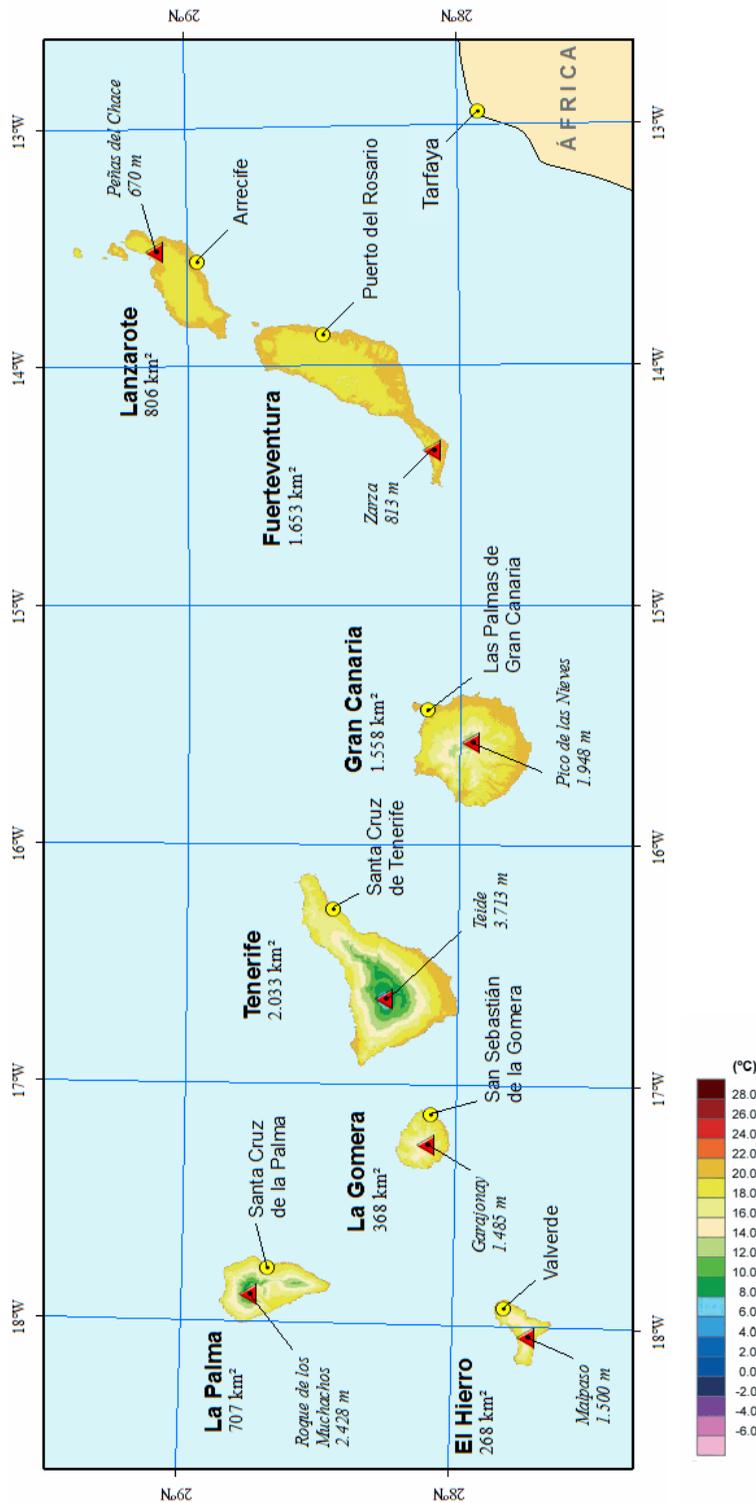
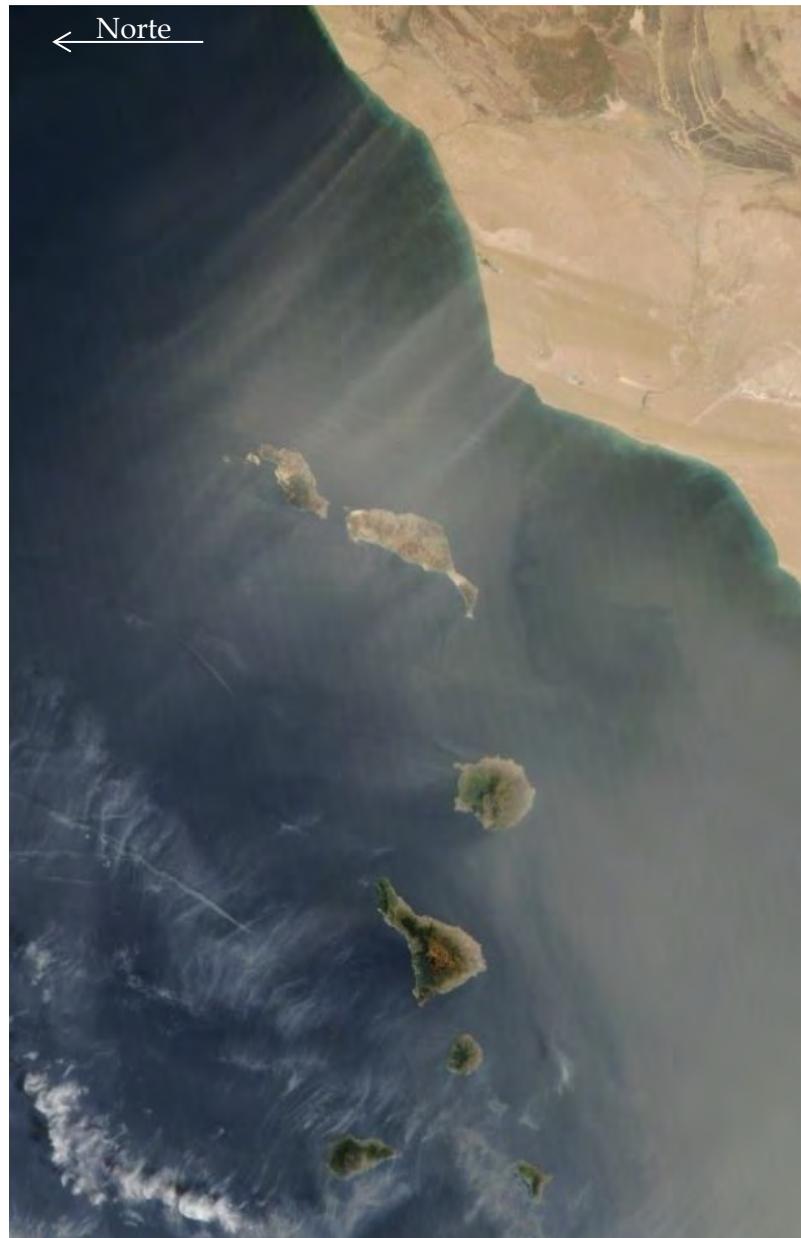
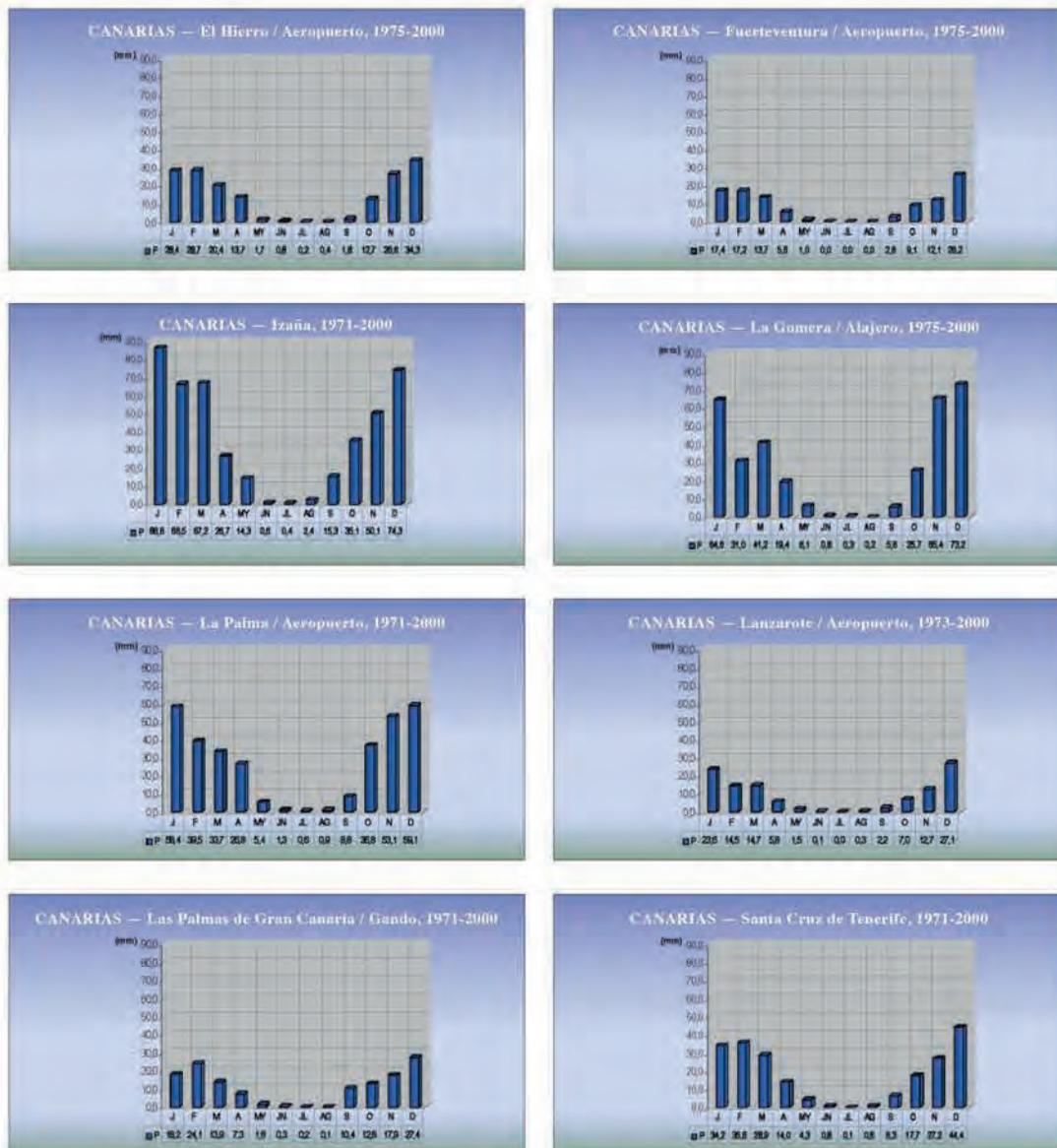


Figura 17. Temperatura anual media en el archipiélago canario (modificado de AMET, 2012).



*Figura 18. Imagen de satélite en la que se observa el polvo sahariano sobre el archipiélago canario el 3 de febrero de 2004. Imagen de MODIS Land Rapid Response Team en NASA GSFC (<http://earthobservatory.nasa.gov>).*

Normales climatológicas de la precipitación en las Islas Canarias (1971-2000)



J, F, M, A, MY, JN, JL, AG, S, O, N, D  
 Enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre

Figura 19. Precipitación total media en Canarias (mm) por meses (AEMET, 2012).

Tabla 6. Eventos históricos más significativos (desde 1580 hasta 1950). Recopilación de *Dorta Antequera (2007)*. Entre paréntesis la ciudad/isla más afectada. GC: Gran Canaria; TF: Tenerife; LP: La Palma; LZ: Lanzarote; T: más de tres islas; LPGC: Las Palmas de Gran Canaria; SCTF: Santa Cruz de Tenerife; LLTF: La Laguna. El número entre paréntesis indica la cantidad de víctimas mortales. sd: hay constatación de muertos pero no está precisado el número exacto.

S. XVI	S. XVII	S. XVIII	S. XIX	1900-1950
1581 (LPGC) 1590 (TF) 1594 (SCTF)	1615 (LPGC) 11/12/1645 (TF: >100) 1646 (LPGC: sd) 1694 (LPGC)	26-27/01/1713 (LLTF y LPGC: sd) 25/10/1722 (TF y GC) 01/11/1749 (LLTF) 1750 (SCTF) 1752 (SCTF) 1759 (SCTF) 06/01/1766 (LPGC) 1773 (SCTF) 1775 (LPGC) 1778 (LPGC) 1779 (LPGC) 1780 (LP) 21/02/1781 (TF: 1) 09/10/1783 (LP: 3) 25/03/1791 (LPGC) 14-16/10/1792 (LP) 12/11/1798 (LPGC)	1813 (LZ) 1815 (TF) 1821 (TF) 7-8/11/1826 (TF: 200-600?) 11/ 1829 (SCTF) 03/1837 (SCTF) 1849 (LLTF) 18-19/11/1851 (GC) 23/12/1851 (LPGC) 06/12/1853 (SCTF) 12/12/1859 (SCTF) 06/10/1866 (LPGC) 03/1867 (SCTF) 10-12/ 1879 (TF y LPGC: 5) 09/11/1884 (LPGC) 13/10/1890 (GC) 05/03/1894 (GC: 1) 18/02/1896 (GC) 1899 (TF)	12/04/1901 (LPGC) 13/10/1903 (LPGC) 12/04//1904 (LPGC) 09/11/1906 (LPGC) 02/01/1910 (GC: 1) 07/02/1912 (GC) 12/12/1917 (LPGC) 02/03/1920 (LPGC) 29/11-01/12/1922 (TF) 16/11/1924 (LPGC) 26/11/1925 (LPGC) 16-17/01/1926 (GC: 6) 22/10/1944 (T) 04/05/1944 (SCTF) 14/10/1945 (GC) 30/11/1946 (GC: 4)

En la Tabla 7 se pueden observar algunos episodios que desde 1950 han causado importantes daños. *Dorta Antequera (2007)* destaca el evento de marzo de 2002, cuya precipitación equivale a la precipitación media anual, pero caída en poco más de dos horas en Santa Cruz, y sin embargo, en La Laguna, a tan sólo 9 km, los pluviómetros tan sólo registraron 34,5 mm. Es decir, que las precipitaciones de carácter torrencial pueden ser muy locales. Precisamente la alta localización de los fenómenos más intensos, o bien la desvinculación de los procesos meteorológicos dominantes, podría explicar la ausencia de correlación entre la precipitación y la orientación de vertientes y la elevación para periodos de retorno superiores a 25 años (*Martínez Allegue et al., 2012*), si bien no puede descartarse de se trate de un efecto numérico inducido por la cantidad de datos disponibles para un análisis temporal mucho mayor que la ventana temporal de datos disponibles. Esta ausencia de datos, no es algo novedoso, casi todos los estudios de precipitaciones, especialmente los que abordan periodos de retorno altos, se enfrentan al mismo problema, y en algunos casos la desconfianza que generan estos complejos conjuntos de datos pueden conducir directamente a

evitar trabajar con ellos (islas orientales en MMA e INM, 2002). Para Dorta Antequera (2007) el análisis estadístico con periodos de retorno no es una posibilidad debido a la gran irregularidad y a desviaciones típicas tan extraordinarias de la series, añadiendo sin embargo una estimación de frecuencia de lluvias torrenciales mayor que un episodio al año con umbrales máximos superiores a 200 mm/día.

Tabla 7. Eventos con precipitaciones torrenciales, recopilación de Dorta Antequera (2007).

Estación	P (mm)	Fecha
Santiago del Teide-Tamaimo* (TF)	391,4	19/02/1952
Izaña (TF)	360,0	11/11/1950
Vilaflor* (TF)	358,9	11/04/1977
Esperanza C.F.* (TF)	290,0	10/04/1977
Las Cañadas-Parador* (TF)	275,0	04/12/1991
Las Cañadas-Boca Tauce A* (TF)	270,0	04/12/1991
Anaga-Mercedes* (TF)	270,0	10/04/1977
La Laguna (Instituto)* (TF)	269,0	30/11/1922
Aeropuerto Los Rodeos (TF)	260,3	10/04/1977
Santa Cruz de Tenerife (TF)	232,6	31/03/2002
Aeropuerto Tenerife Sur (TF)	136,0	19/11/1983
Sauces-Espigón Atravesado* (LP)	450,0	27/02/1988
Caldera de Taburiente-Taburiente* (LP)	399,3	10/02/1978
Mazo-Tigalate* (LP)	350,0	17/12/1991
Sauces-Marcos y Cordero* (LP)	330,8	04/12/1991
Barlovento-C.F.* (LP)	286,7	29/03/1990
S/C de La Palma-Velhoco* (LP)	258,0	04/12/1991
Breña Alta-Botazo* (LP)	261,6	04/12/1991
Mazo-Rosas* (LP)	250,0	28/02/1988
Sauces-San Andrés* (LP)	250,0	15/01/1957
Mazo-Aeropuerto (LP)	183,6	19/02/2004
Cuevas Blancas* (GC)	334,7	15/02/1956
Lomo Aljorradero* (GC)	302,1	23/10/1955
Tenteniguada* (GC)	268,2	23/10/1955
La Retamilla* (GC)	248,6	17/11/1962
Tamareceite (GC)	244,2	23/11/1955
Presa de Hornos (GC)	242,6	17/11/1962
San Bartolomé (GC)	242,5	06/12/1991
Aeropuerto de Gran Canaria (GC)	85,0	28/09/1987
Guisgüey* (FU)	158,0	19/09/1984
Puerto del Rosario-Aeropuerto (FU)	76,5	05/12/1991
Puerto del Rosario-Los Estancos (FU)	90,0	04/12/1991
La Vegueta* (LZ)	166,5	17/12/1972
Lanzarote-Aeropuerto (LZ)	79,3	25/01/1980
San Andrés* (EH)	590,0	24/02/1988
San Andrés-A* (EH)	400,0	26/02/1988
San Andrés-B* (EH)	370,0	27/02/1988
Frontera-Llanía* (EH)	337,9	12/03/2001
Erese* (EH)	280,2	10/03/1957
Aeropuerto Los Cangrejos (EH)	280,0	27/02/1988
San Sebastián Faro de S. Cristóbal* (LG)	320,0	01/11/1960

Existen en las Islas Canarias otros fenómenos climatológicos con potencial para causar daños, como son las sequías, los fuertes vientos, las olas de calor o las advecciones de polvo, que no van a ser analizadas en este estudio.

### **3.1.3. Flora y fauna**

La vegetación, la fauna y los usos del suelo están condicionados tanto por la climatología de las islas como por el relieve. No obstante, en rasgos generales, se pueden distinguir cinco grandes tipos de hábitats (Bramwell, 1997): zonas xerofíticas, bosque termófilo, bosque húmedo, pinares, y alta montaña.

En las zonas xerofíticas (que son zonas en cotas bajas, hasta los 700 m) con un clima de tipo mediterráneo o sahariano, son dominantes las tabaibas, los cardones y el matorral semidesértico, con abundantes halófitas (ambientes salinos) y psamófitas (ambientes arenosos). Los bosques termófilos representan la zona de transición entre la zona xerófita y el bosque húmedo. Estos bosques claros de clima mediterráneo, están caracterizados por la presencia de sabinas, acebuche y lentisco. El bosque húmedo sólo está presente en zonas de abundante precipitación o humedad, generalmente en la vertiente norte de las islas entre las cotas de 500 a 1.500 m, donde los vientos alisios propician la formación del mar de nubes. Dentro del bosque húmedo se pueden distinguir dos subtipos de bosque, la laurisilva (con presencia de laurel, barbusano, tilos, viñátigos, y abundante sotobosque) y el fayal-brezal (que siendo menos húmedo que el anterior presenta como especies características al brezo y a la faya). Normalmente por encima de los 1.200 m y hasta unos 2.000 m, se pueden encontrar masas boscosas de pino canario, con algunas jaras y tomillos. Por encima de los 1.900 m en Tenerife y en La Palma, se encuentra la zona de alta montaña, especialmente rica en endemismos y con comunidades arbustivas abiertas con leguminosas y eventualmente algunos cedros. Entre la flora endémica destacan el tajinaste rojo, el alhelí del Teide, la retama del Teide, o la violeta del Teide entre otros (Figura 20).

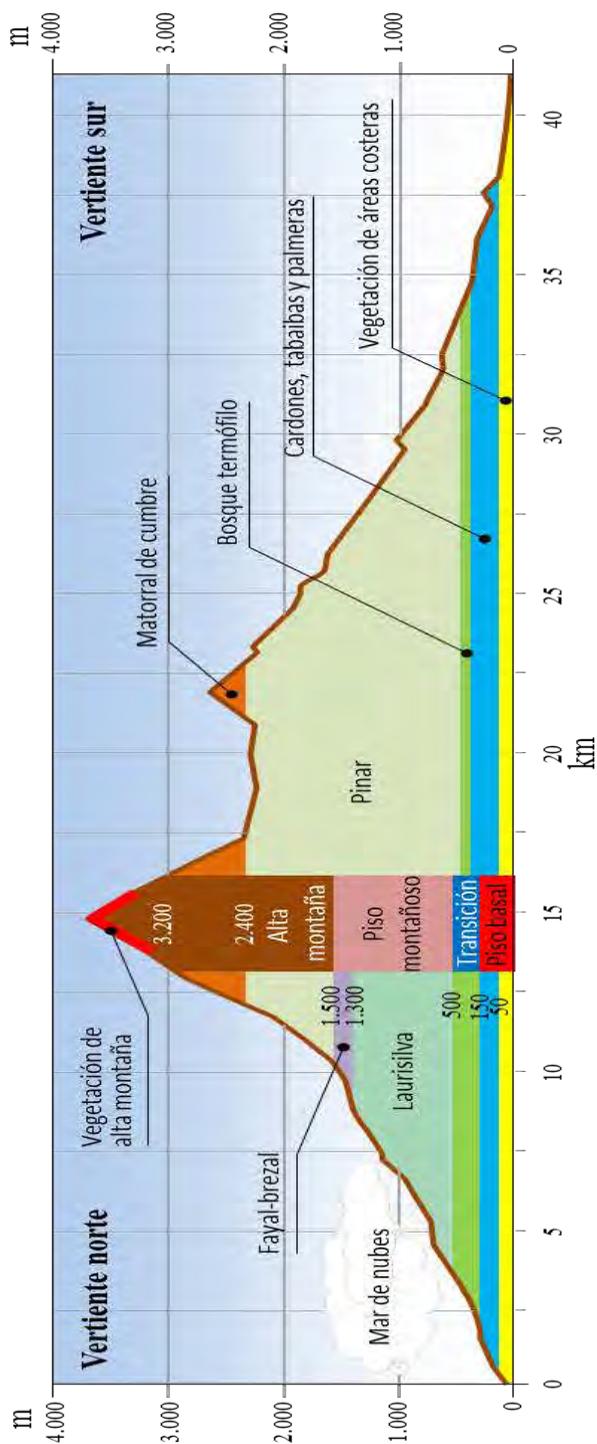


Figura 20. Distribución de la vegetación y pisos de vegetación en función de la altitud y la orientación.

### 3.1.4. Economía

La economía actual está marcada por la salida de una profunda crisis económica a nivel mundial, observándose una aceleración gradual apoyada por las economías desarrolladas y por la recuperación en la UEM que ha visto compensado el menor dinamismo de los países emergentes (CES, 2014). Esto, unido a la reactivación de la economía europea y al resurgimiento de tensiones geopolíticas en mercados competidores procicia una recuperación escalonada de la actividad y del empleo de la economía española en general y la canaria en particular (Figura 21).

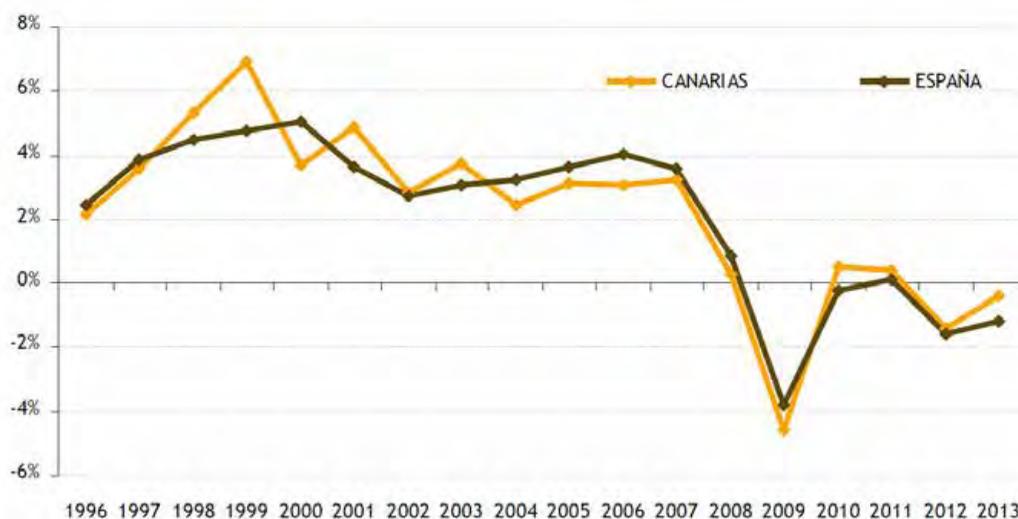


Figura 21. Evolución de la tasa de crecimiento del PIB de España y Canarias (1996-2013; CES, 2014).

El PIB nominal por habitante en Canarias en 2013 alcanzó el 84,7% (18.873 €), lo que la sitúa en una modesta posición décimo tercera entre las comunidades autónomas. Su variación media anual acumulada para el periodo 2008-2014 es del 1,8% negativo, ligeramente superior a la media nacional. El PIB de Canarias representó el 3,9% del PIB de España, situándose por encima de las economías de Castilla la Mancha y Aragón.

La economía de las Islas Canarias está basada en el sector terciario, comercio, transporte y hostelería, con una dinámica sectorial de casi 13 mil millones de

euros en 2013 (CES, 2014). Los principales destinos turísticos son Tenerife y Gran Canaria, ofertando en 2014 más de 85.000 y 60.000 plazas hoteleras respectivamente, lo que representa más del 60% del total de plazas ofertadas en el archipiélago. Le siguen Fuerteventura (con un 18%) y Lanzarote (con un 15%). El sector primario en Canarias contabilizó 389 millones de euros en 2013, de los cuales el 84% está representado por frutales (plátano) y hortalizas (tomate; CES, 2014). El regadío predomina claramente frente al seco, situándose en las vertientes de barlovento entre los 500 y 1.500 m, aprovechando la humedad que aporta el mar de nubes, si bien su expansión está limitada por los recursos hidrogeológicos. Mientras que el mercado del plátano es nacional, casi todo el tomate es exportado aunque está sufriendo un fuerte descenso, situándose en valores inferiores a 2005.

### **3.1.5. Demografía**

Según el CES (2014), la pirámide de población de Canarias a 1 de enero de 2013 (Figura 22) muestra una estructura relativamente joven en comparación con la media nacional, pero con fuerte potencial para un envejecimiento futuro, lo que se debe a la baja tasa de nacimientos de los últimos años. Este proceso de envejecimiento de la población, hará que se incremente el número de personas de mayor edad, con edades de los 65 años en adelante. Según las proyecciones demográficas del INE (2013-2023), en Canarias el segmento de la población con 65 o más años crecerá de media en torno al 16% en diez años, siendo este crecimiento incluso mayor en las edades más avanzadas: el grupo de 85 y más años crecerá un 37%.

El archipiélago canario es, en general, una zona muy densamente poblada, con una densidad de población de 282 habitantes por km<sup>2</sup>, una cifra muy superior a la densidad de población de España, de 93 habitantes por km<sup>2</sup>. En un contexto de disminución generalizada de la población en casi todas las islas, se observa un aumento de la misma en las islas de Fuerteventura (2,6%) y Gran Canaria. La Gomera, en cambio, ha perdido un 5,4% de su población.

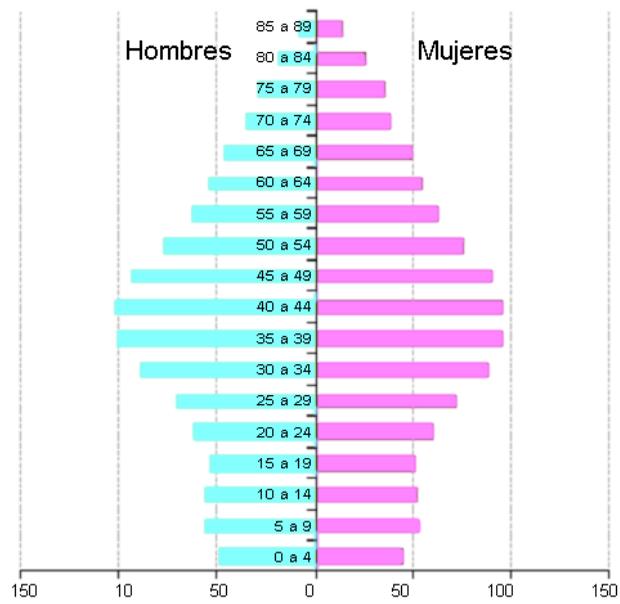


Figura 22. Pirámide poblacional de Canarias a 1 de enero de 2013 (modificado de CES, 2014).

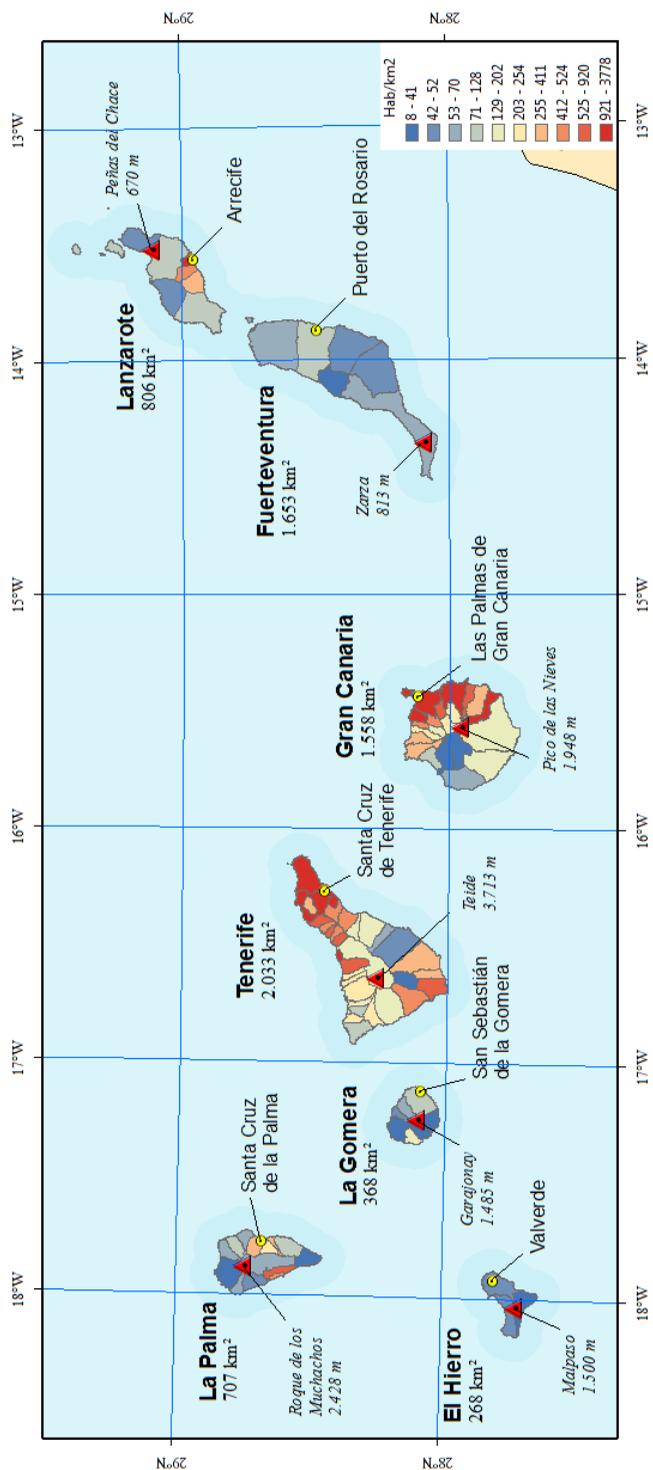


Figura 23. Densidad de población representada por cuantiles (redondeados) con datos del INE a 1 de enero de 2011.

## 3.2. Contexto geológico

Las Islas Canarias se encuentran dentro de lo que se denomina región Macaronesia (Figura 24), término proveniente de la mitología griega, que significa “islas afortunadas”. Esta región incluye a un grupo de archipiélagos de origen volcánico situados en el Atlántico Norte, desde las islas de Cabo Verde hasta las islas Azores, en concreto, está formada por los archipiélagos de Cabo Verde, Canarias, Madeira y Azores. Estos archipiélagos comparten similitudes por su origen volcánico pero presentan notables diferencias como consecuencia de los distintos escenarios geodinámicos entre ellos. Mientras que las Islas Azores están situadas sobre la dorsal Atlántica, el resto de los archipiélagos se encuentran sobre la placa Africana. Por estas y otras razones no está claro si estos archipiélagos proceden de la misma pluma magmática o si existen varias que han dado lugar a dichos archipiélagos, como defienden algunos autores como [Geldmacher et al. \(2005\)](#), aludiendo a las distintas firmas isotópicas.

El archipiélago actual en Canarias es sólo la parte emergida en este momento geológico de un conjunto de relieves con base submarina. Para poder estudiar la génesis y evolución de las Islas Canarias debe tenerse en cuenta la existencia de los relieves a lo largo de toda su historia geológica, tanto los emergidos como los submarinos. El conjunto de islas y montes submarinos que se han originado por el mismo proceso que las Canarias actuales, se engloban en la Provincia Volcánica Canaria (Figura 25). En la Provincia Volcánica Canaria se observa una clara progresión de edades a partir de la isla de El Hierro, la más joven, hacia Fuerteventura. Esta progresión de edades se hace aún más evidente si se tienen en cuenta las edades de los montes submarinos. Resulta llamativo que la alineación de las edades es sincrónica con la Provincia Volcánica de Madeira, habiendo progresado distancias similares en tiempos similares y presentando una curvatura paralela en su progresión (Figura 25).

Otra de las peculiaridades del archipiélago canario en cuanto a su evolución, es el importante cambio ocurrido en la alineación de las islas tras la formación de La Gomera: la alineación entre islas pasa de ser sencilla (la formación de la isla siguiente no comienza hasta estar la isla anterior bastante formada) a ser una alineación doble (la construcción simultánea de dos islas desde sus fases juveniles iniciales) como ocurre con La Palma y El Hierro (Figura 26). Además ocurre un fenómeno de alternancia de “encendido y apagado” en los últimos 120.000 años, es decir, mientras se produce una etapa de alta actividad eruptiva en

El Hierro, en La Palma la actividad es baja; y viceversa. Esta alternancia indica una clara relación entre ambas, apoyado por la diferencia de edad de formación de dichas islas respecto a La Gomera, que puede deberse al tiempo necesario para la formación de ambas islas a la vez y a la mayor profundidad del océano.

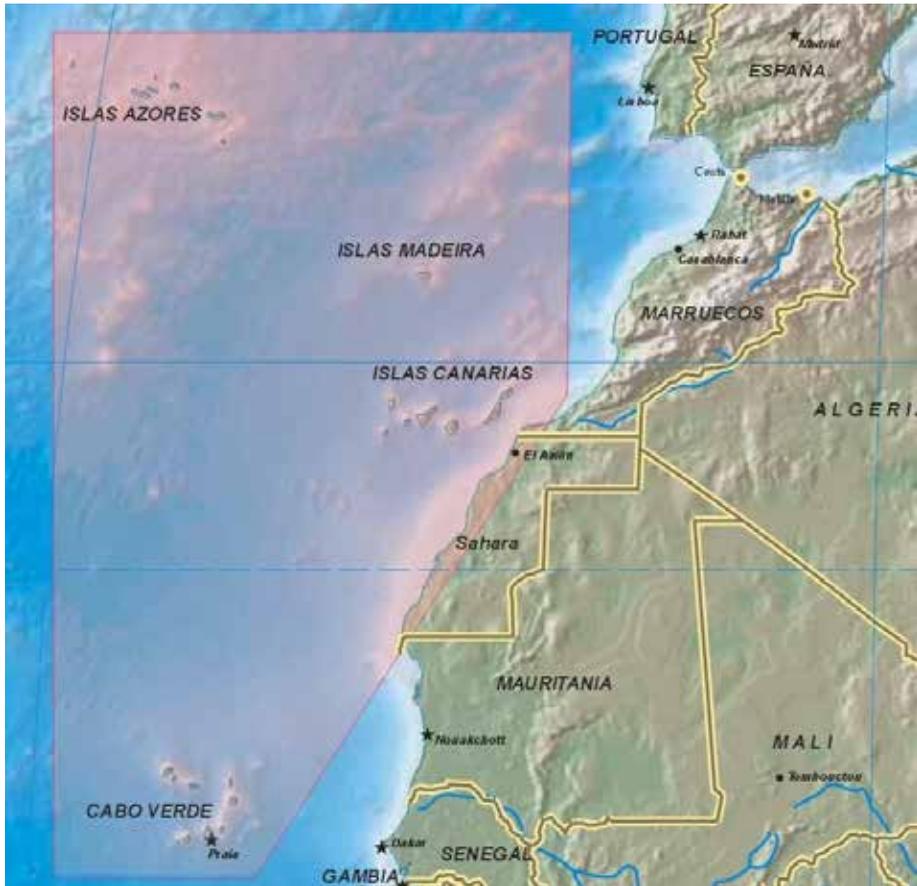


Figura 24. Región de Macaronesia (tomado de <http://www.gobiernodecanarias.org>).

Este cambio en la alineación de las islas podría tratarse de una variación en la dirección de la traza del punto caliente, similar a lo que ocurre en Hawái con la doble alineación Kea y Loa, o por una alteración en el desplazamiento de la placa, que puede imponer esfuerzos compresivos en el frente de la traza del punto caliente, inhibiendo la formación de la siguiente isla. Se vería con mayor

detalle con la evolución del monte submarino de Las Hijas, que de tratarse del embrión de la siguiente isla evidenciaría el giro, pasando a un rumbo SO.

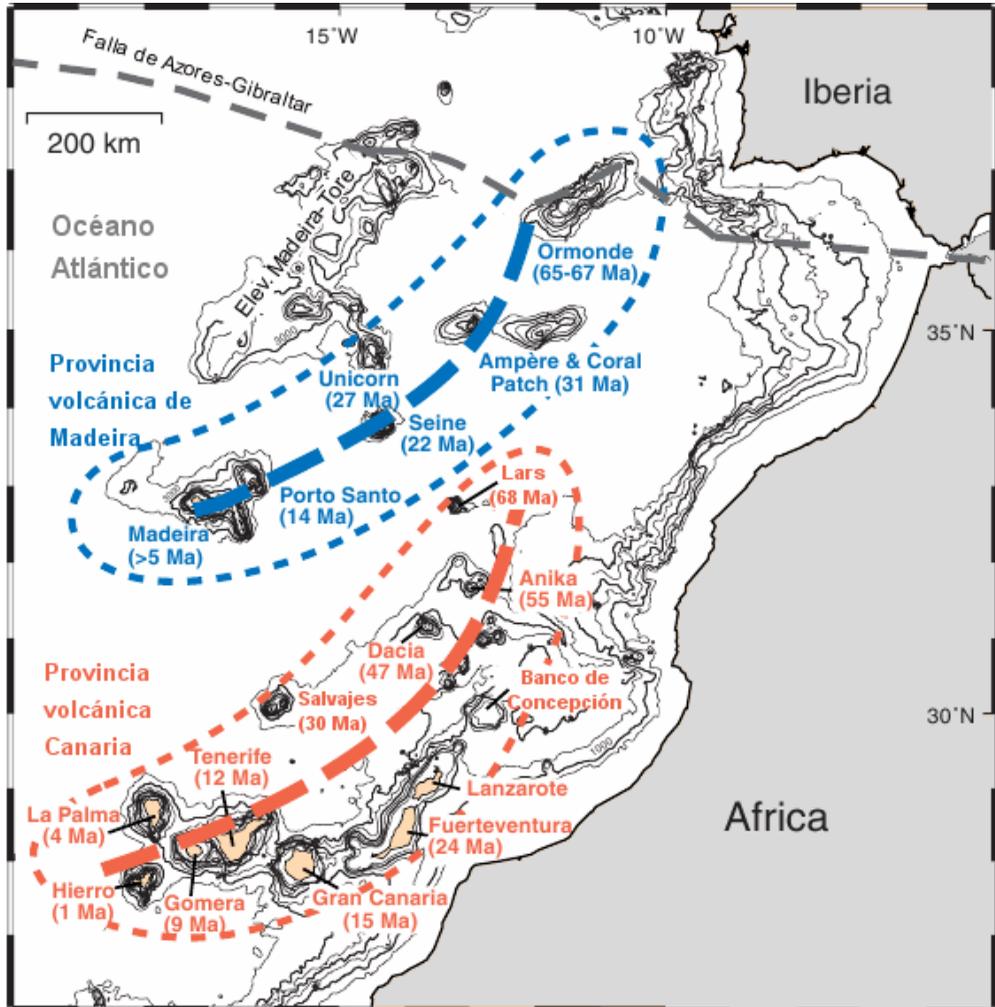


Figura 25. Datación islas y montes submarinos de la Provincia Volcánica de Canarias y alineación paralela entre los archipiélagos de Canarias y de Madeira (Modificado de Geldmacher et al., 2005).

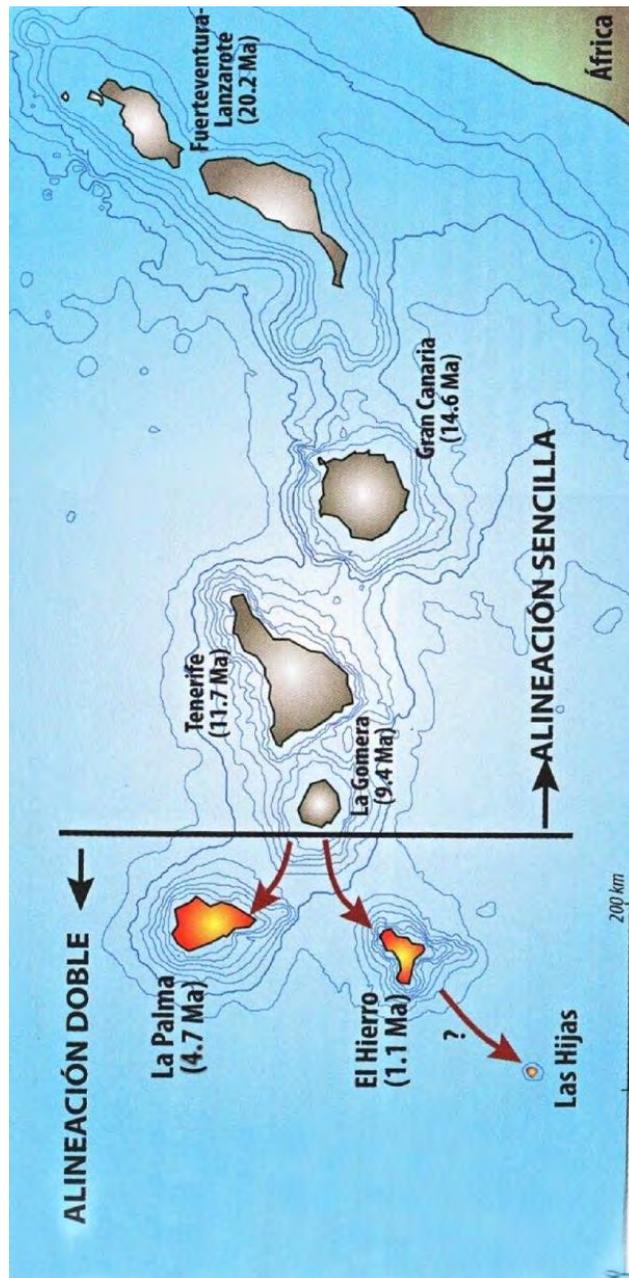


Figura 26. Cambio de alineación sencilla a doble en el archipiélago canario tras la formación de La Gomera, (modificado de Carracedo, 2011).

### 3.3. Características geológicas generales

Las Islas Canarias son, por el volumen de materiales emitidos durante su formación y por la duración de su actividad volcánica, uno de los archipiélagos volcánicos más importantes del Océano Atlántico. El archipiélago está formado por siete islas mayores, que suelen dividirse según sus rasgos comunes en islas orientales (Lanzarote y Fuerteventura), centrales (Gran Canaria, Tenerife y La Gomera) y occidentales (La Palma y El Hierro). Comparte con los archipiélagos de Madeira y Cabo Verde la peculiar situación de encontrarse en las proximidades del margen continental africano, un bode de placa considerado como pasivo.

Las Islas Canarias se desarrollaron sobre corteza oceánica, aunque se admite la posibilidad de que bajo las islas orientales pueda ser de carácter transicional. El bandeo magnético del fondo marino indica que la edad del fondo es Jurásica, pues el Banco de la Concepción y el Este del archipiélago se sitúan en el cron S1, y entre La Palma y El Hierro en el cron M25.

La formación de las islas es bastante más tardía que el suelo sobre el que se construyen, levantándose cada una como construcciones independientes, y en general aisladas (a excepción de Lanzarote y Fuerteventura), separadas por profundidades entre 3.000 m en las islas centrales y 4.000 m en las occidentales. Son grandes construcciones cónicas con diámetros basales de entre 50 y 100 km, estando la mayor parte del edificio volcánico sumergido. En términos volumétricos, en las islas orientales no emerge más del 1% y en las islas centrales y occidentales emerge entre el 3 y el 9% (Schmincke, 1982).

Cada isla ha tenido una historia y un comportamiento diferente al resto de las islas, pero el archipiélago se diferencia de otras islas volcánicas por la prolongada duración de su actividad que, a excepción de las más jóvenes (La Palma y El Hierro) han superado los 10 Ma o incluso los 20 Ma. Algunas islas están caracterizadas por la existencia de distintos periodos de actividad volcánica constructora alternados con periodos de reposo e intensa erosión, mientras que otras parecen haber tenido una actividad más continuada en el tiempo (Figura 28 y Figura 29). En el desmantelamiento de las islas han jugado un papel muy importante los deslizamientos de grandes masas, acompañadas, o no, de erupciones explosivas.

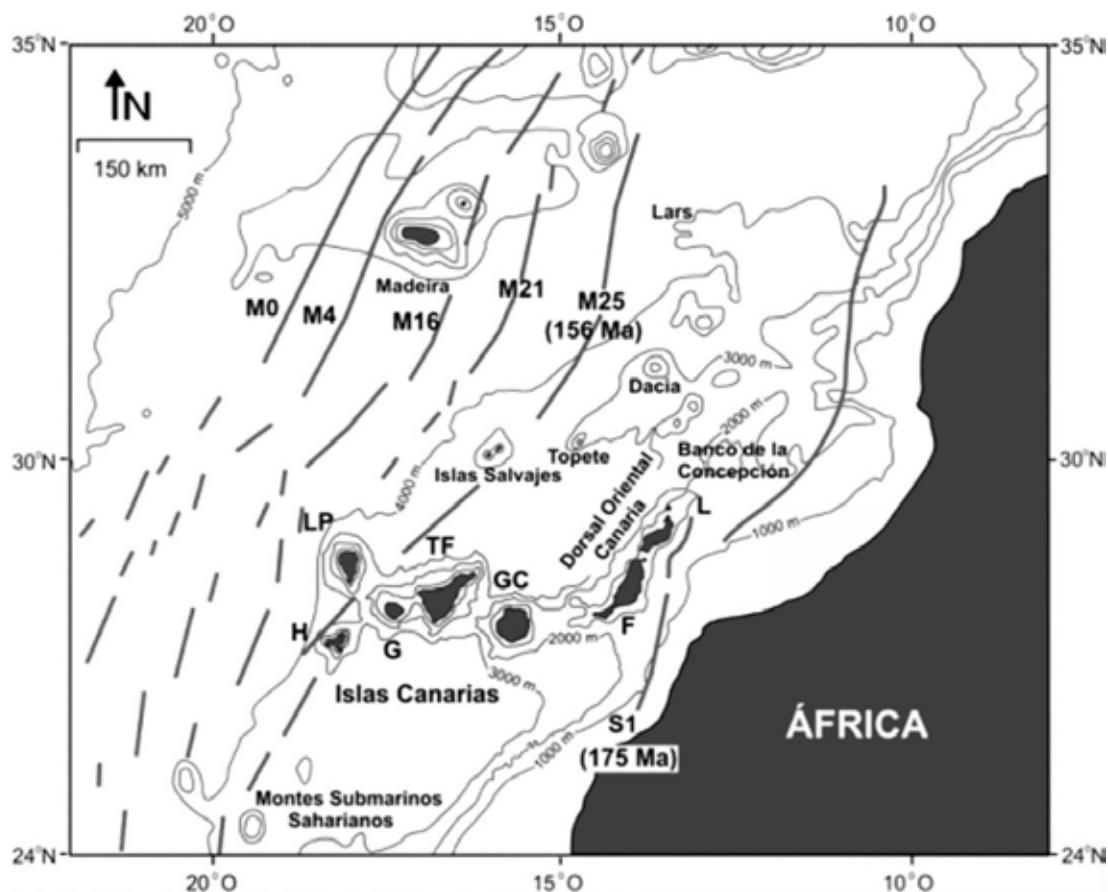


Figura 27. Mapa batimétrico del archipiélago canario y de los relieves submarinos próximos, con la posición de los principales crones de la corteza oceánica (modificado de Krastel y Schmincke, 2002).

La composición de los magmas en el archipiélago canario es muy variado, pero casi siempre dentro del campo alcalino y predominando los términos básicos. Los magmas de afinidad alcalina normal o fuertemente alcalinos son los más abundantes, y son raros los términos toleíticos y ultra-alcalinos. Los magmas sálicos son escasos en algunas islas (Lanzarote) pero muy abundantes en otras, como Tenerife y Gran Canaria, lo que es extraño en otros archipiélagos volcánicos como Hawái.

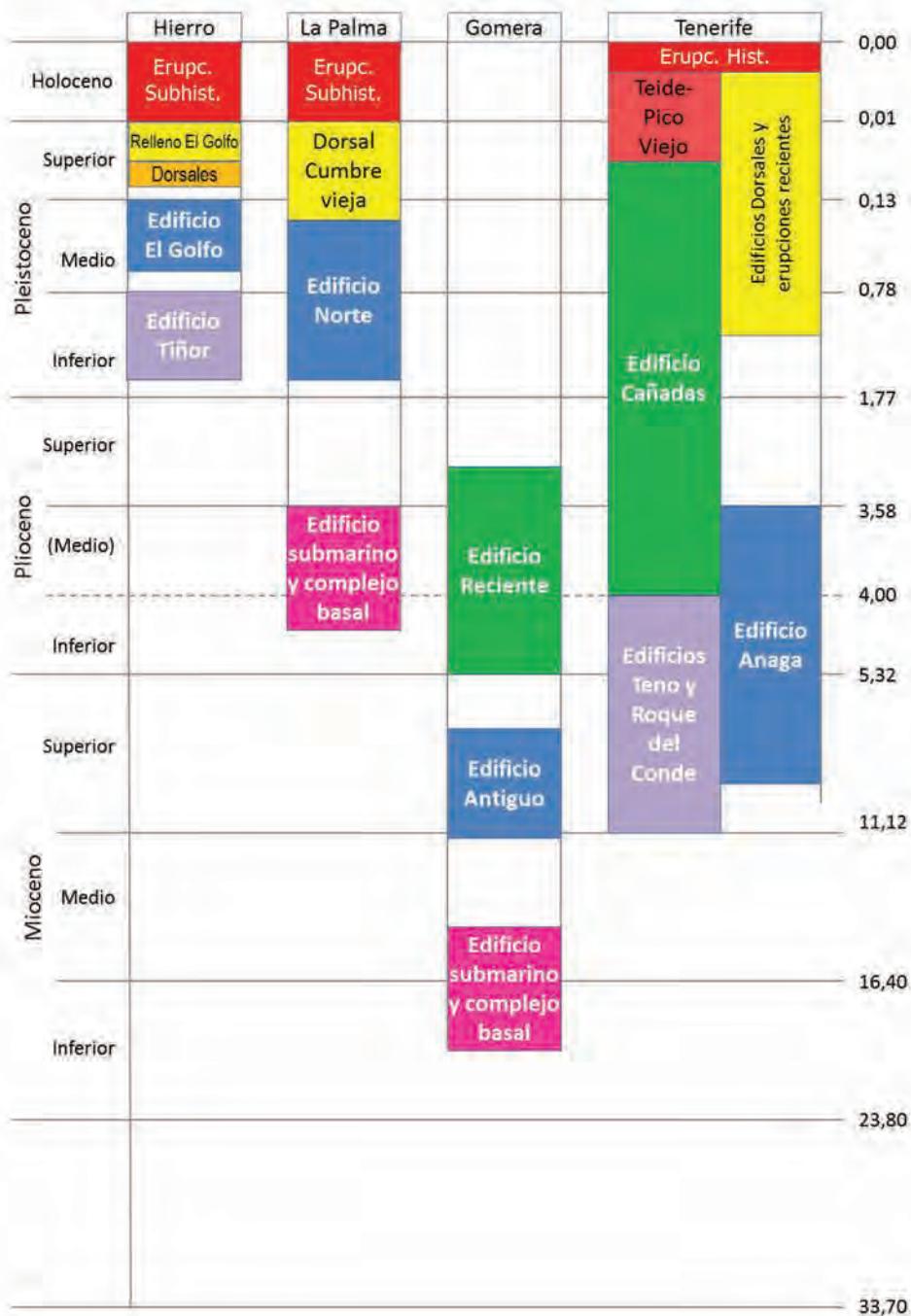


Figura 28. Resumen de la volcano-estratigrafía de las islas occidentales y Tenerife (modificado de Vera, 2004).

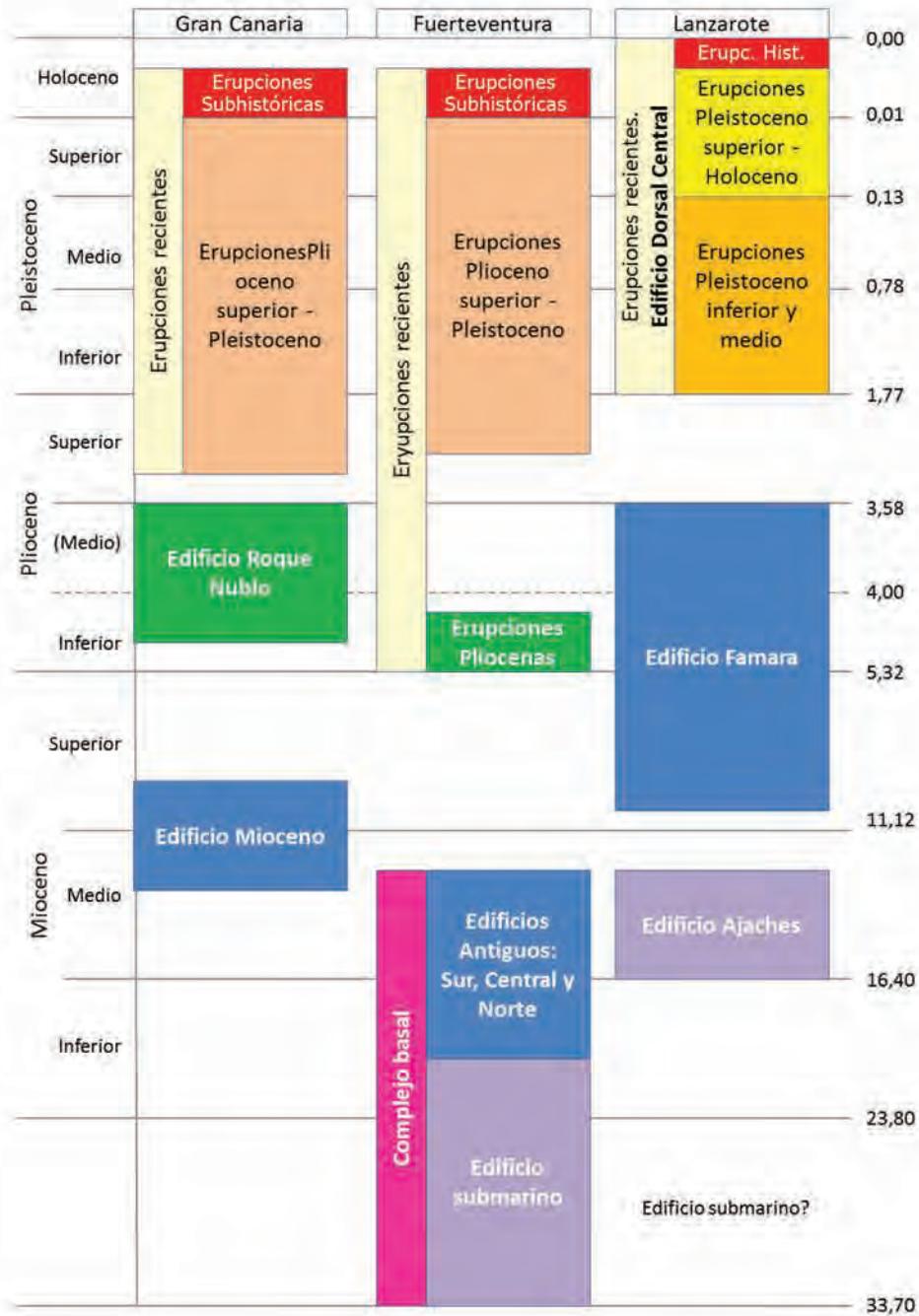


Figura 29. Resumen de la volcano-estratigrafía de las islas orientales y Gran Canaria (modificado de Vera, 2004).

## 3.4. Origen de las Islas Canarias

El origen de las Islas Canarias aún es controvertido, habiendo básicamente dos grandes tendencias a la hora de explicar su génesis, las que se apoyan en teorías de punto caliente y las que se apoyan en modelos tectónicos.

### 3.4.1. Teorías basadas en el punto caliente

Las teorías basadas en el punto caliente proponen la existencia de una anomalía térmica conectada con el manto (una pluma mantélica) que se considera como la fuente del magmatismo. Con ello se explica la formación de archipiélagos de origen volcánico que no tienen relación con bordes de placa activos, que es donde se produce casi todo el volcanismo de la Tierra.

La teoría del punto caliente, enunciada por [Wilson \(1963\)](#) al estudiar el archipiélago de Hawái, plantea que la generación de magma se sitúa en un lugar fijo en el manto terrestre y según se desplazan las placas sobre dicho punto se produce una alineación de las islas volcánicas en función del movimiento de la placa respecto al punto caliente (Figura 30). Según esta teoría la isla más alejada del punto caliente será la más antigua y el volcanismo histórico tendrá una clara alineación. Esto explicaría la alineación de las islas y su evolución temporal, sin embargo presenta un conjunto de inconvenientes:

- La progresión de las edades de las formaciones emergidas más antiguas no se corresponde con el desplazamiento de la placa Africana.
- La existencia de volcanismo histórico en los extremos del archipiélago (El Hierro y Lanzarote) es incompatible con el modelo de punto caliente.
- No se conoce la ubicación exacta del punto caliente.
- Existen hiatos en la actividad eruptiva en cada isla.
- Ausencia de una anomalía gravimétrica positiva.
- Baja producción de magma en comparación con Hawái.
- Gran variedad geoquímica y petrológica a diferencia de Hawái.
- Afloramiento de los complejos basales en ambos extremos de la alineación.

[Hoernle y Schmincke \(1993\)](#) propusieron un nuevo modelo para intentar dar solución a los inconvenientes de la teoría del punto caliente. En su modelo proponen la existencia de una pluma inclinada hacia el Este (dirección del movimiento de la placa), formada por “ampollas” de magma. Así se ampliaría el

área sujeta a actividad en superficie hasta unos 600 km de largo y 200 km de ancho, explicando la existencia de actividad simultánea en ambos extremos del archipiélago y la existencia de hiatos en la actividad volcánica de las islas. Del tamaño de cada ampolla (siempre menor de 100 km de diámetro) dependerá la duración y actividad de cada ciclo activo (Figura 31). El problema con este modelo es que no explica la causa de la inclinación de la pluma respecto al continente, que además es contraria a la inclinación de la pluma de Hawái. Tampoco explica la etapa de formación de las islas ni su sucesión temporal.

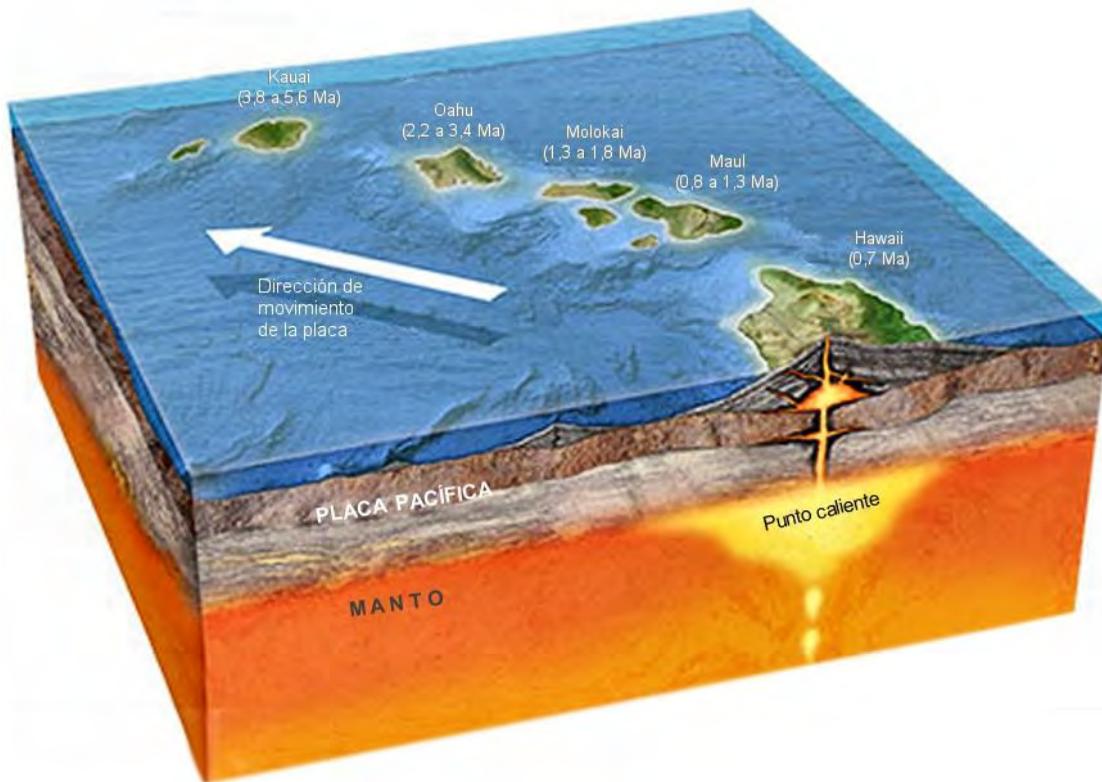


Figura 30. Esquema de un punto caliente (modificado de [www.smithsonian.com](http://www.smithsonian.com)).

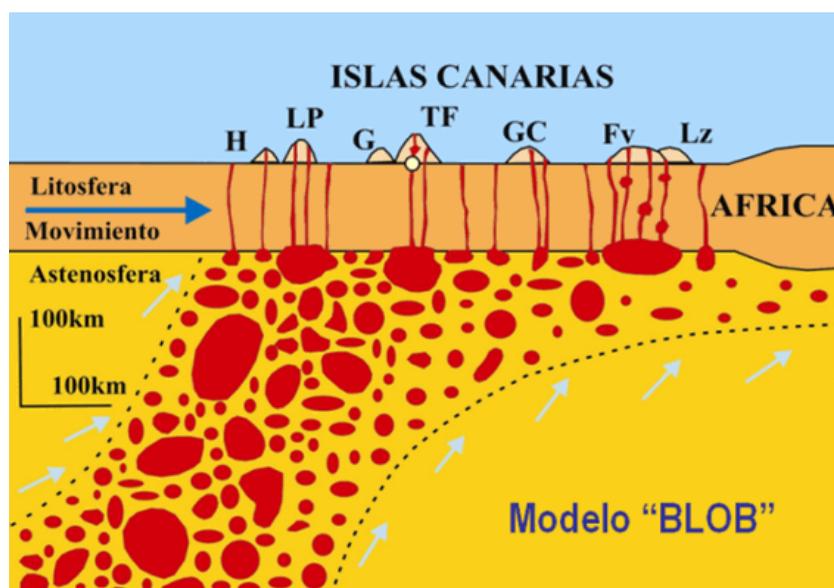


Figura 31. Modelo de "Blob" o ampollas de material mantélico profundo para la génesis de las Islas Canarias (modificado de Hoernle y Schmincke, 1993).

Otra teoría relacionada con el punto caliente es la mega-pluma en forma de bisagra (Oyarzun et al., 1997). Se trataría de una pluma de gran duración y extensión (Figura 32). Esta teoría surge a partir de la detección de una anomalía térmica mediante tomografía sísmica que abarca una amplia superficie del Atlántico en la zona de Canarias, el noroeste de África e incluso la zona occidental de Europa. Según esta teoría, esta pluma en su etapa inicial de apertura del Atlántico dio lugar a magmatismo toleítico pasando a magmatismo alcalino durante el Cretácico. Esta pluma se canalizó en dirección N-NE mediante la emisión de un vector sublitosférico que se prolonga desde Canarias y Cabo Verde hasta el centro de Europa, más allá del Macizo de Bohemia, originando los magmatismos peninsulares (Cartagena, Campos de Calatrava y Gerona) y centroeuropeos. Esta teoría tiene una connotación claramente tectónica aunque se apoye en el punto caliente. Canarias y Cabo Verde se ubican, según esta teoría, en la zona de alimentación de la mega-pluma, donde tiene lugar el ascenso de material mantélico profundo.

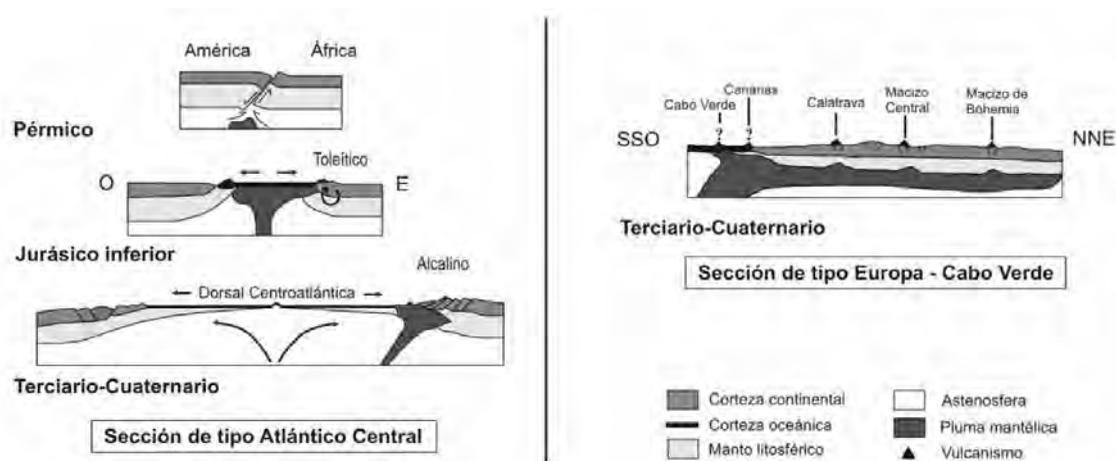


Figura 32. Modelo de “bisagra” (modificado de Oyarzun et al., 1997).

Algunos autores, como Carracedo (2011), explican la existencia de vulcanismo histórico en varias islas sin seguir una lineación temporal, basándose en la teoría de King (2007). King propuso un esquema basado en las corrientes de convección inducidas en los bordes continentales por la diferencia de temperatura entre la astenosfera y el cratón. Estas corrientes de *convección de borde inducida* (Figura 33) son las que arrastrarían el magma del punto caliente activo hacia las islas más alejadas, facilitando la persistencia del vulcanismo en las islas más antiguas. Esto, unido a las diferencias de rigidez, edad y velocidad de movimiento de la litosfera entre Canarias y Hawái explicarían la mayor persistencia del vulcanismo en Canarias y la ausencia de una protuberancia en la barimetría. Además, la pluma mantélica que alimenta a las Islas Canarias es de menor magnitud, por lo que las aportaciones de magma son menores y la ubicación en un borde continental con escasa subsidencia justificaría las diferencias entre Hawái y Canarias.

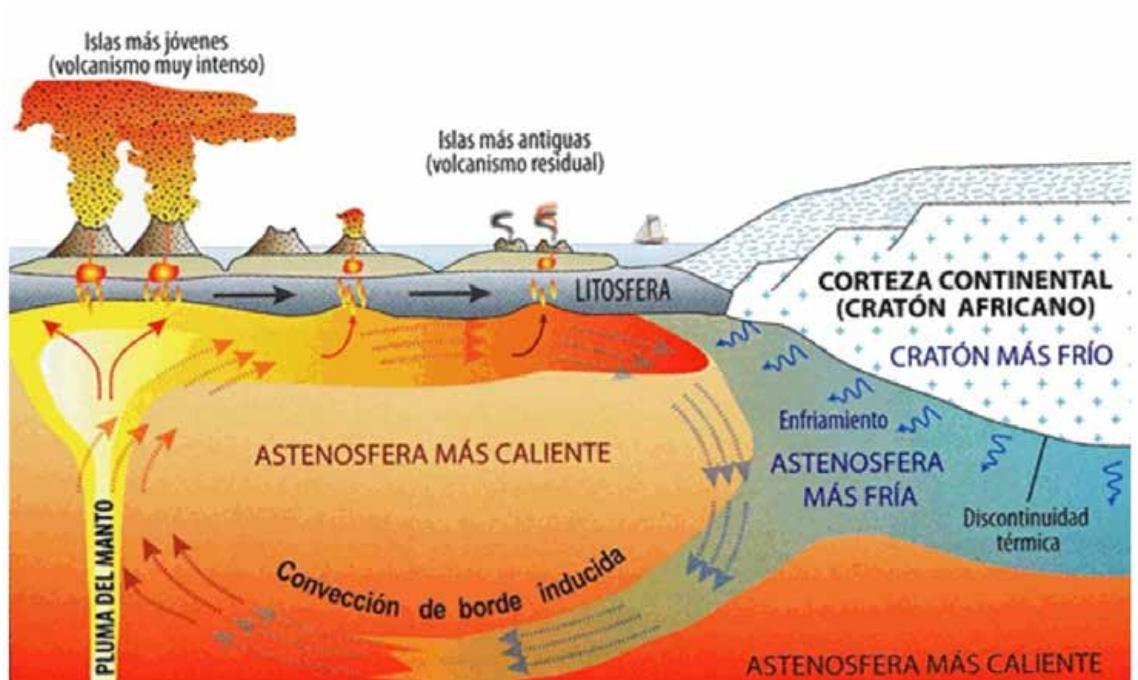


Figura 33. Interpretación de Carracedo, (2011) del modelo de convección de borde inducida propuesto por King (2007).

### 3.4.2. Teorías tectónicas

Coexistiendo con los modelos anteriores, surgen una serie de teorías que tratan de explicar el origen de las Islas Canarias basándose fundamentalmente en las alineaciones de centros de emisión e incluso en las alineaciones de algunas islas y su similitud con las alineaciones existentes en la región del Atlas africano.

La teoría de la fractura propagante, de Anguita y Hernán (1975), está basada en ideas de autores que ya habían establecido una conexión entre las Islas Canarias y el NO Africano. La teoría se fundamenta en la existencia de una mega-fractura de desgarre que interconecta las Islas Canarias y el NO Africano (Figura 34) y que se explica como una prolongación de la falla transcurrente del Sur del Atlas, cuya fracturación se habría ido repitiendo en el tiempo en forma de pulsos, extendiéndose en fases sobre el fondo oceánico, relacionándose así los pulsos orogénicos en el Atlas con los ciclos de gran actividad volcánica.

Esta teoría no explica correctamente la existencia de raíces profundas del volcanismo, expuestas hoy a cientos de metros sobre el nivel del mar, algo difícil de entender si no se piensa en el levantamiento de los bloques insulares. El mayor inconveniente de este modelo es la ausencia de fallas cenozoicas en la zona situada entre Canarias y el extremo de la falla Sur del Atlas.

La presencia en superficie de las raíces profundas del vulcanismo en algunas islas, como Fuerteventura, La Gomera y La Palma, llevó a [Araña y Ortiz \(1991\)](#) a suponer la existencia de una tectónica compresiva, que sería la causante del magmatismo de las islas y del levantamiento de los bloques (teoría del levantamiento de bloques de [Araña y Ortiz, 1986, 1991](#); Figura 35). Según la teoría de bloques, la historia geológica comenzaría con una fase pre-terciaria donde el magmatismo se relacionaría con la apertura del rift meso-Atlántico. En el terciario se produciría el choque entre la Placa Africana y la Placa Europea lo que provocaría la individualización en bloques en Canarias como consecuencia de las prolongaciones de los sistemas de fracturación. El levantamiento de los diferentes bloques se debería a la compresión ejercida en la colisión como efecto del empuje ejercido por la creación de la nueva litosfera del rift. Este ascenso de los bloques por compresión conlleva un engrosamiento y un acortamiento cortical, así como una descompresión en la base de la litosfera que desencadenaría la generación de magmas que se drenarían a favor de dichos sistemas de fracturas.

Aunque esta teoría explica la sismicidad y la presencia de formaciones de la fase submarina hoy emergidas, este modelo no aporta una idea convincente sobre la génesis de los magmas, ni sobre su distribución espacial y temporal, ya que la actividad volcánica coincidiría con los periodos especialmente compresivos.

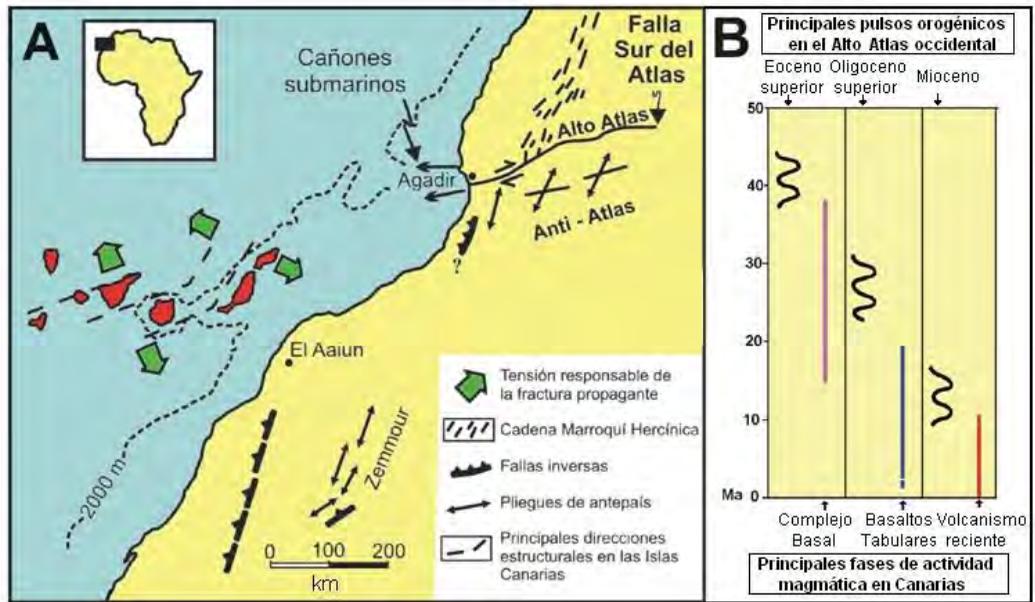


Figura 34. Modelo de la fractura propagante de Anguita y Hernán (1975) A) Directrices estructurales atlánticas y B) Actividad magmática en Canarias.

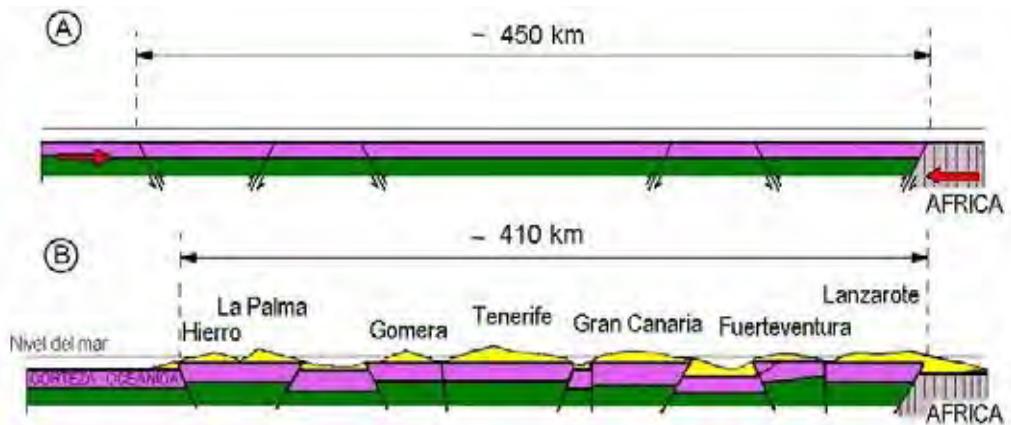


Figura 35. Modelo de acortamiento cortical por ascenso tectónico de bloques de Araña y Ortiz (1991).

Anguita y Hernán (2000) propusieron una teoría conocida como “modelo unificador”, que trata de integrar los aspectos más positivos de los modelos anteriores, apoyándose en los siguientes aspectos:

- Ausencia de un abultamiento batimétrico y gravimétrico característico de otros puntos calientes, ausencia de evidencias de un recalentamiento de la corteza, ausencia de una anomalía térmica sublitosférica con raíz profunda (la existencia de la anomalía térmica sublitosférica sí está demostrada por [Hoernle et al., 1993](#), pero no que tenga raíz).
- Los datos isotópicos muestran un origen múltiple de los magmas a partir de diversos componentes de manto primitivo astenosférico, enriquecido y empobrecido.
- Importantes similitudes con el Atlas de los rasgos tectónicos identificados en las islas y en el fondo marino (como la sucesión de esfuerzos compresivos y tensionales deducidos por la deformación existente de las rocas de fase submarina de crecimiento de Fuerteventura, la falla transcurrente entre Tenerife y Gran Canaria o las probables estructuras de origen transpresivo en Lanzarote).
- Similitudes con el Atlas en cuanto a tipos geoquímicos de volcanismo, incluyendo algunos relativamente escasos como los carbonatíticos y los comendríticos.

Con todos estos datos, Anguita y Hernán interpretan que la anomalía sublitosférica (en forma de capa en una zona extensa que va desde Canarias hasta el Atlas africano) representa el residuo de una antigua pluma partícipe de la apertura del Atlántico durante el Triásico, pero que actualmente está en fase terminal como consecuencia del agotamiento del foco de alimentación, conservando únicamente un vestigio laminar desarraigado (Figura 36).

Esta teoría hace hincapié en la alternancia de periodos de compresión en el Atlas seguidos de distensión ligada a magmatismo en Canarias, explicando la evidente elevación de las islas mediante una tectónica en flor originada en un régimen transpresivo que, en opinión de diversos autores, es el tipo de tectónica que produjo la elevación de la cordillera del Atlas, posiblemente ya desde el Cretácico. Este modelo reconoce el origen del volcanismo por una pluma mantélica, aunque al no estar enraizada no conserva los rasgos geoquímicos ni geofísicos característicos de una pluma "viva"; y a su vez, toma la idea del drenado de los magmas cuando se produce distensión, de la teoría de la fractura propagante. Además toma la idea de la teoría del ascenso de los bloques, aunque cambia el régimen de esfuerzos, que no serían sólo compresivos, sino también transcurrentes.

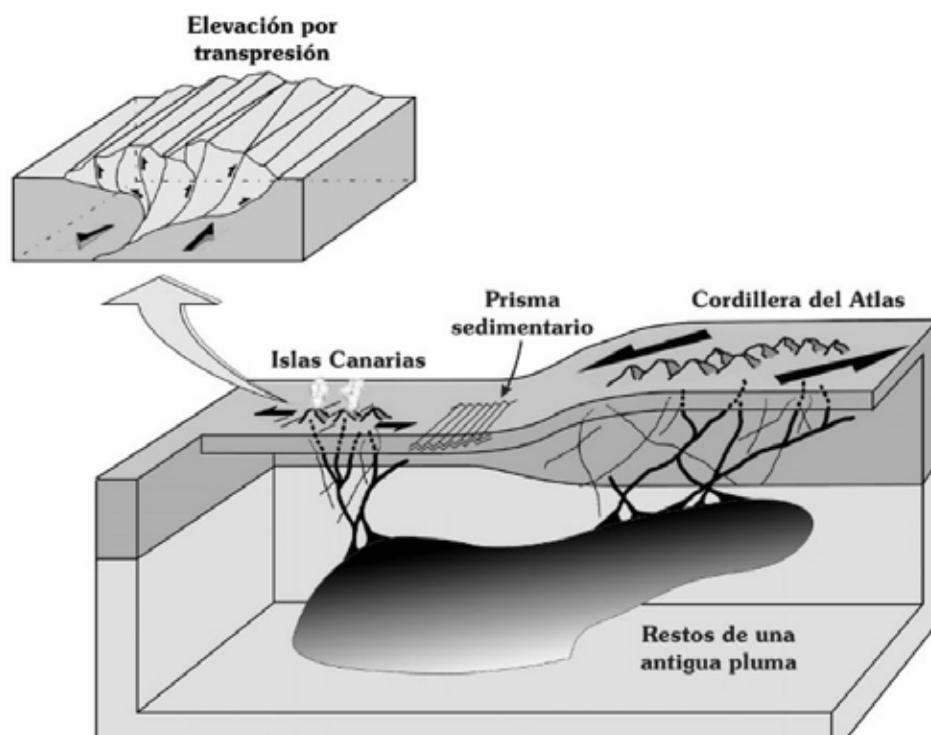


Figura 36. Esquema resumen del modelo unificador sobre el origen de las Islas Canarias de Anguita y Hernán (2000).

### 3.5. La formación de las islas en Canarias

El diferente desarrollo de cada isla hace que sea difícil establecer un modelo general válido para todas ellas aunque sí pueden resumirse dos etapas comunes, por una parte la fase de crecimiento submarino y los Complejos Basales; y por otra parte las fases del crecimiento subaéreo.

#### 3.5.1. Fases submarinas y complejos basales

La primera fase de construcción de toda isla volcánica, es la fase de construcción submarina y es la más importante en cuanto a material emitido, aunque también es la más desconocida porque no suele aflorar. En Canarias aflora en tres de las islas (Fuerteventura, La Gomera y La Palma). Las secuencias submarinas están formadas por lavas submarinas, hialoclastitas, brechas submarinas y sedimentos marinos.

Las rocas generadas en la fase submarina forman lo que comúnmente se denominan complejos basales, unidades litológicas muy variadas en cuanto a los materiales que las forman (rocas volcánicas, sedimentos, rocas plutónicas, enjambres filonianos) y de estructura complicada (Figura 37).

Dependiendo de cada isla, el complejo basal es muy diferente. En la isla de La Palma afloran rocas submarinas, aunque hay diques de edades muy posteriores. En el de Fuerteventura, afloran sedimentos del fondo oceánico anteriores a la formación de la isla, así como materiales volcánicos de la fase de crecimiento submarina, materiales de la fase de emersión de la isla y de las principales fases de crecimiento subaéreo; todo ello entre una sucesión de eventos intrusivos y filonianos que acompañan a las diferentes fases de crecimiento volcánico de los edificios submarinos y subaéreos. En la Gomera, el complejo basal está representado por una fase de crecimiento fundamentalmente submarina y está separado de los materiales de las principales fases de crecimiento subaéreo que forman la isla, por una importante discordancia (asociada a una supuesta ausencia de actividad volcánica).

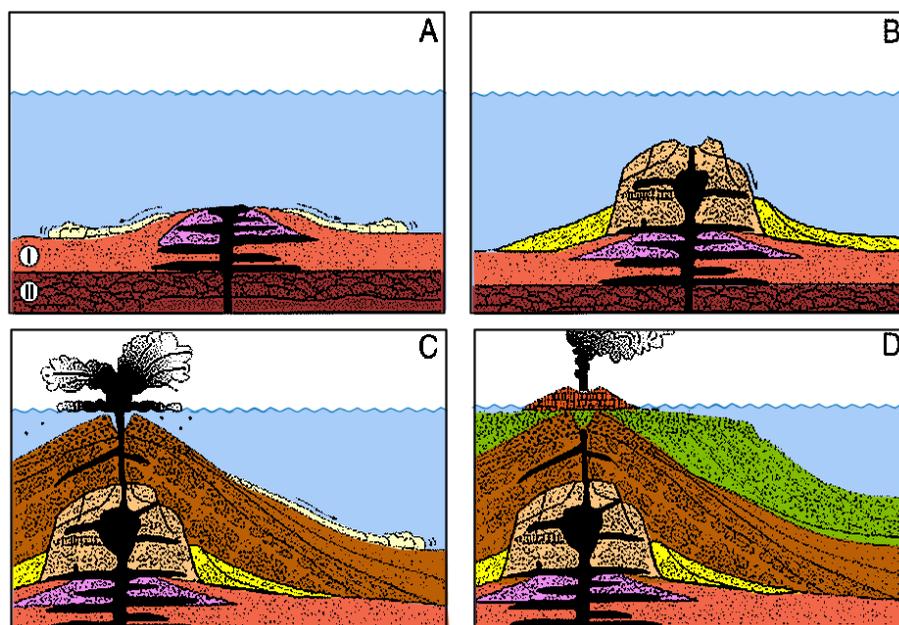


Figura 37. Crecimiento de una isla volcánica oceánica basada en la formación de la isla de La Palma (modificado de Staudigel y Schmincke, 1984).

### 3.5.2. Fases de crecimiento subaéreo

El crecimiento subaéreo de las islas suele dar lugar a la formación de un gran edificio volcánico formado por acumulación de centenares de metros de materiales, esencialmente basálticos y lávicos. Esta fase suele llamarse fase de escudo por la correspondencia con Hawái, aunque no es del todo correcto para algunos casos en Canarias por la complejidad en la formación de las islas, con periodos de construcción y destrucción prolongados en el tiempo.

Estos edificios, que son la principal unidad de las islas, se denominan “Edificios Antiguos”. En algunas islas como Gran Canaria o La Gomera, son edificios únicos que han pasado por varias fases de crecimiento, ahora bien, con un desarrollo muy distinto, relativamente rápido (Gran Canaria) o de millones de años (La Gomera). En otras islas existen varios edificios que han tenido evoluciones independientes y que reciben nombres locales.

En las islas más jóvenes (La Palma y El Hierro) el modelo de crecimiento se parece más al modelo de Hawái. Esto puede deberse a que aún no ha transcurrido el tiempo necesario para que tengan un desarrollo similar al de las islas más viejas. En estos casos no parece apropiado denominarlos edificios antiguos, sin embargo, su significado es el mismo que en las islas de mayor edad, pues dentro de su juventud, presentan la misma complejidad evolutiva con múltiples episodios de crecimiento y de destrucción.

Aunque la morfología más frecuente de estos edificios basálticos es la de grandes volcanes circulares, hay casos de edificios de tipo “dorsal” compuestos por decenas o centenas de conos volcánicos alineados. Estos edificios tienen una clara estructura lineal simple (Dorsal de Cumbre Vieja en La Palma) o triple (Tenerife o El Hierro).

En las islas de Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria y La Gomera, tras la fase de construcción en escudo, hubo un periodo de larga duración (miles de años) en el cual la actividad volcánica fue mínima o inexistente. Tras dicho periodo, la actividad volcánica se reanudó (a excepción de La Gomera) manteniéndose así hasta la actualidad. En general este volcanismo es básico y de carácter disperso.

En las islas de Gran Canaria y Tenerife, destaca la existencia de episodios excepcionales de actividad volcánica, donde los productos más evolucionados

(traquitas, fonolitas y riolitas) fueron mucho más frecuentes, dando lugar a grandes estratovolcanes.

Excepto la Gomera, todas las islas son activas y han tenido erupciones en época histórica o subhistórica. Estas erupciones han sido de composición esencialmente básica y poco explosiva.

### **3.5.3. Evolución de la actividad volcánica en Canarias**

La actividad volcánica en el archipiélago canario se inicia en la dorsal oriental canaria, siendo la unidad más antigua de edad oligocena que aflora en el complejo basal de Fuerteventura y que presenta materiales similares a los que se han obtenido de un sondeo profundo en Lanzarote.

La actividad de las islas continúa en Fuerteventura con los episodios que van formando el complejo basal hasta que en el tránsito Oligoceno-Mioceno inferior se produce la emersión de la isla con la aparición de abundante material hidromagmático, formando la Unidad Transicional (Figura 38). En el Mioceno inferior, los principales edificios de Fuerteventura ya han emergido o están en proceso de emersión, mientras que en La Gomera ya está creciendo el edificio submarino.

En el Mioceno se produce la mayor emisión de productos volcánicos en la historia de Canarias formándose los tres edificios antiguos de Fuerteventura, el edificio de Ajaches en Lanzarote, el Banco de la Concepción ([Geldmacher et al., 2001](#)), el Edificio Amanay y posiblemente El Banquete. En Gran Canaria se forma el edificio basáltico en un corto periodo de tiempo y se inicia a continuación el volcanismo sálico. Además continúa el crecimiento de La Gomera.

En el Mioceno superior la actividad se desplaza desapareciendo en gran medida de la parte Sur de la dorsal oriental de la isla y migrando hacia al Norte de Lanzarote formándose el Edificio de Famara. En Gran Canaria continúa la actividad sálica hasta los 8 Ma que se produce una interrupción que dura hasta los 3 Ma. Además es en esta etapa cuando se forman los grandes edificios basálticos de Tenerife, cuya máxima actividad coincide con la pausa de actividad en Gran Canaria, y en La Gomera se forma el gran Edificio Antigo, esencialmente basáltico, al que acompañan varios episodios sálicos con enjambres de diques cónicos.

Durante el Plioceno inferior continua la actividad volcánica en las mismas islas, dando lugar, entre otras formaciones, al estratovolcán de Roque Nublo en Gran Canaria, al edificio esencialmente basáltico de las Cañadas (Cañadas I) en Tenerife, y al Edificio Reciente en La Gomera, con el cual concluye la actividad volcánica de la isla. Además se inicia la formación del edificio submarino de La Palma.

En el Plioceno superior de Canarias hay ausencia de actividad basáltica reseñable. En las islas orientales hay algunas erupciones en la depresión central de Fuerteventura. En Gran Canaria se inician las erupciones pliocuaternarias de la mitad nororiental de la isla. Mientras tanto, en Tenerife la actividad se concentra en la formación del Edificio Cañadas II y la emisión de las primeras unidades ignimbríticas en el N y O de la isla.

En el Pleistoceno inferior la actividad continúa de forma similar a la del Plioceno superior en las islas de Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife. Mientras en Lanzarote se forman numerosos centros de emisión basálticos alineados en dirección NE-SO entre los dos edificios antiguos, dando lugar a la Dorsal Central, cuya actividad ha continuado hasta la actualidad. Además se forman las islas de La Palma con su Edificio Norte y El Hierro con sus Edificios Antiguos.

La actividad volcánica en Canarias no ha cambiado notablemente desde el Pleistoceno Superior hasta la actualidad. En Lanzarote continúa la tendencia del Pleistoceno inferior, que mantiene una importante actividad basáltica en la zona centro y norte de la isla; en Fuerteventura hay una actividad basáltica menor en el centro y norte de la isla; en Gran Canaria hay algo de actividad dispersa en el noreste de la isla; y La Gomera permanece inactiva. Tenerife, sin embargo, se muestra muy activa en este periodo, formándose el Edificio Cañadas III con sus importantes fases explosivas y el Edificio Dorsal (NE). Tras la formación de la Caldera de Las Cañadas se forma el Edificio Teide-Pico Viejo y prosigue la actividad basáltica por toda la isla. También cabe destacar la importancia de la actividad basáltica en las dorsales de la isla de El Hierro y en la Dorsal de Cumbre Vieja en La Palma.

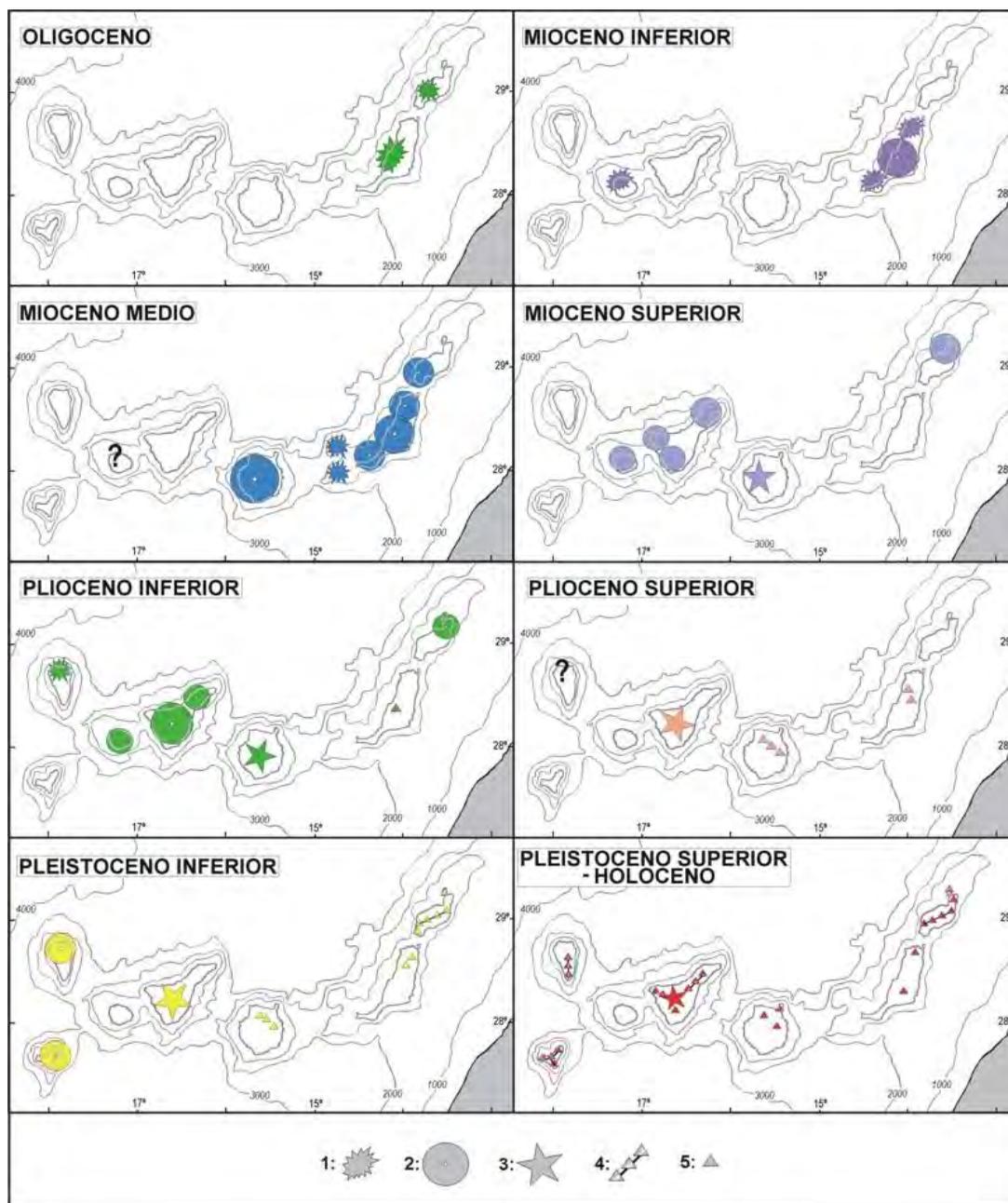


Figura 38. Esquema de la evolución de las Islas Canarias. 1: Fases iniciales de crecimiento, esencialmente submarinas. 2: Grandes edificios basálticos. 3: Grandes edificios con materiales sálicos; estratovolcanes. 4: Edificios de tipo dorsal. 5: Actividad volcánica monogenética dispersa (Vera, 2004).

### 3.5.4. Grandes deslizamientos

La presencia de grandes deslizamientos en todas las islas volcánicas, y en especial en las Islas Canarias, ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años. Estos estudios son fundamentales para comprender la geomorfología actual de las islas. Entre los trabajos pioneros destaca el de [Bravo \(1962\)](#) en el que supone que el Valle de La Orotava ha podido formarse como consecuencia de deslizamientos. Este estudio ha sido la base para otros estudios, como el de [Navarro y Coello \(1989\)](#) donde se propone que las grandes depresiones de Tenerife se han formado como consecuencia de grandes deslizamientos.

Estas teorías se confirmaron en 1991 por [Holcomb y Searle](#) cuando reconocieron en el fondo marino de El Hierro la existencia de grandes depósitos formados en un deslizamiento que sería el causante de la morfología arqueada de El Julán.

Ulteriores estudios de este tipo, tanto en superficie como en el fondo oceánico, han puesto de manifiesto los deslizamientos existentes en cada una de las islas (Figura 39).

En El Hierro se han distinguido tres grandes sectores con deslizamientos. En el SO el de El Julán; en el SE el de Tiñor (o Las Playas) que pudo haberse producido en dos ocasiones (San Andrés y Las Playas); y en el N el de El Golfo, sin duda el más importante y al cual se ha asociado la formación del “debris flow de Canarias” que afectó a un área de 40.000 km<sup>2</sup> (Figura 40).

En La Palma, [Urgéles et al. \(1999\)](#) y [Masson et al. \(2002\)](#) proponen que, tanto la Caldera de Taburiente como el arco de Cumbre Nueva, han sido causados por grandes deslizamientos y sus huellas han sido reconocidas en el fondo marino como Avalanchas de Playa de la Veta y Cumbre Nueva. Además [Masson et al. \(2002\)](#) sugieren la existencia de otro episodio de deslizamiento (Avalancha de Santa Cruz) cuyos restos no son observables en superficie (Figura 41).

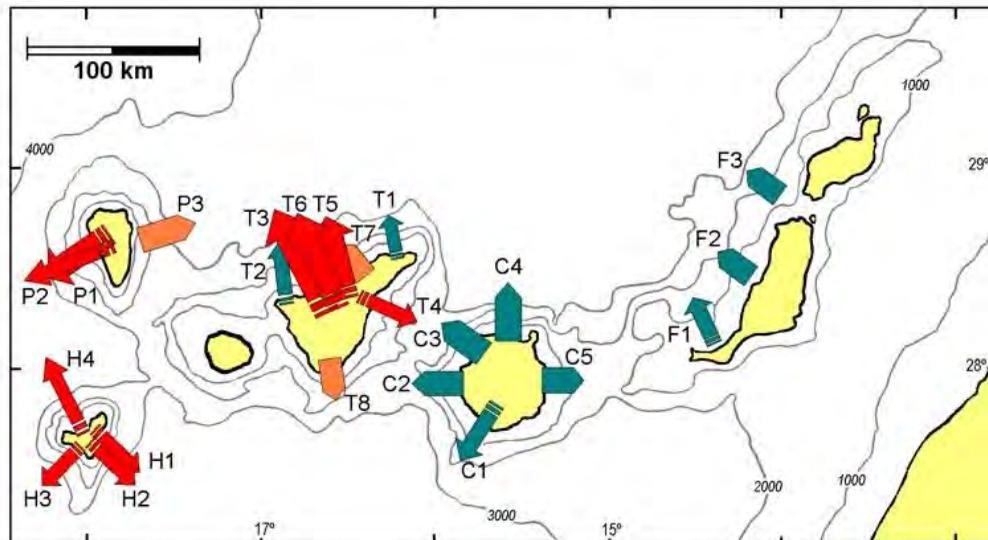


Figura 39. Principales de deslizamientos propuestos en las Islas Canarias. Las flechas gruesas corresponden a episodios menos comprobados (Vera, 2004).

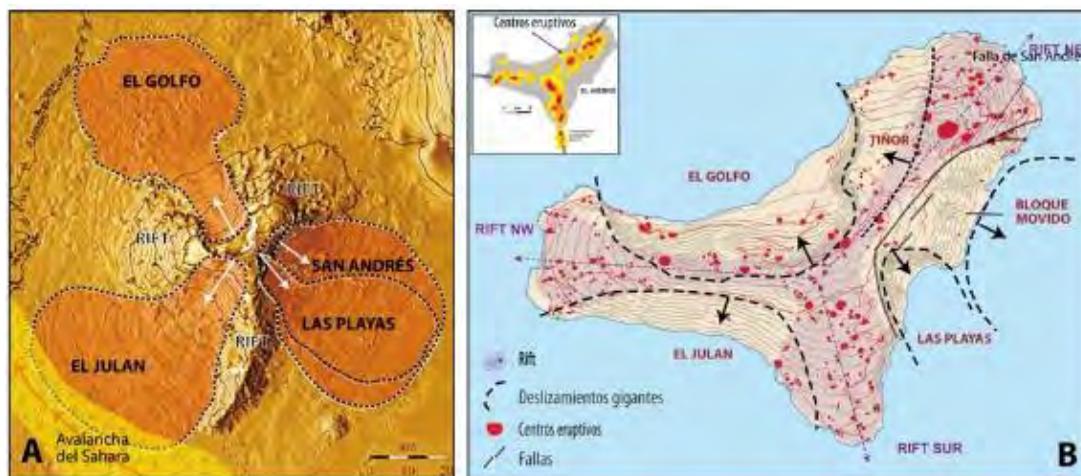


Figura 40. A) imagen de la batimetría y la topográfica de El Hierro mostrando un edificio en forma de tetraedro con aristas agudas y flancos de acusadas pendientes, y los lados arqueados formando ensenadas tapizadas con productos de avalancha. En B) se observa un esquema estructural de El Hierro donde se asocian las aristas a rifts y las ensenadas a megadeslizamientos. La concentración de los centros eruptivos se da en los ejes de los rifts (Carracedo et al., 2009).

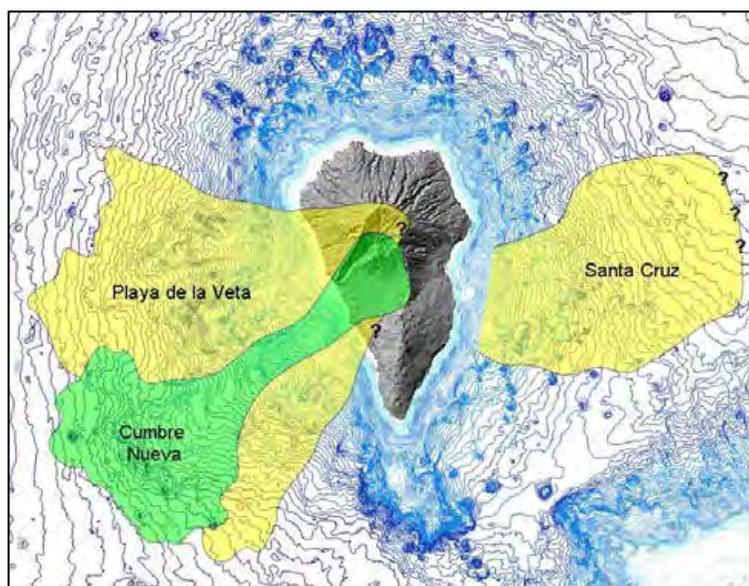


Figura 41. Grandes deslizamientos en La Palma (Modificado de Anguita, 2002; batimetrías de REDMIC; MDS derivado del MDT05 del IGN).

En Tenerife los episodios más reconocibles fueron propuestos por Navarro y Coello (1989), datados por Ancochea et al. (1990) e identificadas bajo el mar por Watts y Masson (1995) y Teide Group (1997). Además de los deslizamientos de Güímar, La Orotava e Icod, algunos autores han propuesto la existencia de deslizamientos anteriores en los edificios antiguos de Anaga y Teno como en el edificio Cañadas (deslizamientos de Tigaiga y de Roques García). Además se ha propuesto un deslizamiento paralelo al de La Orotava en el Edificio Dorsal (deslizamiento de la Dorsal Oriental) y otro al sur de la isla conocido como el deslizamiento de las Bandas del Sur.

En Gran Canaria sobresale el deslizamiento del Roque Nublo, de edad Pliocena, y reconocido tanto en tierra como en el mar por numerosos autores. Schmincke y Sumita (1998) proponen tres grandes episodios miocenos, y es posible que existan otros tres durante la emisión de la formación Fataga.

En Fuerteventura, Stillman (1999) señala que los grandes deslizamientos han sido la principal causa de la destrucción de los grandes edificios. Ancochea et al. (1993, 1996) proponen que un gran deslizamiento hacia el norte originaría la Península de Jandia (en el sur de la isla) y además sugiere la posible existencia de

otros grandes deslizamientos hacia el oeste del Edificio Central y en el monte submarino de Amanay.

La mayoría de los deslizamientos han cubierto áreas superiores a los 700 km<sup>2</sup> y con volúmenes muy variables de material (entre 25 y 1.000 km<sup>3</sup>), alcanzando distancias en el mar de hasta 130 km. En estas estimaciones es posible que haya deslizamientos aún más antiguos pero cuyas evidencias resulten difíciles de obtener como consecuencia de la erosión y por estar cubiertos de sedimentos o materiales volcánicos más modernos. Aun así, se han propuesto algunos en Tenerife, Gran Canaria y Fuerteventura y no se descarta que algunas de las morfologías en forma de arco de los edificios miocenos puedan ser reflejo de otros grandes deslizamientos. Urgelés et al. (1997) y Krastel et al. (2001) calculan que la frecuencia de un gran deslizamiento es del orden de 125.000 a 170.000 años de periodo de retorno.

## 4. Estudio de inundaciones

### 4.1. Introducción

Las inundaciones son el proceso natural que más daños causa en términos generales (Díez et al., 2008) y también afecta a las Islas Canarias causando importantes pérdidas económicas, alcanzando un valor indemnizado total acumulado, no actualizado, de 71,39 millones de euros entre 1999 y 2011 (según las BBDD de siniestralidades del Consorcio de Compensación de Seguros), equivalente a 7,23 millones de euros al año (actualizando valores a febrero de 2012).

Este hecho hace que existan muy diversos métodos de estudio del fenómeno de la inundabilidad (Figura 42), que raramente se utilizan de forma combinada, más bien se suelen emplear diferentes métodos para evaluar el grado de aproximación o incertidumbre entre unos y otros (Fernández Betancourt et al., 2009) sin que en ningún caso un método termine por invalidar otros métodos (Figura 43). Una de las principales razones para encontrar diferencias de hasta más del 40% en la aplicación de unos métodos y otros es lo complejo que resulta eliminar la subjetividad en la selección de los parámetros que intervienen (Tabla 8).

Tabla 8. Comparación de resultados según distintos métodos para Gran Canaria, en CIAGC (1998). La ubicación de las cuencas se puede observar en la Figura 43.

Cuenca	Racional m <sup>3</sup> /s	Isócronas m <sup>3</sup> /s	Racional vs Isócronas (%)
Guinguada	394,42	518,7	23,96
Telde	376,77	544,1	30,75
Guayadeque	93,3	116,1	19,64
Tirajana	488,65	763,2	35,97
Arguineguín	523,34	858,5	39,04
Mogán	176,18	265,3	33,59
La aldea	792,93	1175,8	32,56
Agaete	266,97	358,3	25,49
Moya	194,46	259,7	25,12
Azuaje	279,3	355	21,32
Tenoya	231,38	296,6	21,99
Maspalomas	508,1	875,9	41,99

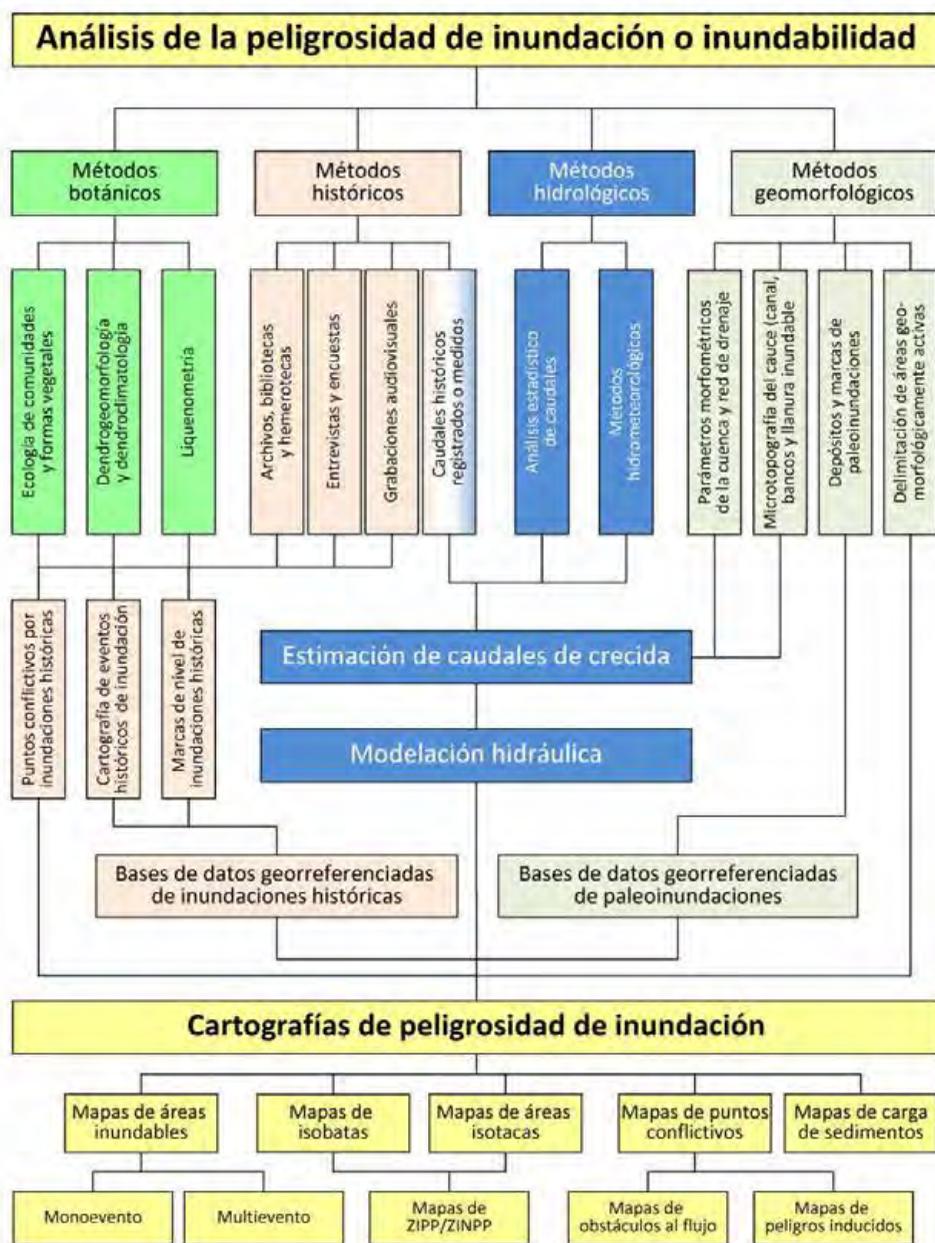


Figura 42. Métodos de análisis de la peligrosidad de inundación (simplificado de Díez et al., 2008).

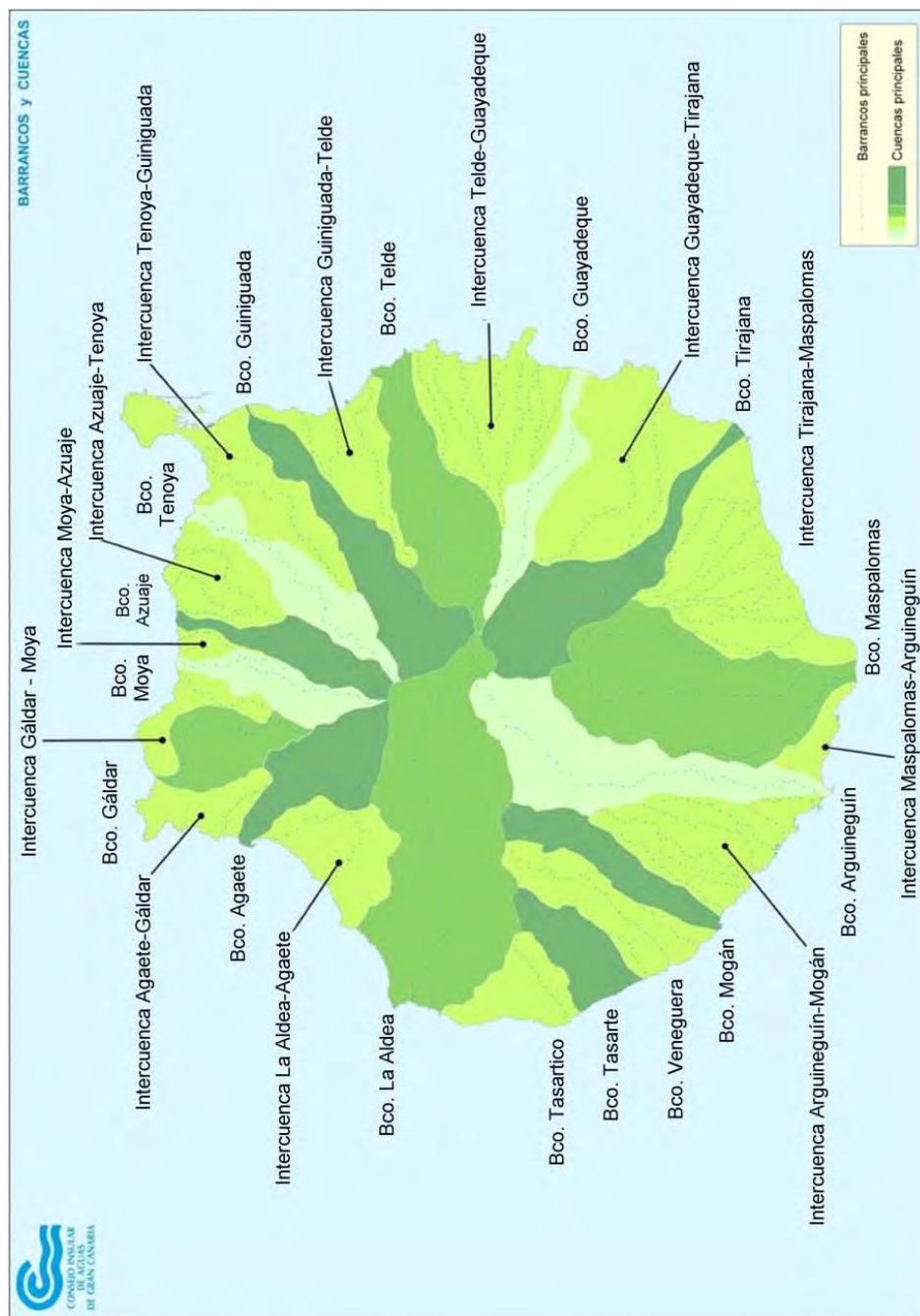


Figura 43. Principales cuencas y barrancos según el Plan Hidrológico de Gran Canaria (CIAGC, 2009).

Los métodos de estudio de los peligros naturales están altamente influenciados por la escala del estudio, la disponibilidad de datos y en general por el tiempo y el presupuesto destinado a entender la dinámica del proceso. En este sentido existen algunas recomendaciones, surgidas de la puesta en práctica de distintos estudios, que reflejan esta aseveración (Ruiz et al., 2008, Figura 44).

			Rangos de escalas habituales →						
			>1/1.000	1/5.000	1/10.000	1/25.000	1/50.000	1/100.000	>1/200.000
Ámbito de aplicación	Ordenación territorial	Plan Especial							
		Plan Parcial de Ordenación Territorial							
		Plan General de Ordenación Territorial							
		Directriz de Ordenación Territorial							
		Plan Provincial							
		Plan Autonómico							
	Planes de protección civil	Actuaciones de Ámbito Local							
		Autonómico							
		Estatal							
	Seguros	Compañías aseguradoras							
Consorcio de Compensación de Seguros									
Métodos de análisis de la peligrosidad	Modelación hidrológica	Análisis Estadístico de Caudales							
		Métodos hidrometeorológicos							
	Modelos hidráulicos	Flujo unidimensional							
		Flujo bidimensional							
	Métodos geológicos y geomorfológicos								
	Análisis multivariable (SIG)								
	Históricos y paleohidrológicos	Regionales y Locales							
		BBDD históricas y paleo-inundaciones							
Elementos a presentar	Dimensión espacial	Zonas inundables por periodos de retorno							
		Zonas inundables en eventos pretéritos							
	Variables del flujo	Isobatas							
		Isotacas							
	Elementos asociados	Puntos conflictivos							
		Peligros asociados							
		Transporte de sedimentos							
	Dimensión temporal	Permanencia							
		Tiempos característicos							

Figura 44. Escalas de trabajo habituales según el ámbito de aplicación, los métodos de análisis y los elementos a representar (modificado de Ruiz et al., 2008).

Para un estudio como el del presente trabajo, contar con una superficie de inundabilidad previamente delimitada por el método más preciso posible hubiera sido deseable. Sin embargo, no existe hasta la fecha tal cartografía, motivo por el que resulta necesario establecer un método que resuelva de modo eficaz esta carencia. Modelar siguiendo métodos muy precisos conduce a un incremento muy significativo del tiempo y presupuesto del proyecto (varios órdenes de magnitud), motivo por el que se ha optado por la aplicación conjunta de tres líneas metodológicas.

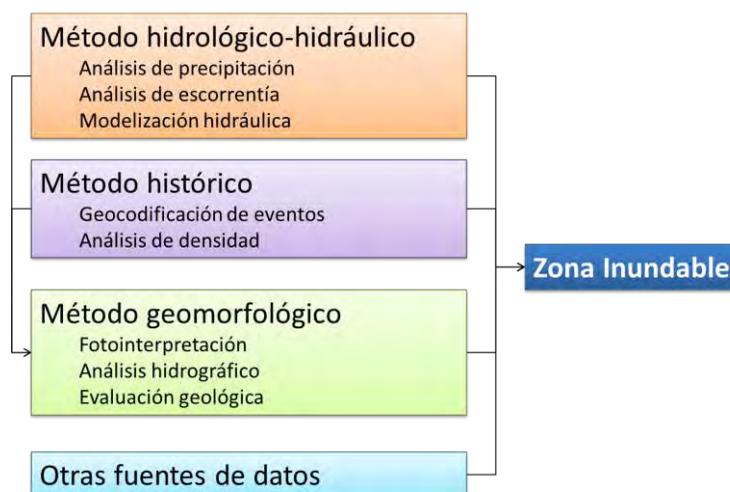


Figura 45. Esquema metodológico empleado para la delimitación de zonas inundables.

En primer lugar se realizó un estudio hidrológico-hidráulico, de modo que se pudiera obtener una primera delineación de zonas inundables con la aplicación del método más ampliamente utilizado en España (y según López Alonso, 2001, posiblemente también uno de los más utilizados en el mundo), recogido en la Instrucción de Carreteras sobre Drenaje Superficial (Instrucción 5.2. IC), el método Racional Modificado de Témez (1991). Este método, a pesar de ser muy ampliamente aceptado, puede plantear una infravaloración de los caudales cuando se dan condiciones de importantes contrastes en las características de la cuenca (López Alonso, 2001). Con los datos de caudal obtenidos por este método, se realizó un análisis hidráulico con las ecuaciones de Manning-Gaukler-Strickler (Ven Te Chow, 1982) implementado de manera masiva para todo el archipiélago y con los resultados, y apoyándose en fotointerpretación e información geológica, se completó la delineación de zonas inundables.

## **4.2. Análisis hidrológico**

El análisis hidrológico para este estudio consta de tres apartados. Por un lado se ha realizado un análisis pluviométrico, después se ha pasado a la regionalización de la variable y comparación con estudios previos para obtener los mapas de precipitación máxima y finalmente se ha realizado un estudio de escorrentía.

### **4.2.1. Estudio pluviométrico**

Para el análisis de precipitaciones máximas en el archipiélago canario se solicitó a la AEMET (Agencia Española de Meteorología) su catálogo de datos completo. Dado que el presente trabajo tiene un objetivo prospectivo general, no se consideró necesario incorporar pluviómetros de otros organismos, algo que resultaría imprescindible para estudios de mayor detalle.

El archivo digital del catálogo se transformó del formato nativo a un formato de hoja de cálculo para su pre-tratamiento y adaptación a las herramientas de análisis al uso..

Del catálogo completo de registros se extrajeron los valores máximos en 24h de cada mes y el máximo anual correspondiente (convertidas las unidades a mm) para conformar el formato de archivo LEMA del programa de análisis CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) del CEDEX (Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Fomento) y para constituir el bruto de archivo para analizar con el resto de herramientas.

Las coordenadas de las estaciones, presentadas originalmente en sistemas de referencia geográfico y ED50-UTM30, se transformaron a coordenadas del sistema ETRS 1989, con proyección en UTM, huso 28, hemisferio Norte, para su adaptación a la cartografía de la IDECAN (Infraestructura de Datos de Canarias, topografía 1/5.000 de 2007-2008).

El catálogo de la AEMET con el que se ha trabajado comprende 907 estaciones pluviométricas, de las cuales 60 pertenecen a la isla de El Hierro; 104 a la isla de La Gomera; 123 a la isla de La Palma; 354 a la isla de Tenerife, 194 a la isla de Gran Canaria; 33 a la isla de Fuerte Ventura; y 37 a la isla de Lanzarote. Los pluviómetros abarcan un periodo de registro medio de 24,3 años, con un máximo intervalo de 104 años (estación C447B, en Tenerife) siendo el último dato de 2011 y el primero de 1906. El número medio de años completos es de 23, y el número

medio de años con al menos un registro es de 35. La estación que más años completos tiene es la C430E en Tenerife, con 82 años en el intervalo de 1919 a 2011. El 44% de las estaciones (402) tienen menos de cuatro años completos (Figura 46). En ese intervalo de tiempo hay 167.768 meses con dato y 52.348 meses sin dato.

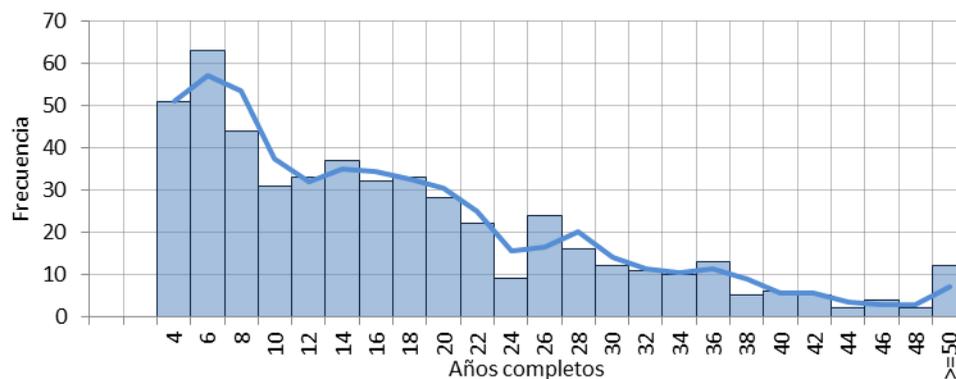


Figura 46. Histograma mostrando el número de estaciones versus el número de años completos, excluidas las clases cero (291) y 2 (111).

La distribución del total de las estaciones en relación a la altitud parece buena, estando menos representadas las elevaciones en el rango de los 70 a los 300 metros y las elevaciones superiores a los 2.200 a 3.500. Considerando tan sólo las estaciones de más de diez años completos, las cotas superiores a 1.800 m parecen infrarrepresentadas (Figura 47 y Figura 48).

El primer paso de análisis de la pluviometría consistió en obtener los momentos más representativos de la muestra en distribución por estaciones, a saber: media, coeficiente de variación, coeficiente de sesgo, tamaño de la muestra (cuántos años cubre cada estación y cuántos de ellos son completos).

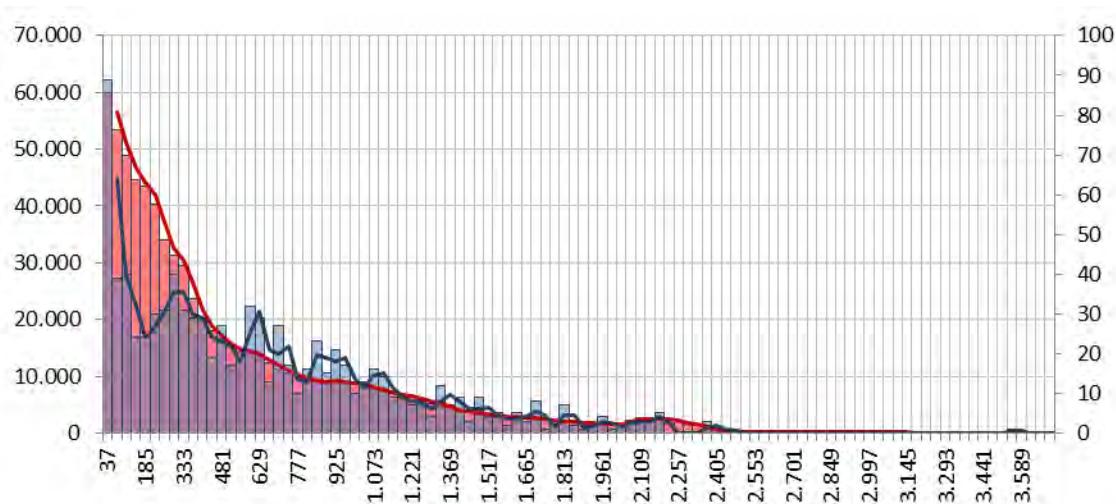


Figura 47. Histograma de las elevaciones del archipiélago canario (en rojo) vs histograma de elevaciones de los pluviómetros del catálogo completo de la AEMET (en azul), agrupados en 100 clases igualmente distribuidas. Los ejes verticales muestran la frecuencia (izquierdo: elevaciones; derecho: pluviómetros), y el horizontal las clases en metros.

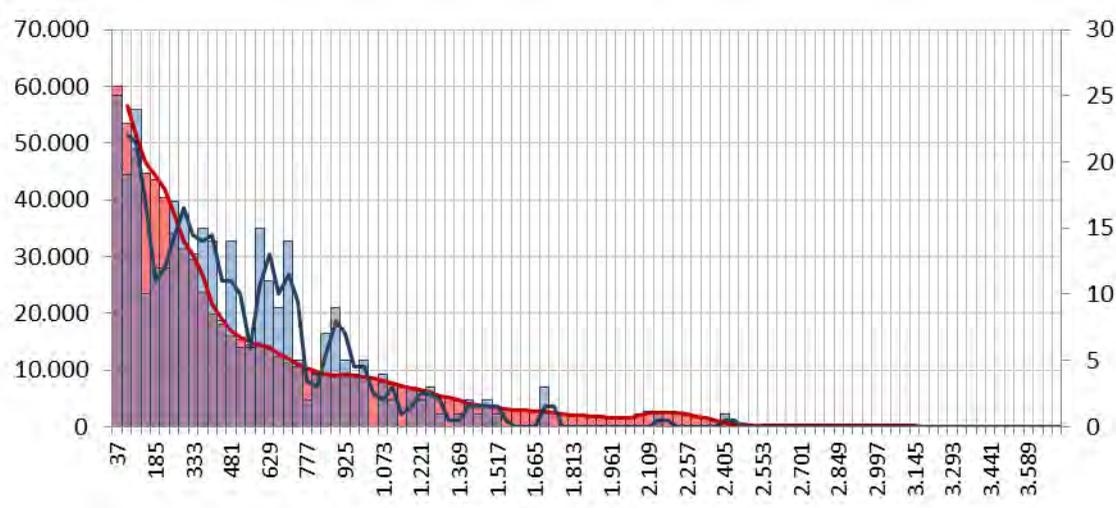


Figura 48. Histograma de las elevaciones del archipiélago canario (en rojo) vs histograma de elevaciones de los pluviómetros con más de 10 años completos de la AEMET (en azul), agrupados en 100 clases igualmente distribuidas. Los ejes verticales muestran la frecuencia (izquierdo: elevaciones; derecho: pluviómetros), y el horizontal las clases en metros.

La distribución de valores máximos del catálogo concentra la ocurrencia de máximos de precipitación en los meses más lluviosos. En concreto, diciembre, enero y febrero aglutinan un 56 % de las ocurrencias, un valor que asciende a un 85% si se añaden los meses de septiembre, octubre y noviembre. El valor medio de los máximos es de casi 50 mm de precipitación, el medio de los máximos por meses es de unos 250 mm, y la media de los mínimos es de poco más de 6 mm (Figura 49, Figura 50 y Tabla 9).

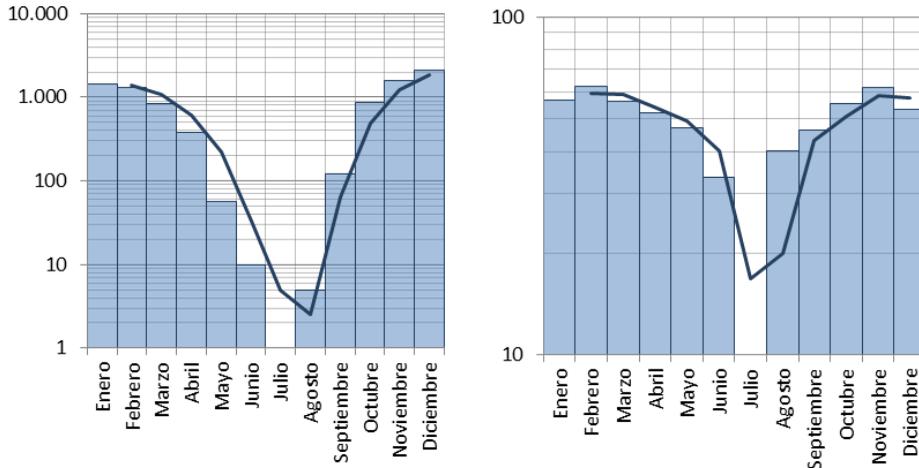


Figura 49. En la izquierda, frecuencia de valores máximos por meses. En la derecha, media de los máximos por meses. En el mes de julio no hubo ningún máximo. La línea sólida representa la media móvil.

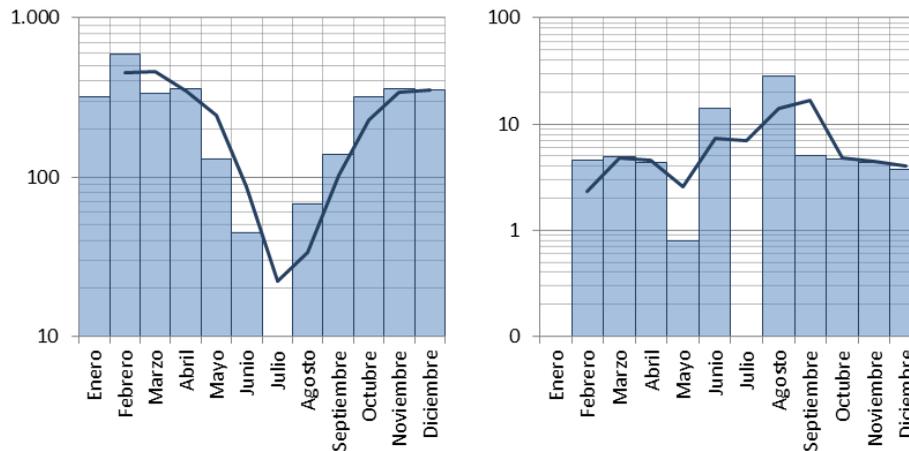


Figura 50. En la izquierda, valores máximos entre los máximos por meses. En la derecha, valores mínimos entre los máximos por meses. La línea sólida representa la media móvil.

Tabla 9. *Tabla de valores máximos por meses.*

Mes	Frecuencia	Máxima de máximos	Media de máximos	Mínima de máximos
Enero	1452	317,50	56,73	0,0
Febrero	1303	590,00	62,18	4,6
Marzo	833	337,00	56,12	4,9
Abril	379	358,90	51,85	4,3
Mayo	57	130,50	46,90	0,8
Junio	10	44,50	33,64	14,0
Julio	0	0,00	0,00	0,0
Agosto	5	67,50	40,02	28,1
Septiembre	123	138,30	46,31	5,0
Octubre	853	321,10	55,37	4,7
Noviembre	1586	360,00	62,04	4,3
Diciembre	2106	350,00	53,31	3,7

Gracias a estos estadísticos se estimó no considerar aquellas estaciones que dispusieran de un intervalo de tiempo de registro menor a la decena de años, de los cuales todos debían estar completos y en periodo reciente. Esta primera selección de estaciones permitió eliminar 581 estaciones de los posteriores análisis, para considerar 326 estaciones, que sobre la cartografía se pudo comprobar que representan relativamente bien las condiciones de las islas en lo que se refiere a su distribución planimétrica, es decir, estando bien distribuidas sobre el plano; y altimétrica, es decir, bien repartidas desde la cota cero hasta las cotas más elevadas con estaciones en altitudes intermedias. No obstante, debido a que la ocurrencia de máximos es ínfima en los meses de verano, a los efectos de cálculo de años completos se desestimaron los meses centrales del año, permitiendo añadir 32 estaciones adicionales. Esto añade 1,3 años en promedio al conjunto de las estaciones, y un promedio de 2,7 años a las estaciones de más de 10 años, sin representar una alteración significativa de la media (con una variación promedio del 0,03%) para las estaciones que consideran el verano y tienen más de 10 años completos.

Seguidamente se procedió a buscar conjuntos de estaciones homogéneas siguiendo el método de las dobles acumulaciones y según criterios de proximidad geográfica y similar altitud, encontrándose que el número de

estaciones homogéneas era insuficiente para proceder a un completado de datos. Ni siquiera empleando criterios menos restrictivos se consiguió encontrar pares homogéneos suficientes para realizar el completado de las series, por lo que se tomó la determinación de realizar los análisis de extremos con los datos disponibles sin completar y evaluar el grado de aproximación a distintas leyes de frecuencia.

Las Leyes de frecuencia consideradas son las que clásicamente se usan en el análisis de precipitaciones y que están recogidas en la herramienta CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) del Ministerio de Fomento. Si bien se han evaluado otras 61 Leyes de frecuencia de otros paquetes estadísticos y para todos los casos se ha efectuado un test de bondad de los ajustes mediante las técnicas de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-cuadrado con objeto de asegurar que no se rechaza la hipótesis nula, y que por tanto, la Ley o leyes escogidas son, en términos puramente estadísticos, posibles funciones de ajuste.

Las leyes de frecuencia de tipo paramétrico incluidas en CHAC son seis, dos de ellas (Gumbel y GEV) con tres aproximaciones distintas, es decir, el programa ofrece un total de nueve posibles aproximaciones que se ajustan a los datos según la frecuencia no paramétrica de Gringorten. Las ecuaciones correspondientes son las siguientes:

#### 1. Gringorten (frecuencia no paramétrica):

$$P = \frac{i-0,44}{n+0,12}$$

Donde  $i$  es la posición del dato en la serie ordenada de mayor a menor y  $n$  el número total de datos de la serie.

#### 2. Función de distribución Normal:

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

#### 3. Función de distribución Gumbel:

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

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

4. Función de distribución de tipo exponencial de raíz cuadrada (Square-root Exponential Type distribution of the maximum, SQR-ETMAX):

$$F(x) = e^{-k[(1+\sqrt{\alpha x})e^{-\sqrt{\alpha x}}]}; x \geq 0$$

5. Función de distribución de valores extremos generalizados (Generalized Extreme Values, GEV):

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

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

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

6. Función de distribución Log-Pearson III (LPIII):

$$f(x) = \frac{1}{\alpha^r \Gamma(r)} (x - u)^{r-1} e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}; r > 0$$

En todos los casos, los parámetros son:

$\alpha$  = parámetro de escala

$k$  = parámetro de forma

$u$  = factor de localización

Las aproximaciones utilizadas (en su caso) son: por momentos (MOM), máxima verosimilitud (ML, del inglés *maximum likelihood*) o momentos ponderados probabilísticamente (PWM, del inglés *probability weighted moments*).

Se pudo comprobar que, con carácter general, la ley que mejor representa el conjunto de datos es la de tipo raíz cuadrada de tipo exponencial (SQR ET MAX), motivo por el que se eligió esta función para el cálculo de los periodos de retorno. Estudios de mayor detalle podrían incorporar el tipo GEV-PWM, que para algunos casos concretos aportaba valores mejor ajustados.

#### 4.2.2. Estudio de escenarios de precipitación

Debido a que el área de estudio es muy grande desde la perspectiva del análisis de inundabilidad y a que las diferencias interinsulares también son muy grandes en términos meteorológicos y climáticos, se ha estimado necesario realizar un trabajo adicional para evaluar el comportamiento de las precipitaciones máximas anuales en términos de “escenario de precipitación anual más desfavorable”. En este sentido, un escenario no constituye necesariamente un evento de precipitación singular, como una tormenta (por ejemplo, la tormenta tropical Delta) o como una sucesión de tormentas, sino un año hidrológicamente desfavorable. Esta parte del trabajo se ha realizado con años hidrológicos (septiembre a agosto) y naturales (enero a diciembre) encontrándose diferencias menores que las incertidumbres del cálculo, por lo que finalmente se ha seleccionado el año natural como el intervalo relevante para el tipo de estudio que se acomete.

En primer lugar se comenzó buscando correlaciones entre la ocurrencia de un máximo de precipitación y el número de eventos de precipitación significativa (en términos de máximo anual) asociado a ellos. Trabajar con valores absolutos de precipitación da lugar a una total dispersión en el comportamiento de la precipitación en comparación con el número de pluviómetros implicados para ese “evento” (para esa anualidad). Es decir, eventos de muy alta precipitación (máximo anual en 24h) pueden ocurrir asociados a muchos o a pocos pluviómetros con más o menos la misma probabilidad (densidad), si bien parece que existe un cierto umbral de precipitación para la cual se registra precipitación máxima anual en más de un determinado número de pluviómetros (Figura 51).

Dado que del estudio en valor absoluto no se puede deducir la existencia de ningún patrón en cuanto al “tamaño” del evento, se procedió a estudiar la correspondencia no en términos absolutos, sino relativos de probabilidad de ocurrencia. Es decir, se buscó la correlación del número de pluviómetros que se ven implicados cuando en uno de ellos se alcanza o supera un determinado periodo de retorno. De esta aproximación se da a entender que, en promedio, a medida que en un pluviómetro se registra un evento de alto periodo de retorno, es más probable que ese año recoja máximos de precipitación en otros pluviómetros. Con esto en mente, se realizó un análisis de distancias (Figura 52), buscando evaluar la correlación interinsular en precipitación máxima anual, es

decir, se persigue responder a la cuestión de si en una isla se produce un máximo de precipitación, qué ocurre en el resto de las islas.

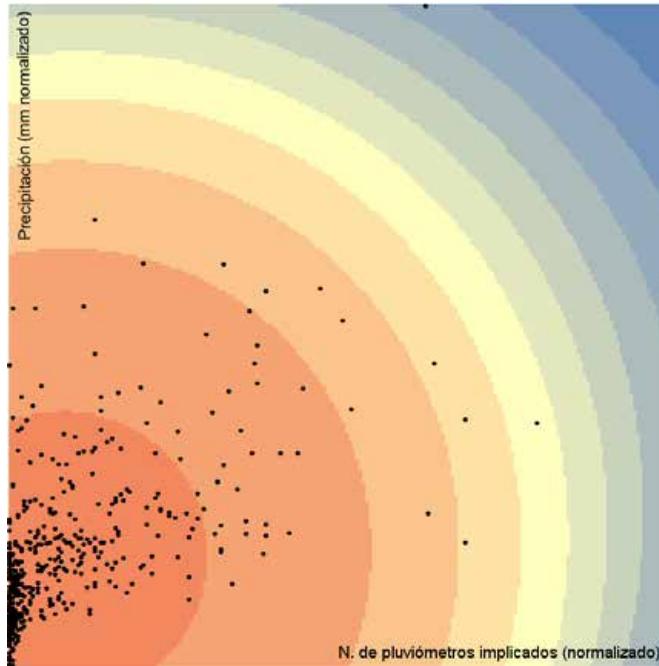


Figura 51. Gráfico de densidad relativa de eventos anuales comparando el valor absoluto de la precipitación con el número de pluviómetros implicados durante dicho evento.

La matriz de distancias (Md) construida para evaluar esta pregunta está conformada por  $n*(n-1) / 2$  valores (diagonal superior de una matriz M de dimensiones  $n \times n$ , siendo n el número de pluviómetros a analizar). La primera matriz que se construye comprende al total de pluviómetros,  $n=358$ , por lo que se evalúan 63.903 valores. Se realizó también un análisis de distancias por isla y por meses.

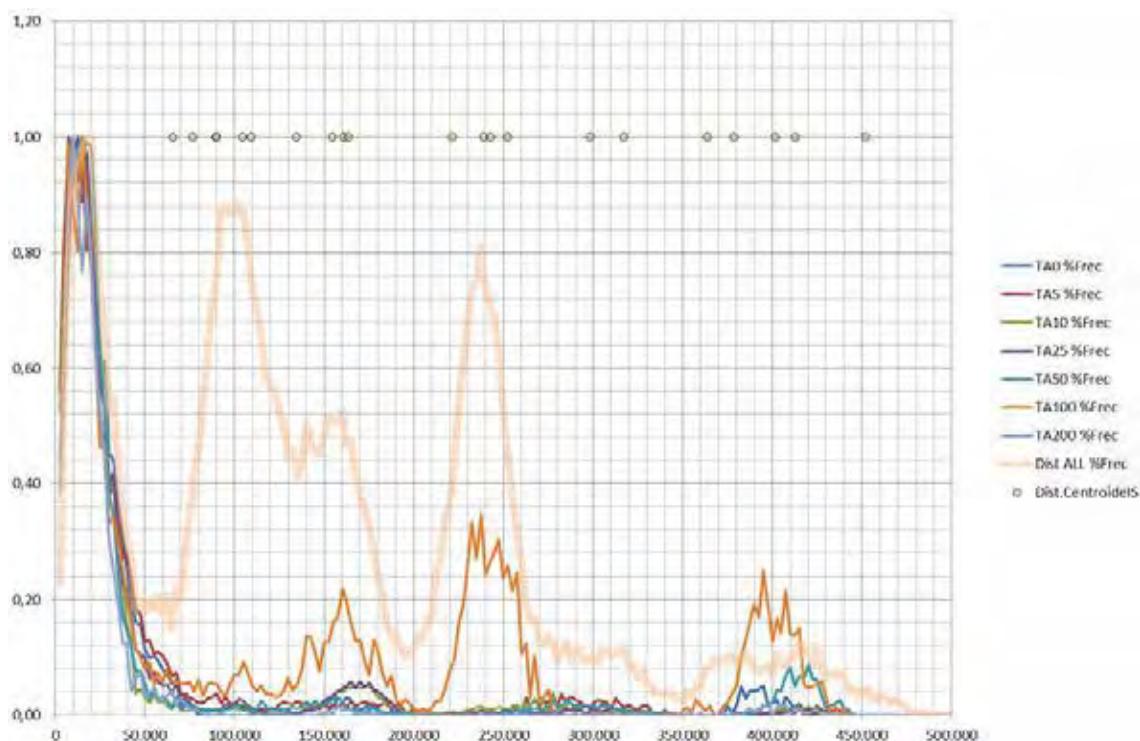


Figura 52. Análisis de distancias medias entre pluviómetros cuando en alguno de ellos se alcanza o supera un determinado periodo de retorno. En abscisas se muestra la distancia en metros y en ordenadas la frecuencia normalizada a la frecuencia máxima de cada promedio. En rosa grueso pálido se muestra el análisis de distancias de todos los pluviómetros. Los puntos verdes muestran las distancias entre los centroides de las siete islas.

En cuanto a los eventos, se pudieron identificar 455 eventos, con una dimensión máxima de 202 pluviómetros en un único evento y una media de 18,98 pluviómetros por evento (desviación estándar de 27,57).

Este análisis preliminar parece mostrar una tendencia a que las precipitaciones anuales se concentren de preferencia en una distancia típica de entre 10 a 20 km (pico de frecuencia) y 50 km y parece indicar que el periodo de retorno de 100 años pueda estar asociado a fenómenos generalizados en el archipiélago.

Sin embargo, al eliminar de las frecuencias por periodos de retorno, es decir, reduciendo lo máximo posible la señal propia por la distribución heterogénea de

la muestra, la frecuencia general de distancias muestra una curva muy diferente (Figura 53).

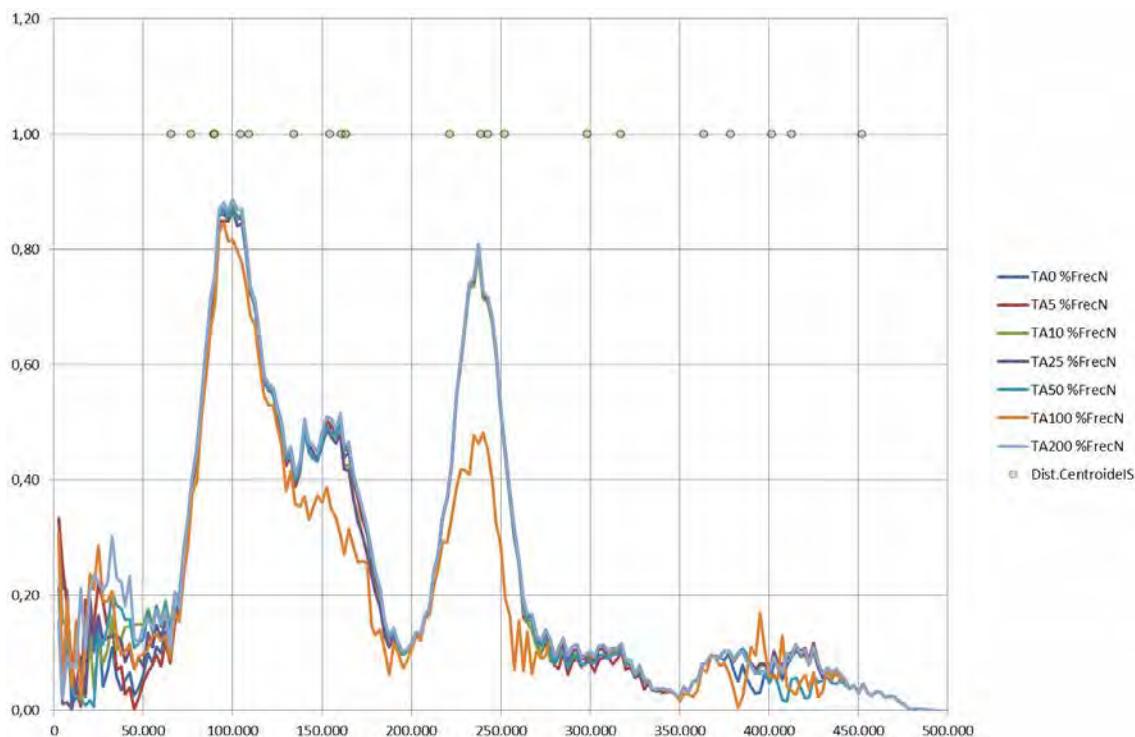


Figura 53. Frecuencia de distancias eliminada la señal original de distancias de todos los pluviómetros.

Para empezar, la distancia típica entre pluviómetros prácticamente desaparece (es decir, se elimina el efecto de precipitación en una única isla), sin embargo, la supuesta señal de dispersión de 100 años respecto a los demás periodos de retorno queda notablemente reducida, asemejándose a todos los demás periodos de retorno y se observan varios picos de frecuencia que podrían indicar la existencia de correlación entre distintas islas (tal vez con una disminución en las distancias medias para T100 en comparación con los demás). Es decir, que cuando se produzca un máximo de precipitación en una isla, posiblemente exista otra isla que muestre un comportamiento similar, que no parece estar totalmente condicionado por la heterogeneidad propia de la distribución de la muestra.

Para evaluar si esta afirmación es correcta, se analizó la proporción de pluviómetros que funcionan en cada una de las islas cuando en un año

determinado se alcanza o supera un determinado periodo de retorno. El resultado se puede expresar en términos de coeficiente de correlación (Tabla 10).

Tabla 10. Coeficiente de correlación de proporciones de pluviómetros que registran máximos anuales cuando en uno de ellos se alcanza o supera un determinado periodo de retorno. El color es una ayuda a la interpretación de los correlogramas, de verde a rojo = de mínimo a máximo.

		FV	GC	GO	LP	LZ	TF
T5	EH	0,1	0,3	0,3	0,5	0,2	0,1
	FV		0,5	0,4	0,1	0,6	0,5
	GC			0,3	0,1	0,2	0,4
	GO				0,4	0,2	0,5
	LP					0,1	0,1
	LZ						0,2
T10	EH	0,2	0,3	0,6	0,5	0,2	0,5
	FV		0,4	0,5	0,2	0,8	0,6
	GC			0,3	0,3	0,4	0,4
	GO				0,7	0,6	0,6
	LP					0,4	0,4
	LZ						0,6
T50	EH	0,3	0,4	0,8	0,7	0,3	0,6
	FV		0,7	0,2	0,2	0,5	0,3
	GC			0,4	0,4	0,4	0,5
	GO				0,6	0,2	0,7
	LP					0,2	0,5
	LZ						0,2
T100	EH	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6
	FV		0,9	0,5	0,4	0,5	0,2
	GC			0,7	0,5	0,7	0,3
	GO				0,8	0,7	0,7
	LP					0,6	0,5
	LZ						0,3
T200	EH	0,0	0,6	0,9	0,9	-0,1	0,7
	FV		0,3	0,0	-0,1	1,0	-0,3
	GC			0,4	0,3	0,2	0,3
	GO				0,9	-0,2	0,8
	LP					-0,2	0,9
	LZ						-0,4

La Tabla 10 se puede interpretar como una creciente correlación generalizada conforme aumenta el periodo de retorno. El periodo de retorno de 200 años parece mostrar una menor correlación general, pero afianzando las correlaciones aparentemente más estables en el resto de periodos de retorno, sin embargo, se puede explicar debido a la fuertemente decreciente disponibilidad de datos; de los 455 eventos identificados, 246 son menores que T5; 50 iguales o superiores a T5 y menores que T10; 75 para T10; 39 para T25; 24 para T50; 12 para T100 y 9 para T200. Por otro lado, las correlaciones altas parecen estar forzadas por

valores anómalos, tipo “out-layers”, por lo que estas lecturas deben estar sujetas a un cierto grado de excepticismo.

De la matriz de correlación (Tabla 10) se puede interpretar, a grandes rasgos, que existe una cierta tendencia a que el comportamiento de los máximos sea similar al comportamiento de las precipitaciones normales en el siguiente sentido: parece que hay tres grupos, las islas orientales (Fuerteventura y Lanzarote) que parecen relacionadas entre sí, las occidentales (Gomera-Hierro-La Palma y tal vez Tenerife) y las centrales (Gran Canaria y Tenerife), mal correlacionadas en general entre sí y sólo eventualmente correlacionadas con las demás; y en general, no se puede apreciar correlación alguna entre estos tres grupos de islas. Es decir, cuando alguna de las islas orientales está afectada por un evento, lo más probable es que el resto de las orientales lo esté también y en una proporción similar de pluviómetros (en relación creciente), mientras que, si en uno de los tres grupos se produce un evento, lo que sucede en cualquiera de los otros dos grupos es un fenómeno aleatorio.

En cuanto al número de islas que registran máximos de precipitación, parece imprudente obtener conclusiones debido a la falta de datos, pero en general parece que el número de islas afectadas no se correlaciona con el periodo de retorno, es decir, tan probable es que la precipitación afecte a una única isla como que afecte al conjunto del archipiélago (Tabla 11), excepto para lluvias ordinarias, en las que es mucho más probable que haya una única isla afectada.

Tabla 11. Número de eventos y número de islas implicadas por periodo de retorno.

N. Islas	N. de eventos cuando en alguno se alcanza un determinado T						
	T<5	T5	T10	T25	T50	T100	T200
1	133	6	10	2	0	0	2
2	63	8	7	6	0	1	1
3	24	10	14	2	2	1	0
4	16	5	15	5	5	1	1
5	6	8	9	9	6	4	2
6	1	8	10	10	2	2	2
7	3	5	10	5	9	3	1

Finalmente, para comprender mejor el funcionamiento de las precipitaciones máximas en términos de variación anual, se evaluó el periodo de retorno de

todos los pluviómetros cuando en al menos uno de ellos se alcanza o supera un determinado periodo de retorno (Figura 54).

Al trabajar en términos promedio, la curva T5 en la Figura 54 sólo contiene dos puntos: los que igualan o superan T5, pero no alcanzan T10 y los que son menores que T5. Así, a medida que aumenta el periodo de retorno aumenta el número de puntos con los que se representa la curva. Por otro lado, la convexidad puede ser aparente por trabajar con valores fijos de periodo de retorno (“igual o superior a un determinado T”).

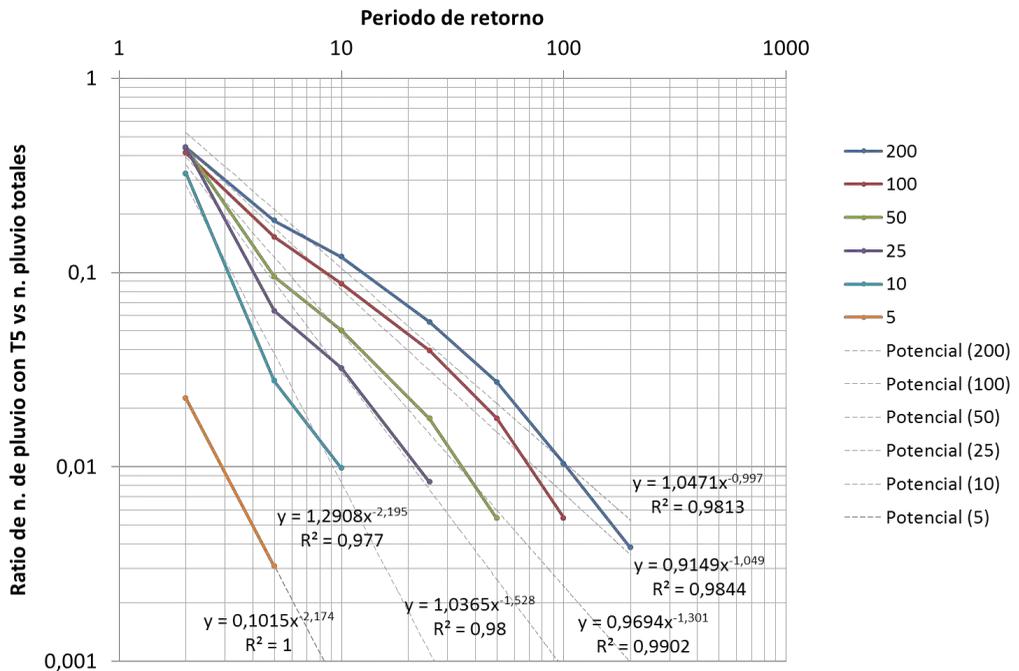


Figura 54. Proporción media de pluviómetros que alcanzan o superan un determinado T, cuando en uno de ellos se alcanza o supera un determinado T.

En todo caso, parece existir un comportamiento potencial de pendiente decreciente (tal vez condicionado o no por la función potencial con que se evalúa la precipitación en cada pluviómetro). Los parámetros a y b de las funciones de ajuste ( $y=ax^b$ ), se pueden aproximar a su vez siguiendo una ley potencial (Figura 55), con lo que se puede obtener una proyección teórica para T500 y evaluar la capacidad predictiva del modelo (Figura 56). Como se puede observar, el modelo reproduce relativamente bien el comportamiento hasta del periodo T100, con un

incremento notable de la incertidumbre para T200, pero por el lado de la seguridad (incrementando el número previsto de pluviómetros que alcanzan o superan un determinado T, especialmente al final de la curva, lo que podría ser consistente con la decreciente disponibilidad de datos). Cabe por tanto esperar una banda de incertidumbre importante asociada a la predicción T500, pero se puede considerar como una aproximación válida, habida cuenta de las limitaciones en cuanto a cantidad de datos. Tomando dos puntos arbitrarios de referencia, la curva T500 de la Figura 56 se interpreta del siguiente modo: cuando se produce un evento de T500 en algún pluviómetro, más del 1,5% (aprox) de los pluviómetros alcanzan o superan dicho T500, y más del 10% (aprox) alcanzan o superan un periodo de unos 20 años.

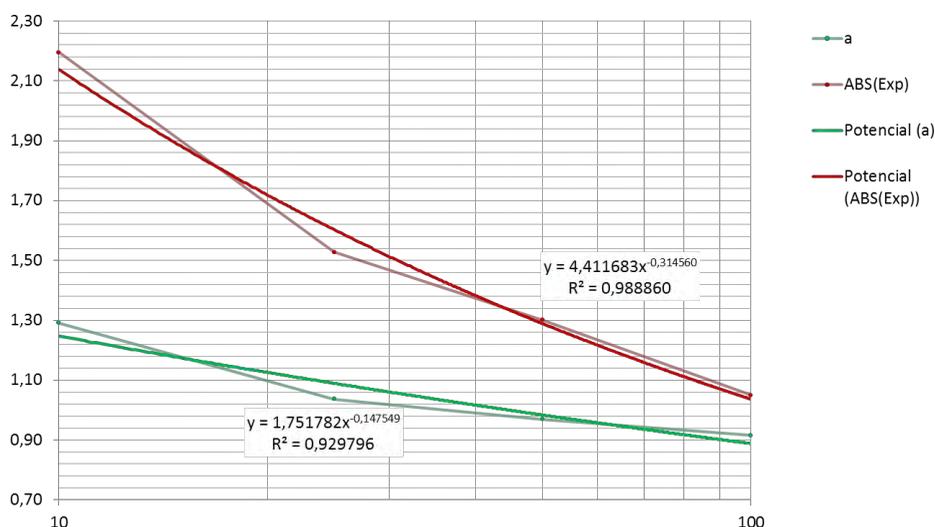


Figura 55. Ajuste de los parámetros  $a$  y  $b$  (exp) de las leyes de potencia de cada  $T$ , a nuevas leyes de potencia.

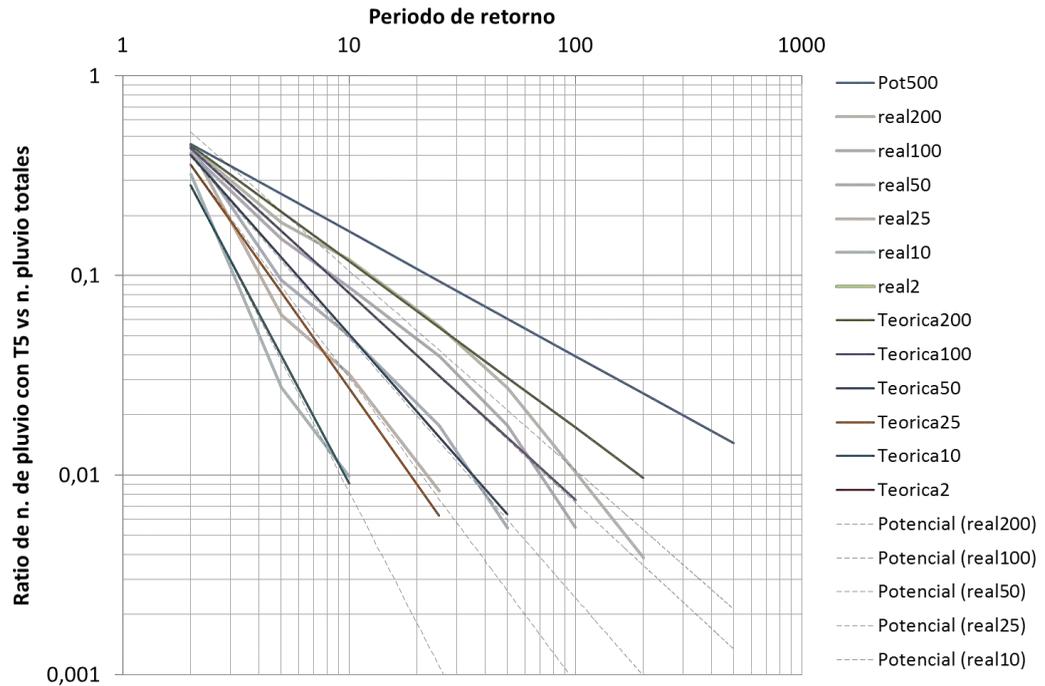


Figura 56. Modelo predictivo que describe la proporción de pluviómetros y su periodo de retorno cuando en alguno de ellos se alcanza o supera un determinado periodo de retorno.

Con estos cálculos y asumiendo algunas hipótesis para simplificar el escenario de inundabilidad a considerar, se puede continuar el estudio como método aproximativo. Las hipótesis son:

- El periodo de retorno de la precipitación equivale al periodo de retorno de la inundación. Esta hipótesis sería válida para una predicción a muy corto plazo, un año o dos años vista, tal vez más o menos en función de la cantidad de cambios que se puedan observar en una determinada cuenca.
- A partir de una inundación superior a la máxima crecida ordinaria (MCO), se alcanza el límite máximo de llanura inundable (en términos de extensión espacial). Esta hipótesis es válida siempre que se trate de cauces encajados (tipo barrancos, ramblas), y no sería válida para inundaciones fluviales abiertas. Tampoco es válida para zonas de abanicos detríticos de gran tamaño, donde una avulsión (un cambio en el trazado en planta del cauce) no necesariamente afectaría a todo el material detrítico acumulado. Cabe pensar, en principio, que el archipiélago cumple las condiciones

para asumir esta hipótesis, o en su defecto, cabe pensar que los errores de modelización a la escala de trabajo en términos de área inundable son mayores que la incertidumbre asociada a una inundación superior a la MCO. Es decir, el modelo no tiene capacidad para distinguir una inundación de  $T \gg T_{MCO}$ . En general, según el [CEDEX y DGA \(2011\)](#), los valores de  $T_{MCO}$  en la España Peninsular son inferiores a 7 años. Por tanto, el modelo, en área inundable sería incapaz de diferenciar satisfactoriamente extensiones inundables superiores a 20 años o las diferencias serían menores que el margen de error promedio esperable.

- Por cuestiones prácticas se puede asumir que la proporción de pluviómetros se puede extrapolar a la proporción de área afectada. Esta hipótesis es asumible dado que no se ha identificado un tamaño típico diferente de las distancias entre pluviómetros, a pesar de que no se puede afirmar con certeza si los eventos son más o menos concentrados o dispersos en el ámbito de una isla. Es más, se ha podido comprobar que la precipitación de T500 puede ser tanto muy concentrada como muy dispersa.

#### 4.2.3. Regionalización de la precipitación

Existen distintos métodos para evaluar la distribución de una propiedad en un área conociendo el valor de un conjunto de muestras puntuales. A estos procedimientos se les conoce como regionalización o interpolación espacial, y se pueden agrupar en tres grandes conjuntos:

1. Regionalización por polígonos de Thiessen.
2. Técnicas de interpolación por polinomios (más o menos complejos).
3. Técnicas de análisis geoestadístico.

Algunos autores ([Hongyan et al., 2005](#)), clasifican los métodos de interpolación de la precipitación como globales (superficie media y regresión múltiple), locales (Thiessen, IDW, krigado y splines), mixtos (combinando métodos globales y locales), y redes neuronales (RN tipo back-propagation y redes basadas en funciones radiales). Otros autores ([Li y Heap, 2008](#)) se limitan a distinguir los métodos como geoestadísticos y no geoestadísticos.

Los polígonos de Thiessen y las técnicas de polinomios e inverso de distancias, pueden ser suficientes cuando la población muestral es muy densa o los requisitos de discretización no muy exigentes, y en general, como primera aproximación para conocer el comportamiento general de una variable. Las técnicas geoestadísticas están más indicadas cuando se conocen otras variables que intervienen en el sistema, como dependencia de una dirección, orientación, clustering (agrupamiento) u otra propiedad. Cada vez es más frecuente observar estudios de precipitaciones que prefieren un modelo de kriging o co-kriging precisamente debido a esto (Kieffer y Bois, 2002). Izquierdo y Márquez (2006, 2007) han encontrado una mejora significativa en los métodos de interpolación de la precipitación al incorporar la elevación en modelos de cokriging para estudio de recursos hídricos (al igual que otros muchos autores), sin embargo Martínez Allegue et al. (2012) señalan que la pérdida de correlación es evidente para periodos de retorno altos y por tanto no parecen aportar una mejora significativa para el caso de estudios de precipitaciones máximas diarias. En todo caso existe un cierto consenso en que para conjuntos de datos relativamente densos (siendo la densidad una relación entre la distribución de puntos de muestreo y el objetivo de discretización), los modelos más sofisticados no producen mejoras significativas en la predicción que los modelos más simples; Li y Heap, (2008) hacen una breve pero destacable recopilación de esta observación. En este estudio se ha empleado el método de interpolación de splines (polinomios) con carácter general a efectos del estudio de escorrentía superficial, si bien para el estudio de casos concretos (como se verá más adelante), se ha empleado el método de los polígonos de Thiessen o mapa de Voronoi. En la aplicación del método spline, se ha buscado minimizar el efecto del interpolador, lo que ha conducido a considerar o no algunas estaciones, especialmente aquellas que, estando muy próximas entre sí, presentaban diferencias de más del 20% en el valor estimado de precipitación o aquellas cuyo efecto generaba artefactos por presentar valores significativamente anómalos respecto a las circundantes. Además se utilizaron puntos de apoyo para garantizar la interpolación en todo el ámbito de cada isla buscando minimizar el efecto de su presencia. Los mapas resultantes se representan de la Figura 57 a la Figura 63.

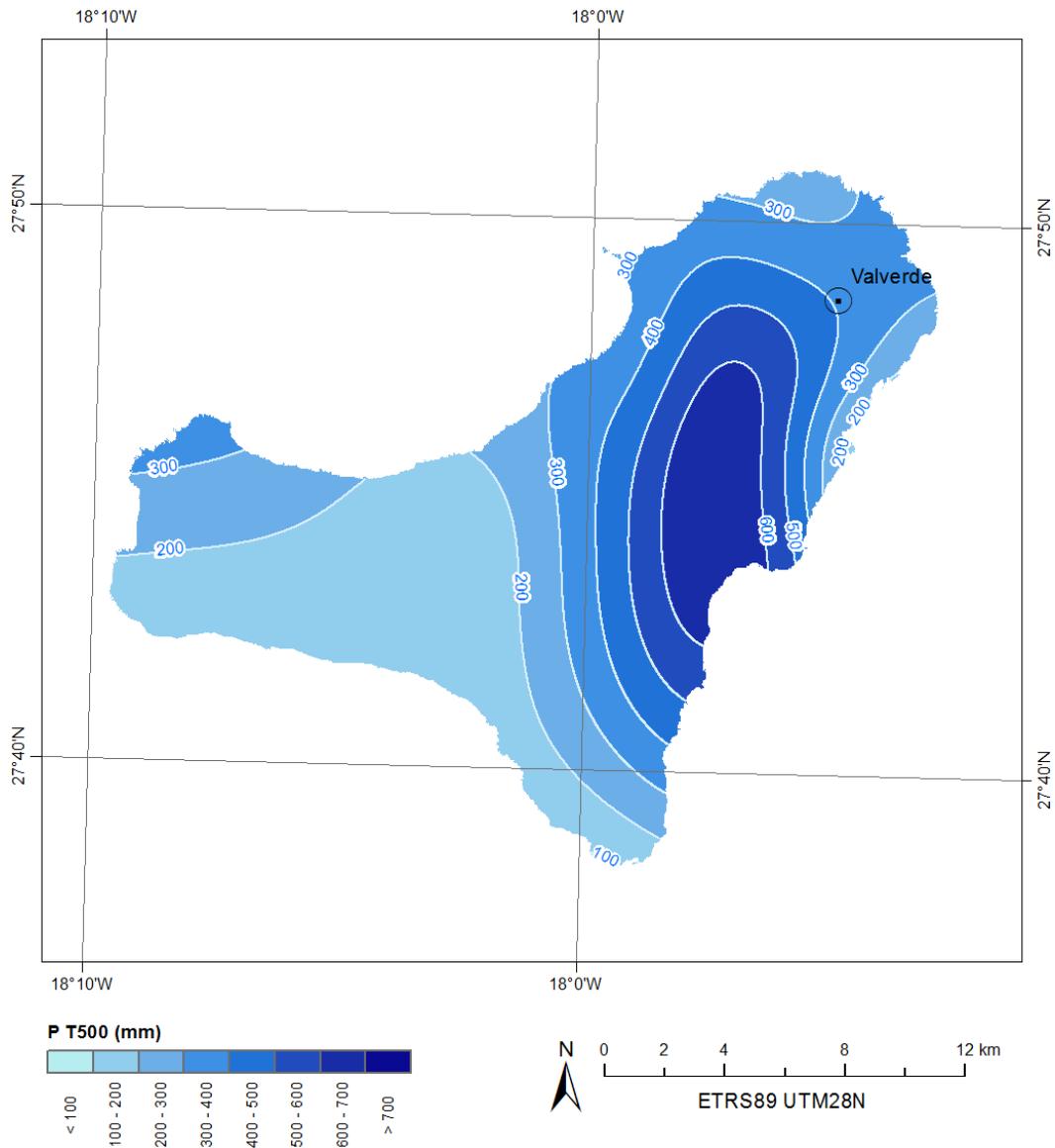


Figura 57. Precipitación máxima T500 para la isla de El Hierro.

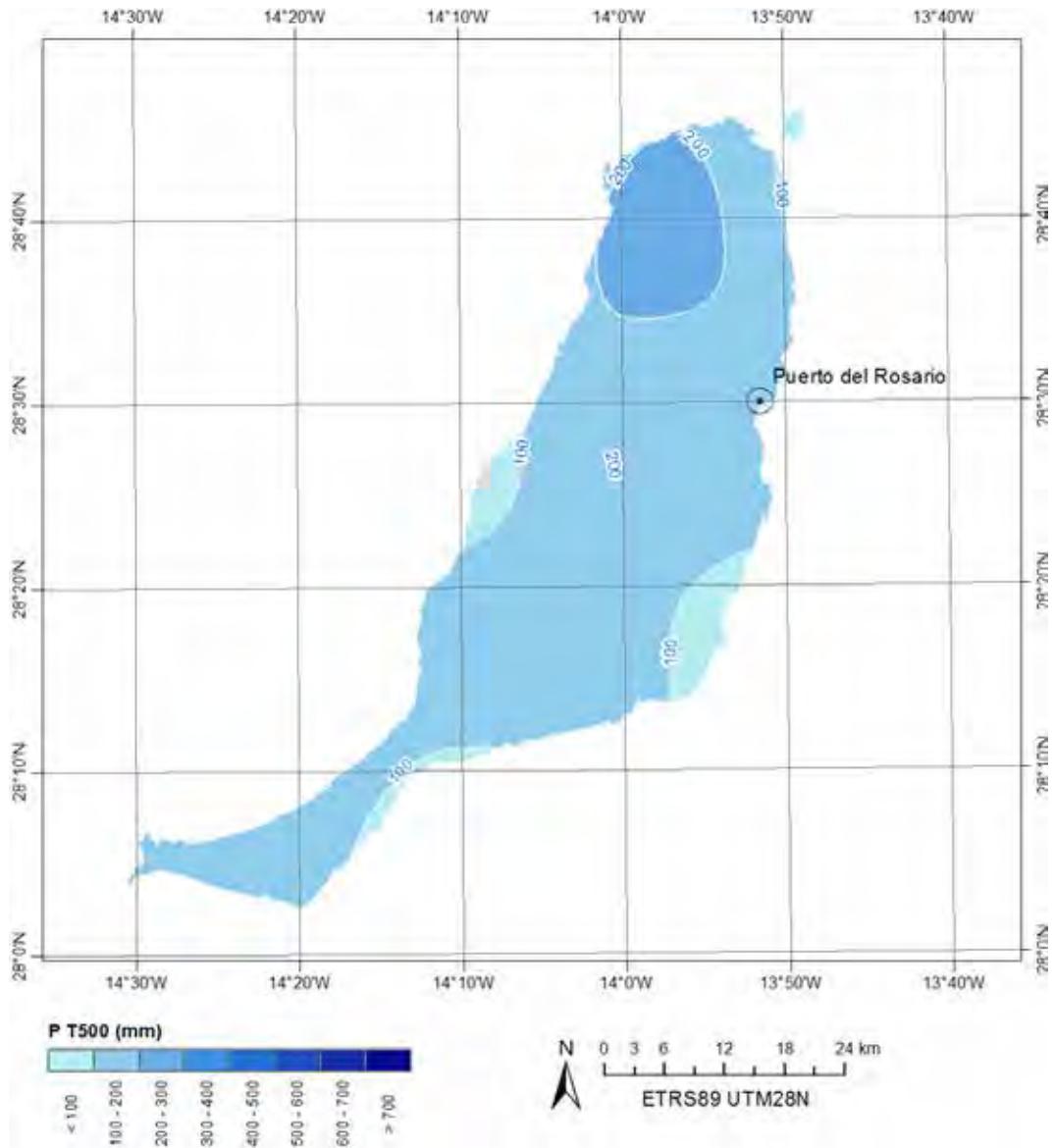


Figura 58. Precipitación máxima T500 para la isla de Fuerteventura.

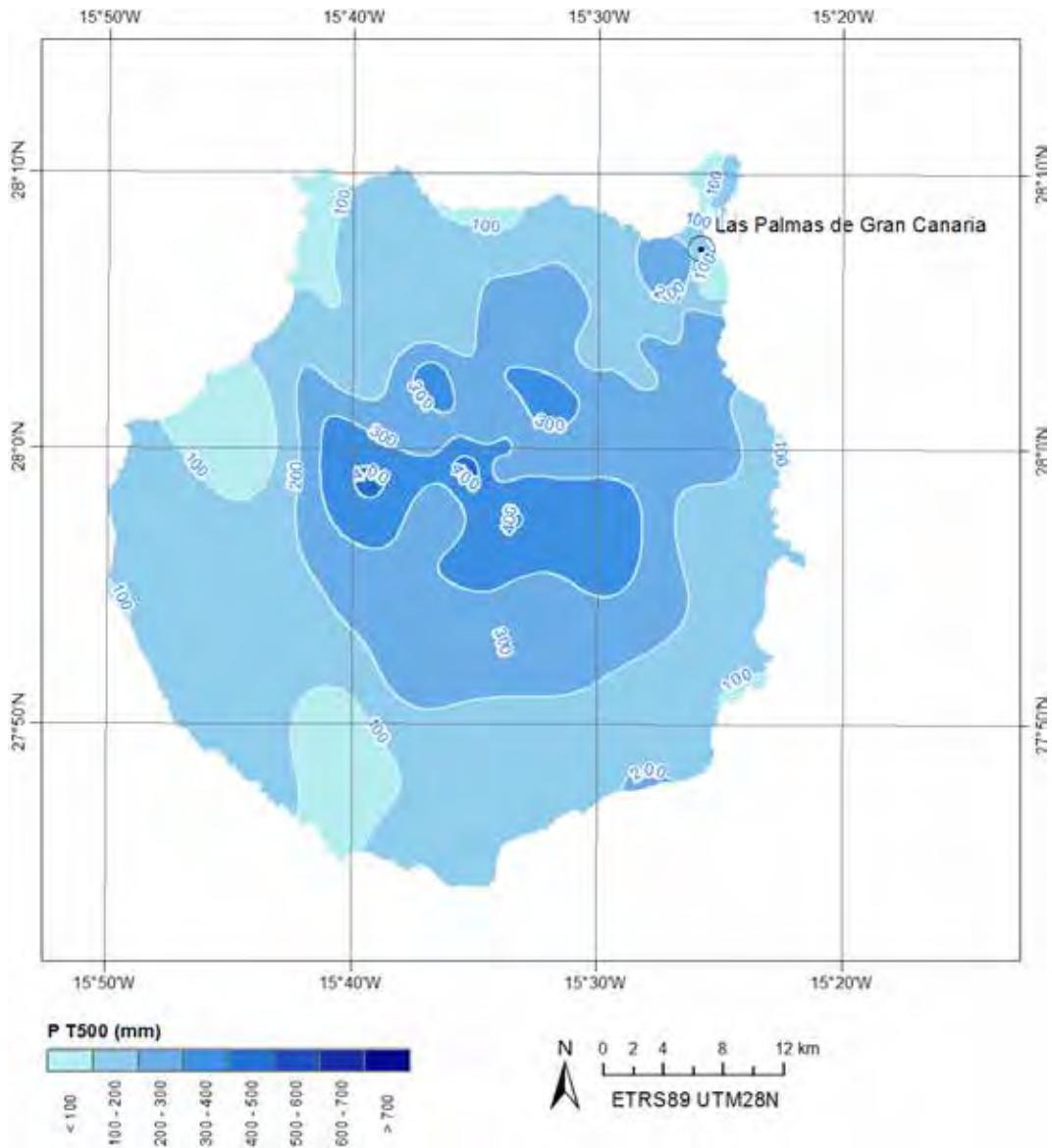


Figura 59. Precipitación máxima T500 para la isla de Gran Canaria.

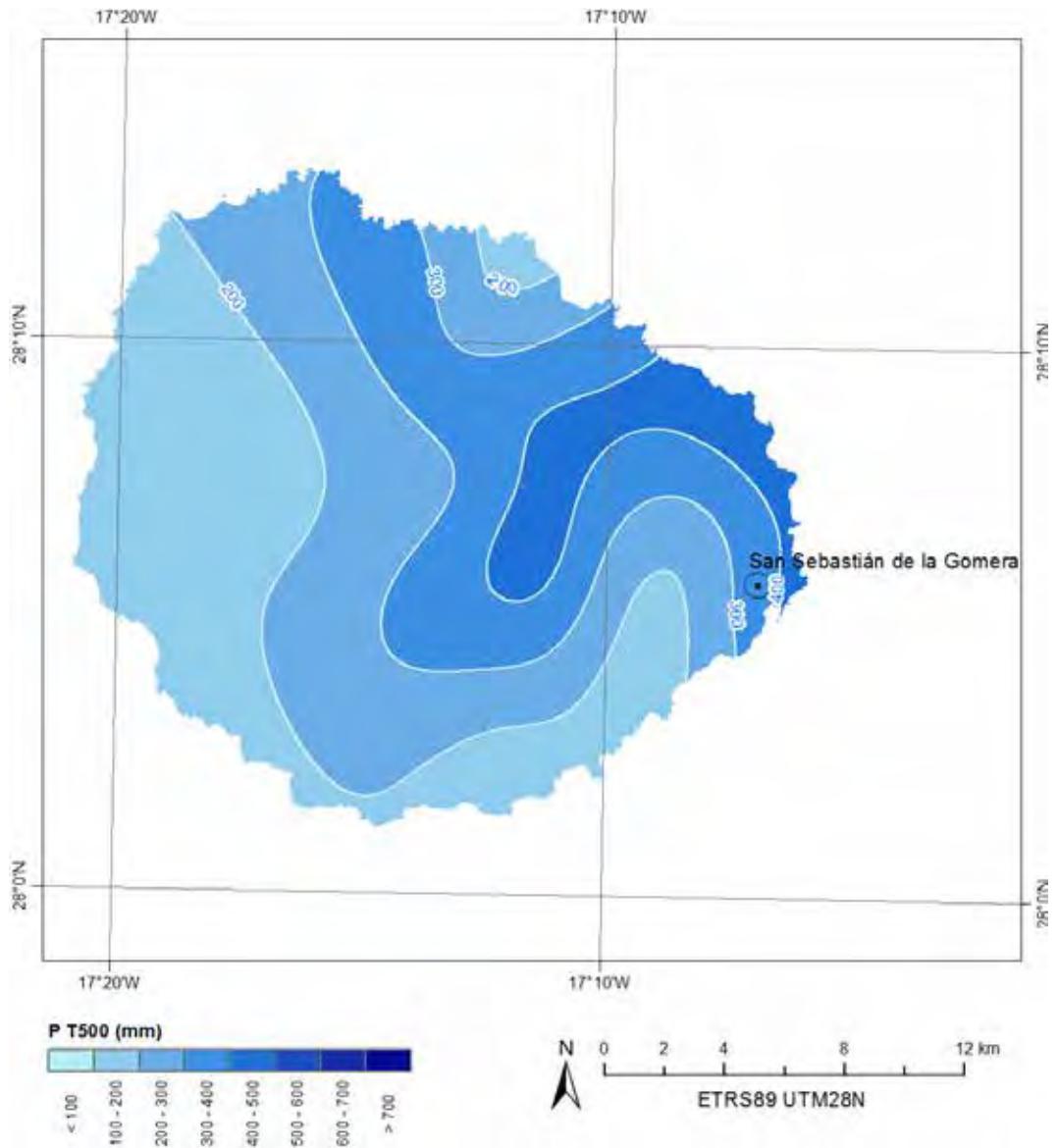


Figura 60. Precipitación máxima T500 para la isla de La Gomera.

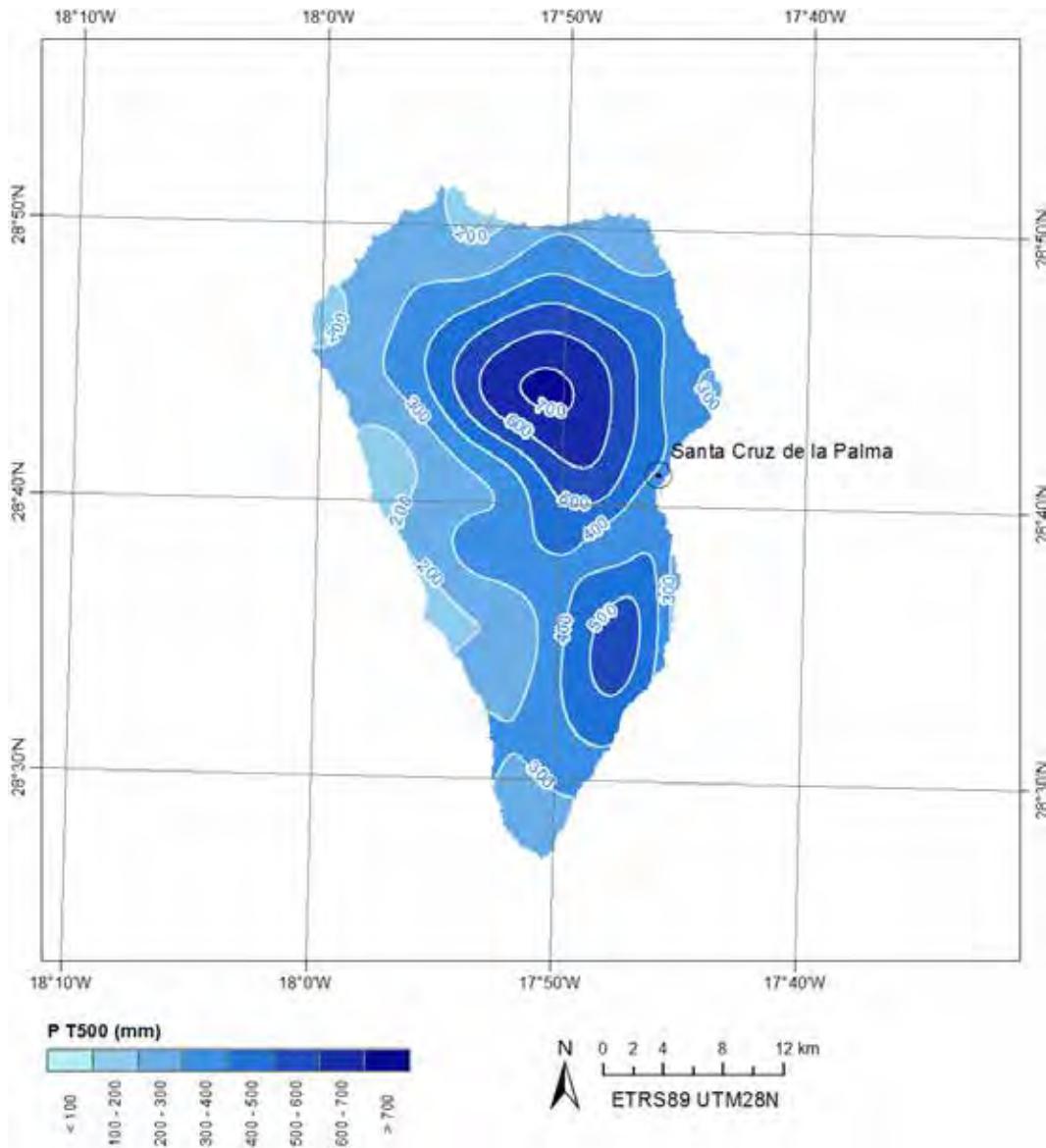


Figura 61. Precipitación máxima T500 para la isla de La Palma.

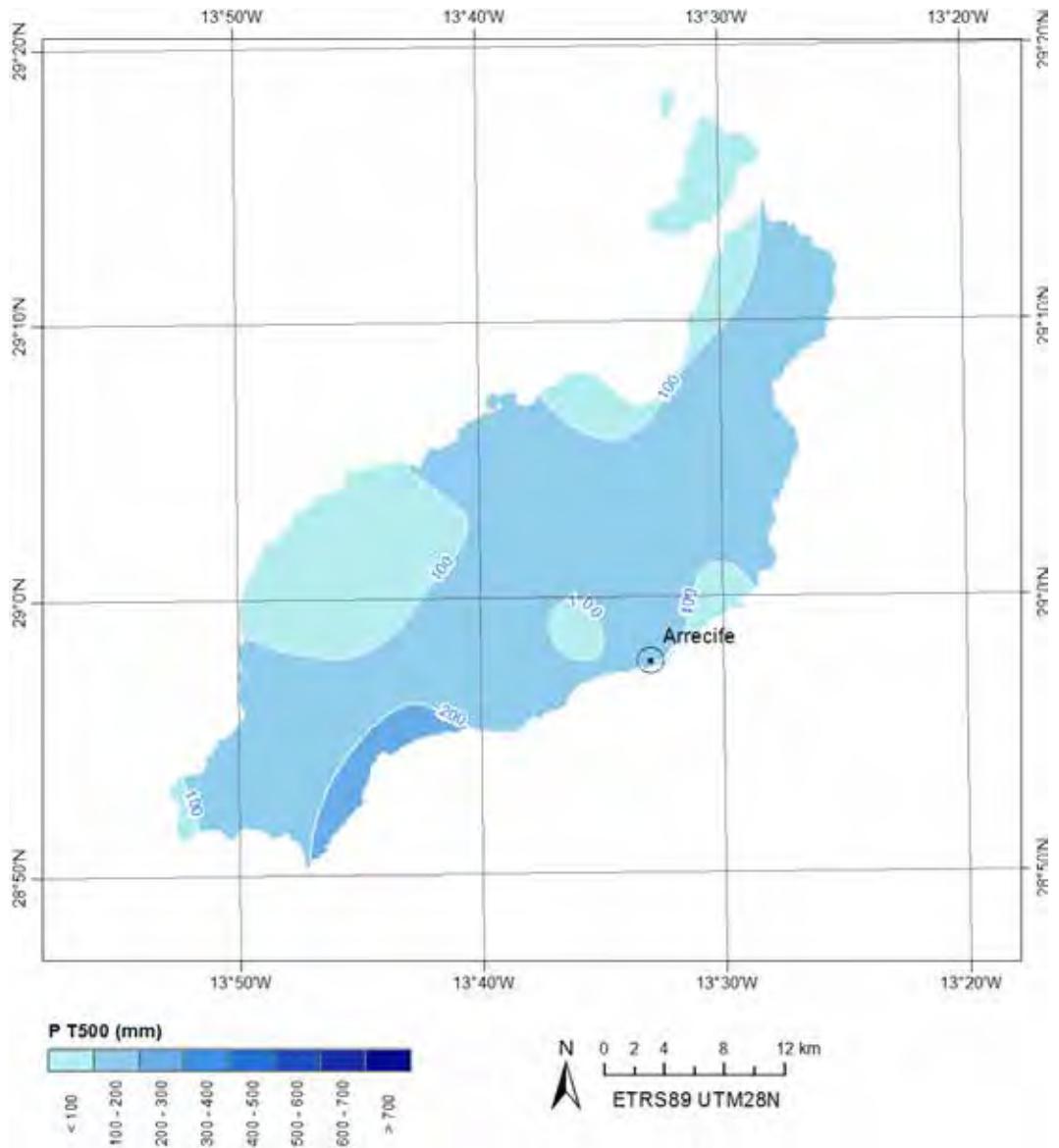


Figura 62. Precipitación máxima T500 para la isla de Lanzarote.

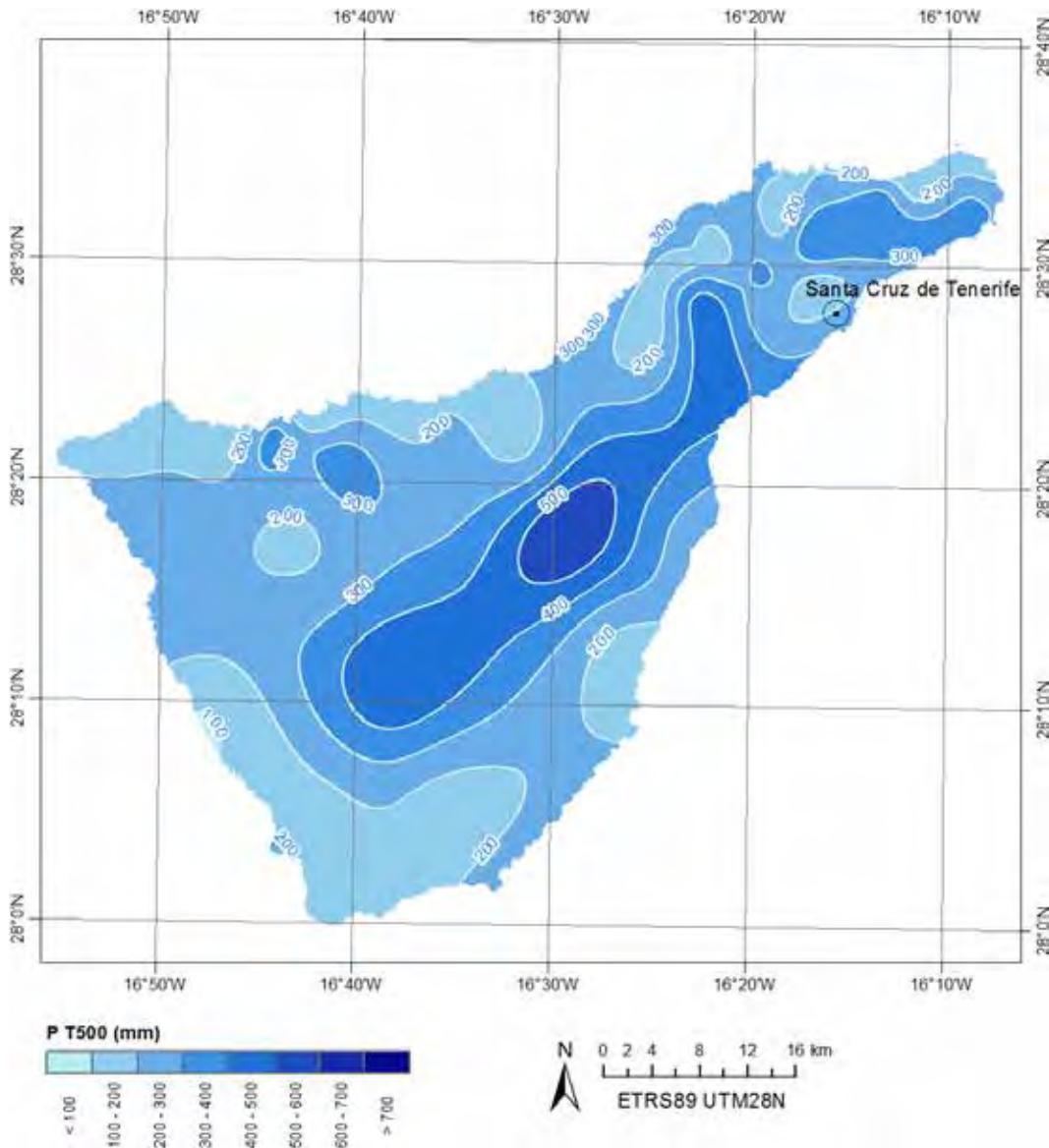


Figura 63. Precipitación máxima T500 para la isla de Tenerife.

#### 4.2.4. Cálculo de escorrentía superficial

El cálculo de la escorrentía superficial persigue determinar los aportes de la precipitación a la red de drenaje, expresado en términos de caudal punta (típicamente para análisis de peligrosidad de inundaciones), o en términos de

hidrograma de crecida. Esto se puede realizar mediante métodos directos o indirectos. Mientras que los métodos directos se basan en la medición de curvas de gasto, o relación caudal profundidad en una sección conocida (típicamente utilizado para recursos hídricos y sistemas de alerta temprana), los métodos indirectos pueden ser deterministas (basados en leyes físicas o determinaciones empíricas) o estocásticos (basados en análisis multivariante, análisis estadístico de caudales, etc.; Díez et al., 2008). Cuando no existen medidas directas de los caudales, como es el caso de las Islas Canarias, o cuando se requieren estudios de plazo amplio, los métodos deterministas son los más utilizados, sin detrimento de que otras técnicas indirectas permitan conocer dichos aportes, como los estudios geomorfológico y geológicos *sensu lato*, trabajos muy poco extendidos hasta la fecha y limitados a proyectos de investigación; (Díez Herrero et al., 2012). Resultaría óptimo que para un mismo caso de estudio se abordaran métodos de diferentes ámbitos, lo que permitiría conocer mejor cada caso en estudio, sin embargo las limitaciones presupuestarias y sobre todo la tradición, hacen que algunos métodos aún no se hayan extendido, como los geológicos o los botánicos.

Dado que en Canarias no existen cauces con aportes permanentes, es decir, que la red de drenaje está seca la mayor parte del año, no es posible realizar estudios por métodos directos, ni por métodos estadísticos basados en información observada directa. Tampoco se pueden utilizar los datos de aforo para calibración de parámetros o modelos, como se hace por ejemplo en el estudio del CEDEX y DGA (2011).

Por este motivo se ha acudido a los modelos deterministas. Dentro de los modelos deterministas existen básicamente cuatro tipos de métodos: continuos o discretos (según se presente un balance continuo o no de la humedad a lo largo del tiempo) y agregados o distribuidos (según sea el nivel de discretización, desde cuenca a pixel). A modo de ejemplo, entre los métodos continuos cabe mencionar MIKE-SHE y SIMPA; entre los discretos: PMF e Hidrograma unitario. Como métodos distribuidos cabe mencionar: TETIS y HL-RDHM; y como agregados: HMS y Método Racional. Los métodos continuos, así como los métodos distribuidos requieren una gran cantidad de información de entrada y por tanto presentan como inconveniente elevados tiempos de cálculo. Además, los métodos distribuidos plantean problemas de no-linearidad, factor de escala, equiafinidad, unidad e incertidumbre, entre otros (Beven, 2001). Por todo ello, para este estudio se ha seguido el método Racional de Témez modificado, recogido en la Instrucción 5.2 IC de drenaje superficial (BOE 123, de 23 de mayo

de 1990, páginas 14036 a 14082), y utilizado como método agregado, pero implementado de forma semi-distribuida a lo largo de la red de drenaje, de forma similar a la implementada por CEDEX y DGA (2011) para cuencas inferiores a 50 km<sup>2</sup>.

Este modelo establece que el caudal en un punto de la red de drenaje es directamente proporcional al área de la cuenca vertiente a ese punto ( $A$ ) y a la intensidad media de precipitación de la cuenca ( $I$ ). No obstante, resulta necesario incorporar una reducción por medio de un coeficiente que expresa la proporción de la componente superficial de una precipitación de la intensidad considerada ( $C$ , *coeficiente de escorrentía*), y otra segunda reducción por el efecto de las abstracciones de precipitación en el intervalo de tiempo dado ( $K$ , *coeficiente de uniformidad*). Dado que la intensidad de precipitación y el área se miden habitualmente en distintas unidades, (el área en km<sup>2</sup> y la intensidad en mm/h), para obtener el caudal ( $Q$ ) en m<sup>3</sup>/s se debe dividir por 3,6, quedando la formulación del siguiente modo:

$$Q = \frac{C * I * A * K}{3,6}$$

El coeficiente  $C$  de escorrentía (adimensional,  $0 < C < 1$ ), depende de la precipitación diaria ( $P_d$ ) y el umbral de precipitación ( $P_0$ ) según la siguiente relación:

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

Para el cálculo del umbral de escorrentía se emplea la Tabla 12 de tipos de suelo y la Tabla 14 adaptadas para la singularidad de usos en Canarias.

Tabla 12. Tabla de tipos de suelo según la Instrucción de carreteras 5.2-IC.

Tipo de suelo	Características	Correspondencia GEODE
A	El agua se infiltra rápidamente incluso cuando están muy húmedos. Profundos y de texturas gruesas (arenosas o areno-limosas), están excesivamente drenados.	Arenas, piroclastos
B	Están muy húmedos y tienen una capacidad de infiltración moderada. La profundidad de suelo es de media a profunda, y su textura, franco-arenosa, franca, franco-arcilloarenosa o franco-limosa.	Antrópicos, brechas, coladas basálticas, coladas basaníticas, coladas diversas, lavas y piroclastos
C	Están muy húmedos, la infiltración es lenta. La profundidad de suelo es inferior a la media y su textura es franco-arcillosa, franco-arcillo-limosa, limosa o arcillo-arenosa. Son suelos imperfectamente drenados.	Limos y arcillas, arenas y limos, conglomerados y arenas, coladas fonolíticas, coladas traquíticas, freatomagmáticas, lavas submarinas, Diques y domos, domos.
D	Están húmedos, la infiltración es muy lenta. Tienen horizontes de arcilla en la superficie o próximos a ella y éstos están drenados de forma pobre o muy pobre. También se incluyen aquí los terrenos con nivel freático permanentemente alto y los suelos de poco espesor.	Arcillas, conglomerados, aglomerados volcánicos, diques, intrusivas, ignimbritas, roques.

Tabla 13. Tipos de suelo simplificados del SIOSE.

Descripción	ID	Descripción	ID
COBERTURA ARTIFICIAL		TERRENOS SIN VEGETACIÓN	
Edificación	EDF	Playas, dunas y arenales	PDA
Zona verde artificial y arbolado urbano	ZAU	Suelo desnudo	SDN
Lámina de agua artificial	LAA	Zonas quemadas	ZQM
Vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación	VAP	Glaciares y nieves permanentes	GNP
Otras construcciones	OCT	Ramblas	RMB
Suelo no edificado	SNE	Roquedo	
Zonas de extracción o vertido	ZEV	Acantilados marinos	ACM
CULTIVOS		Afloramientos rocosos y roquedos	ARR
Cultivos Herbáceos		Canchales	CCH
Arroz	CHA	Coladas lávicas cuaternarias	CLC
Cultivos Herbáceos distintos de Arroz	CHL	COBERTURAS HÚMEDAS	
Cultivos Leñosos		Humedales continentales	
Frutales		Zonas pantanosas	HPA
Frutales Cítricos	LFC	Turberas	HTU
Frutales no Cítricos	LFN	Salinas continentales	HSA
Viñedo	LVI	Humedales marinos	
Olivar	LOL	Marismas	HMA
Otros cultivos leñosos	LOC	Salinas marinas	HSM
Prados	PRD	COBERTURA DE AGUA	
Pastizal	PST	Aguas continentales	
ARBOLADO FORESTAL		Cursos de agua	ACU
Frondosas		Láminas de agua	
Frondosas Caducifolias	FDC	Lagos y lagunas	ALG
Frondosas Perennifolias	FDP	Embalses	AEM
Coníferas	CNF	Aguas marinas	
Matorral	MTR	Lagunas costeras	ALC
		Estuarios	AES

Tabla 14. Umbral de escorrentía. Ver códigos de correspondencia en la Tabla 13

Uso del suelo	Pendiente (%)	Método de cultivo*	Características Hidrológicas	Grupo de suelo				Correspondencia SIOSE
				A	B	C	D	
Barbecho	≥ 3	R	-	15	8	6	4	ZQM
		N	-	17	11	8	6	
	< 3	R/N	-	20	14	11	8	
Cultivos en hilera	≥ 3	R	-	23	13	8	6	CHL
		N	-	25	16	8	11	
	< 3	R/N	-	18	19	14	11	
Cereales de invierno	≥ 3	R	-	29	27	10	8	
		N	-	32	19	12	10	
	< 3	R/N	-	34	21	14	12	
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	-	26	15	9	6	
		N	-	28	17	11	8	
	< 3	R/N	-	30	19	13	10	
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	-	37	20	12	9	ZAU, CHA, PRD
		N	-	42	23	14	11	
	< 3	R/N	-	47	25	16	13	
Praderas	≥ 3	-	Pobre	24	14	8	6	PST
		-	Media	53	23	14	9	
		-	Buena	70	33	18	13	
		-	Muy buena	80	41	22	15	
	< 3	-	Pobre	58	25	12	7	
		-	Media	80	35	17	10	
		-	Buena	120	55	22	14	
		-	Muy buena	250	100	25	16	
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	≥ 3	-	Pobre	62	28	15	10	LFC, LFN, LVI, LOL, LOC
		-	Media	80	34	19	14	
		-	Buena	100	42	22	15	
	< 3	-	Pobre	75	35	19	14	
		-	Media	95	42	22	16	
		-	Buena	150	80	25	16	
Masas forestales (bosque, monte bajo, etc.)	< 3	-	Muy clara	40	17	8	5	FDC, FDP, CNF, MTR
		-	Clara	60	24	14	10	
		-	Media	75	34	22	16	
		-	Espesa	90	47	31	23	
		-	Muy espesa	120	65	43	33	
Rocas permeables	≥ 3	-	-	3				SNE, ZEV, PDA, SDN, GNP, RMB, CCH, ALC
	< 3	-	-	5				
Rocas impermeables	≥ 3	-	-	2				EDF, VAP, OCT, ACM, ARR, CLC, HPA, HTU, HSA, HMA, HSM, ACU, AES, AMO
	< 3	-	-	4				

\* N indica cultivos roturados siguiendo las curvas de nivel

R indica cultivos roturados siguiendo la línea de máxima pendiente



Figura 64. Mapa de isolinias  $I_1/I_d$  (MOPU, 1990). Para el archipiélago balear se adoptarán valores entre 11 y 12, mientras que para Canarias serán de 8 en la vertiente norte de las islas de marcado relieve y 9 en la vertiente sur y en las islas de suave topografía. En Ceuta y Melilla entre 10 y 11.

Para el cálculo de la intensidad de precipitación se emplea la siguiente ecuación:

$$I = \left(\frac{P_d}{24}\right) * \left[\left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{\left(\frac{28^{0,1} - t_c^{0,1}}{28^{0,1} - 1}\right)}\right]$$

Donde  $I_1/I_d$  es el cociente entre la intensidad de lluvia horaria y la diaria (independiente del periodo de retorno), y que ha sido regionalizado a nivel nacional según se muestra en la Figura 64.  $P_d$  es la precipitación máxima diaria corregida según el tamaño de la cuenca (en mm) y para un determinado periodo de retorno;  $t_c$  es el tiempo de concentración, expresado en horas y que representa el tiempo que tarda en alcanzar una gota de agua su punto de desagüe desde el punto más alejado en la cuenca. El factor corrector por área ( $K_a$ ) corrige la

precipitación diaria para expresar la distribución heterogénea de ésta. Se formula según la siguiente ecuación:

$$K_a = 1 - \left[ \frac{\log_{10}(A)}{15} \right]$$

Donde  $A$  es el área en  $\text{km}^2$ . Por su parte, el  $t_c$  se calcula según la siguiente ecuación:

$$t_c = 0,3 * \left[ \left( \frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76} \right]$$

Donde  $L$  es la longitud del cauce principal (km) y  $J$  la pendiente media del cauce.

Al objeto de incluir las abstracciones de la lluvia neta en el intervalo de tiempo  $t_c$ , se aplica un factor denominado “coeficiente de uniformidad” ( $K$ ) que se calcula según la siguiente ecuación:

$$K = 1 + \left( \frac{t_c^{1,25}}{t_c^{1,25} + 14} \right)$$

### Comparación de resultados

Tanto los resultados finales como los resultados intermedios se han ido cotejando con otros estudios parciales disponibles, principalmente de los Consejos Insulares de Aguas con información publicada. Las discrepancias proceden, en general, de los distintos elementos de criterio subjetivo o experto de la aplicación práctica de los procedimientos, sin diferencias significativas desde el punto de vista de las incertidumbres inherentes al proceso de cálculo; es decir, que la variación de los resultados de este proyecto en comparación con las variaciones de otras comparaciones es del mismo orden de magnitud. De forma puntual sí se han detectado discrepancias importantes (Tabla 15), que sobre la cartografía se han identificado como capturas fluviales artificiales como consecuencia de obstrucciones al flujo virtuales. Estas obstrucciones al flujo son elementos de infraestructura no depurados de los MDEs del IGN (puentes, alcantarillas, etc.), que en algunos casos producen una desviación de las líneas de flujo que llegan a ser significativas. Estos casos se pudieron subsanar gracias a la supervisión geomorfológica, pero no fueron eliminados de las coberturas del cálculo en términos de flujo.

Tabla 15. Comparación de resultados de cálculo de escorrentía para Gran Canaria.

Cuenca	GeoMEP	Racional	Isócronas	GeoMEP vs Racional	GeoMEP vs Isócronas	Racional vs Isócronas
<b>Guinguada</b>	512,91	394,42	518,7	23,10	-1,13	23,96
<b>Telde</b>	606,38	376,77	544,1	37,87	10,27	30,75
<b>Guayadeque</b>	374,68	93,3	116,1	75,10	69,01	19,64
<b>Tirajana</b>	803,53	488,65	763,2	39,19	5,02	35,97
<b>Arguineguín</b>	640,25	523,34	858,5	18,26	-34,09	39,04
<b>Mogán</b>	247,59	176,18	265,3	28,84	-7,15	33,59
<b>La aldea</b>	1421,96	792,93	1175,8	44,24	17,31	32,56
<b>Agaete</b>	246,67	266,97	358,3	-8,23	-45,25	25,49
<b>Moya</b>	185,6	194,46	259,7	-4,77	-39,92	25,12
<b>Azuaje</b>	216,82	279,3	355	-28,82	-63,73	21,32
<b>Tenoya</b>	197,18	231,38	296,6	-17,34	-50,42	21,99
<b>Maspalomas</b>	1059,62	508,1	875,9	52,05	17,34	41,99

En concreto, para la Isla de Gran Canaria el método empleado en este estudio sobreestima los cálculos en cuatro de las 12 cuencas comparadas respecto a los métodos empleados por [CIAGC \(2009\)](#) sin considerar el dato de la captura fluvial artificial (Guayadeque); subestima los resultados para cuatro cuencas y adquiere valores intermedios en tres cuencas, pero siempre manteniéndose en un orden de magnitud razonable (equiparable a las diferencias entre los otros métodos entre sí). Se puede considerar por tanto que el método empleado con carácter prospectivo general para el archipiélago produce resultados óptimos para los objetivos previstos en este estudio, pero no se garantiza su validez para casos de estudio de detalle u otros usos diferentes.

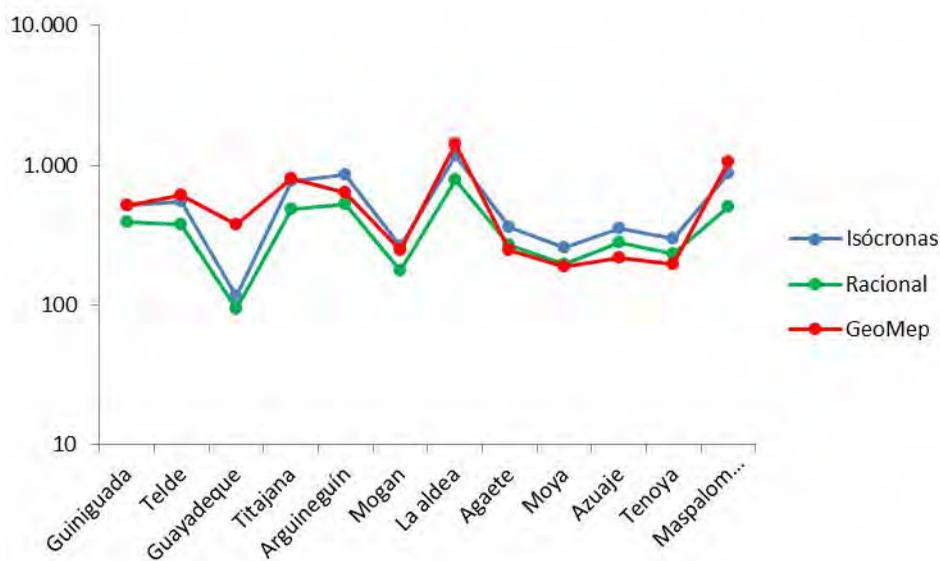


Figura 65. Gráfico de resultados comparativos por cuenca, en m<sup>3</sup>/s. En azul, método de las isócronas, en verde, método racional (CIAGC, 2009), y en rojo, GeoMep. Los puntos se muestran unidos por una línea para facilitar la lectura del gráfico.

En relación a la obtención de la mancha de inundación, no se ha podido comparar con otros trabajos, pero sí se ha podido contrastar con los datos de daños históricos. Intersectando la BBDD del modelo supervisado con la BBDD de daños del CCS se obtiene que un 53 % de los daños caen dentro de las manchas de inundación, cifra que se eleva a un 61 % si sólo se consideran los datos con precisión igual o mejor que calle. El 39% restante de los daños quedan fuera de la mancha de inundación derivada del modelo supervisado. Tal vez se deba a que una parte de los daños no responde a un modelo de inundación ligado a la red fluvial, sino que posiblemente esté relacionado con procesos de inundación en mantos de arroyada (*sheet flows*), cuyos depósitos han sido identificados en algunas zonas del archipiélago, y a inundaciones relacionadas con otros procesos (obstrucción de desagües naturales, problemas de drenaje urbano, etc.). Para minimizar este efecto, se incluyó la evaluación de los grupos de daños, forzando a incluir como superficie inundable a una región de influencia de los puntos registrados como daño, tras el análisis del comportamiento de éstos con la distancia, algo que se tratará más adelante en el apartado *Análisis histórico*. Este análisis incluyó exclusivamente a los registros cuya geolocalización fue igual o mejor que calle.

### 4.3. Modelo hidráulico empírico en un SIG

La teoría básica de la mecánica de fluidos establece que se han de cumplir tres principios de conservación: conservación de la masa (Ley de Lomonosov-Lavoisier), la conservación del momento (Segunda Ley de Newton) y la conservación de la energía (Primera Ley de la Termodinámica).

La Ley de Lomonosov-Lavoisier establece lo siguiente:

$$\int_s \dot{m} dA = \frac{dM}{dt}$$

Donde  $\dot{m}$  es el caudal másico en una sección dada,  $M$  la masa en la sección dada y  $t$  el tiempo. Si el fluido es incompresible, la masa se puede simplificar por volumen y en condiciones estacionarias esto conduce a  $Q = \text{constante}$ .

La Segunda Ley de Newton se puede expresar del siguiente modo:

$$\frac{d}{dt}(m \times \vec{V}) = \sum \vec{F}$$

Donde  $\vec{F}$  es el vector fuerza actuando sobre el volumen dado y  $\vec{V}$  es el vector velocidad del volumen dado. Para un fluido newtoniano y asumiendo viscosidad ( $\mu$ ) y densidad ( $\rho$ ) constantes, la ecuación puede escribirse en la dirección  $x$  como:

$$\rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = \rho g x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right)$$

Donde  $V_x$ ,  $V_y$  y  $V_z$  son las componentes de la velocidad en las direcciones correspondientes.  $P$  es la presión y  $gx$  es el resultado de la aceleración de la gravedad u otras fuerzas volumétricas en la dirección  $x$ . Añadiendo las otras dos componentes espaciales se obtiene un sistema de ecuaciones conocidas como Ecuaciones de Navier-Stokes.

Por su parte, la ecuación de la energía se formula del siguiente modo:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ_h}{dt} - \frac{dW}{dt}$$

Donde  $E$  es la energía;  $Q_h$  es el calor añadido al sistema y  $W$  es el trabajo realizado por el sistema. La energía del sistema es la suma del potencial ( $gz$ ), la cinética ( $V^2/2$ ) y la energía interna.

La complejidad de estos principios hace que sea imposible resolver las ecuaciones sin asumir un cierto grado de simplificación (Toombes y Chanson, 2011). Las simplificaciones en los métodos numéricos pueden ser sobre el ámbito espacial y las propiedades de geometría, sobre relaciones temporales (flujo estacionario o cuasi estacionario), sobre las propiedades del fluido (despreciando alguna o varias de sus propiedades, como la viscosidad, la tensión superficial, densidad y temperatura constantes, etc.) y hasta el uso de métodos empíricos (ecuación de Manning, modelos de turbulencia). Con frecuencia ocurre que muchos modelos asumen simplificaciones sobre el modelo físico y además sustituyen alguna variable por coeficientes determinados de modo empírico (Toombes y Chanson, 2011). Así, el método más empleado para pequeñas obras de drenaje superficial o para canalizaciones o en general para secciones sencillas de flujo en lámina libre, es el método empírico de Gauckler–Manning–Strickler, (Ecuación de Manning). Por “sección sencilla” se debe entender a aquella de lecho fijo y bajo gradiente hipsométrico, donde el vector velocidad de cualquier partícula en la sección se pueda aproximar a una línea recta normal a la sección. Estas condiciones se suelen cumplir en pequeñas obras de drenaje superficial (cunetas, pequeños acueductos y canales). Esta ecuación es de tipo unidimensional y válida para una sección, suponiendo que no existe influencia de la sección anterior ni de la siguiente (no hay resalto hidráulico, ni hay rápidos). Cuando se requiere de una solución algo más sofisticada, con secciones irregulares y con influencia entre secciones, el método más extendido es el de la ecuación de la energía, que se hizo especialmente popular con el desarrollo del software de libre distribución HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre; River Analysis System), un modelo hidráulico unidimensional gradualmente variado. Como modelo unidimensional, y al igual que en el caso anterior, también es necesario que se cumplan algunos requisitos, como una pendiente relativamente pequeña (menores que el 10% según USACE 2010, porque el modelo asume que el seno de la pendiente del canal es cero y el coseno uno, simplificando así muchas implicaciones geométricas) y una sección en la que se pueda presuponer que la velocidad media es un vector normal a la sección. Cuando en una sección existen divergencias de flujo, como en zonas muy llanas y abiertas (llanuras de inundación), o zonas donde se pueda esperar una avulsión o cambio brusco en el trazado de un cauce, o con calados pequeños o variaciones de calado muy significativas en la sección, entran en juego los modelos bidimensionales. En estos, habitualmente se resuelven las ecuaciones de Saint Venant integradas en profundidad y se alimenta al modelo con muchos más datos del relieve que en el

caso anterior, pues se utiliza un modelo digital de elevaciones completo (desapareciendo el concepto de “sección representativa”). Las modelizaciones 3D se utilizan raras veces, el motivo es que si bien superan muchas de las limitaciones impuestas por las simplificaciones 1D y 2D, añaden varios órdenes de magnitud a la complejidad numérica. Son numerosos los trabajos que comparan las ventajas entre unos y otros modelos y simplificaciones, métodos de resolución, tiempos de cómputo y efectos derivados de variar diferentes parámetros, concluyendo, como no puede ser de otro modo, que cada nivel de simplificación se ajusta con mayor o menor bondad a unos casos u otros (Díez et al., 2008; Linés et al., 2008).

Para el presente proyecto, la principal limitación son los recursos para resolver el problema planteado así como los datos disponibles y las dimensiones del problema a evaluar. Los modelos tridimensionales o de órdenes superiores quedan inmediatamente descartados por su complejidad numérica y tiempos de cómputo; los bidimensionales, presentan tiempos de cómputo y requisitos en lo que a condiciones de contorno se refiere que tampoco permiten su adecuada implementación en plazo y forma. Si bien HEC-RAS es capaz de solucionar redes tan complejas como resulte posible diseñar, también queda descartado por las dimensiones del problema a estudiar y la gran cantidad de condiciones de contorno a considerar para el problema planteado. Un modelo empírico sencillo representa para este caso, en concreto, una alternativa válida en la medida en que los resultados sean interpretados como una mera aproximación estadística de valores en términos de promedios, conscientes de que a pesar de usar datos incluso de escala 1/5.000, no pueden ser interpretados a escalas mayores que 1/25.000 o incluso 1/50.000, y que el objetivo final, no es tanto la determinación de la mancha exacta de inundación como tener un valor promediado del alcance de la inundación en términos de códigos postales o términos municipales. De este modo cabe esperar que muchos de los errores sean errores compensados.

La ecuación de Manning, como ya se ha comentado, se determinó de modo empírico para situaciones relativamente sencillas, siendo una evolución de la fórmula de Chézy para el cálculo de la velocidad del agua en canales abiertos y tuberías. La fórmula de Chézy es la siguiente:

$$V(h) = C * \sqrt{R(h) * S}$$

Donde  $V(h)$  es la velocidad media del agua en m/s, que es función del calado  $h$ ;  $C$  es el coeficiente de Chézy;  $R(h)$  el radio hidráulico y  $S$  la pendiente. La fórmula de Manning adopta la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{n} * R(h)^{1/6}$$

Donde  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning (en  $s/m^{1/3}$ ; estimado por correspondencia con usos del suelo, Tabla 16). Por sustitución se obtiene:

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * \sqrt{S}$$

Tabla 16. Tabla de correspondencias de usos del suelo y valores del coeficiente de rugosidad de Manning.

USDA	n Manning
Barbecho	0,0362
Cultivos en hilera	0,0422
Cereales de invierno	0,0400
Rotación de cultivos pobres	0,0350
Rotación de cultivos densos	0,0482
Praderas	0,0362
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	0,0844
Masas forestales (bosque, monte bajo, etc.).	0,1206
Rocas permeables	0,0482
Rocas impermeables	0,0317

En el Sistema Internacional de Unidades y añadiendo la componente areal para determinar caudales, la fórmula de Manning se puede expresar como:

$$Q(h) = \frac{1}{n} * \frac{A(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}} * \sqrt{S}$$

Siendo  $A(h)$  el área mojada en  $m^2$  que es función del calado ( $h$ ); y  $P(h)$  el perímetro mojado en m, que es función del calado,  $h$ . En realidad, dado que se dispone de  $Q$  y del modelo digital de elevaciones, la forma de emplear esta ecuación es despejando las incógnitas en una igualdad:

$$\frac{Q(h) * n}{\sqrt{S}} = \frac{A(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}}$$

Donde la parte izquierda es conocida, y la parte derecha es desconocida y lo que se quiere determinar es el calado  $h$  que más se aproxima a la igualdad.

Dado que la mayor parte de las secciones de los barrancos canarios se puede considerar, en estado de avenida, como secciones unidimensionales y en las que se cumple que pequeñas variaciones en  $h$  producen cambios no significativos en la proyección del resultado a la escala de trabajo, el método de resolución adoptado es el cambio de signo en la desigualdad para incrementos de  $h$  de 0,5 m. De esta manera, se cumple que el resultado obtenido es válido con una incertidumbre de 25 cm, una variación en cota que no representa una variación significativa en la extensión inundable para la mayor parte de los casos. El algoritmo almacena el primer valor de  $h$  en la que se cumple la siguiente desigualdad:

$$\frac{Q(h) * n}{\sqrt{S}} \leq \frac{A(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}}$$

La forma numérica de resolver esta desigualdad en unos 7.000 km de cauces (donde intervienen más de 10 millones de tripletas en más de un millón de secciones) es por incrementos fijos de  $h$  e incrementos fijos en XY según el paso de malla del Modelo Digital de Elevaciones. Cada sección ( $S_i$ ), se define como la perpendicular a cada punto del talweg derivado del MDE (el punto más bajo en la sección de un cauce) considerando que la dirección de flujo ( $D_{S_i}^f$ ) de la sección ( $S_i$ ) debe ser similar al promedio de las direcciones de flujo ( $D_i^f$ ) a lo largo de una distancia aguas arriba y aguas abajo; una distancia que se establece en función de un número celdas ( $Nc$ ), cuyo tamaño es  $Cs$ :

$$D_{S(i)}^f = \frac{\sum_i^{i+Nc} D_i^f + \sum_i^{i-Nc} D_i^f}{2 * Nc * Cs}$$

La dirección de flujo se calculó siguiendo un modelo D8 en ArcGIS, reclasificando los resultados a su equivalente en radianes. El modelo cauces derivados del MDE se calculó con una corrección hidrológica al MDE para la eliminación de zonas endorreicas, y se reclasificó el flujo acumulado en números enteros de celdas vertientes para delimitar áreas de 1 km<sup>2</sup> (Figura 66).

El número de celdas para calcular el promedio de la dirección de flujo se determinó por evaluación de la desigualdad en varios puntos arbitrarios, tomados de modo aleatorio, y por análisis geomorfológico de diferentes tramos

de río. Para una distancia de 0 celdas, el resultado es una dirección de flujo muy inestable, con importantes variaciones en puntos sucesivos, y por tanto dando lugar a secciones no representativas. A medida que el número de celdas se incrementa, la variación en ángulo respecto a la línea que marca la mínima distancia de lado a lado de la llanura de inundación geomorfológica se estabiliza. Superado un determinado umbral, el efecto de estabilización se convierte en un efecto memoria o inercia que perjudica la representatividad de conjuntos de secciones a lo largo de tramos curvilíneos o meandriformes.

A lo largo de la normal a la dirección de flujo estimada, se busca el valor de  $Z$  por consultas al Modelo Digital de Elevaciones hasta que se cumple la desigualdad  $(Z_t + h) \geq Z > Z_t$ , siendo  $Z_t$  la cota del talweg. En cada paso de búsqueda se discretiza la sección de modo acumulando el área del intervalo avanzado en el que no se cumple la desigualdad (Figura 68). El motivo de incorporar en la desigualdad que  $Z$  deba ser siempre mayor que  $Z_t$  es evitar que una sección rellene el cauce de una sección próxima a una intersección. La aproximación a la sección mojada por segmentos resulta de la suma acumulada de cada uno de sus segmentos:

$$P(h) = \sum_i^n \sqrt{(L_{i+1} - L_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2}$$

Por su parte, el área mojada se puede estimar como la suma acumulada del área de tantos elementos discretos avanzados menos el área resultante hasta la cota de  $h$ :

$$A(h) = \left( \sum_i^n Cs_i * Z_i \right) - Z_h * n * Cs$$

Se ha comprobado, que con este método se cumplen los requisitos de precisión a la escala de trabajo para la mayor parte de los casos donde se cumplen las condiciones aplicables (Figura 69).

En las secciones donde existe mayor incertidumbre (Figura 69), cabe esperar que el propio modelo de señales de inestabilidad. Este método resuelve muy rápidamente el problema planteado pero requiere de una ulterior revisión que, con criterio geomorfológico, permita unir secciones sucesivas, y minimizar los efectos de inestabilidad.

En la Figura 70 y en la Figura 71 se muestra el histograma de calados (en el talweg, a intervalos de 50 cm) y el histograma de relación entre calados (a intervalos de 50 cm) y ancho de lámina libre (a intervalos de 10 m) obtenido por este método.

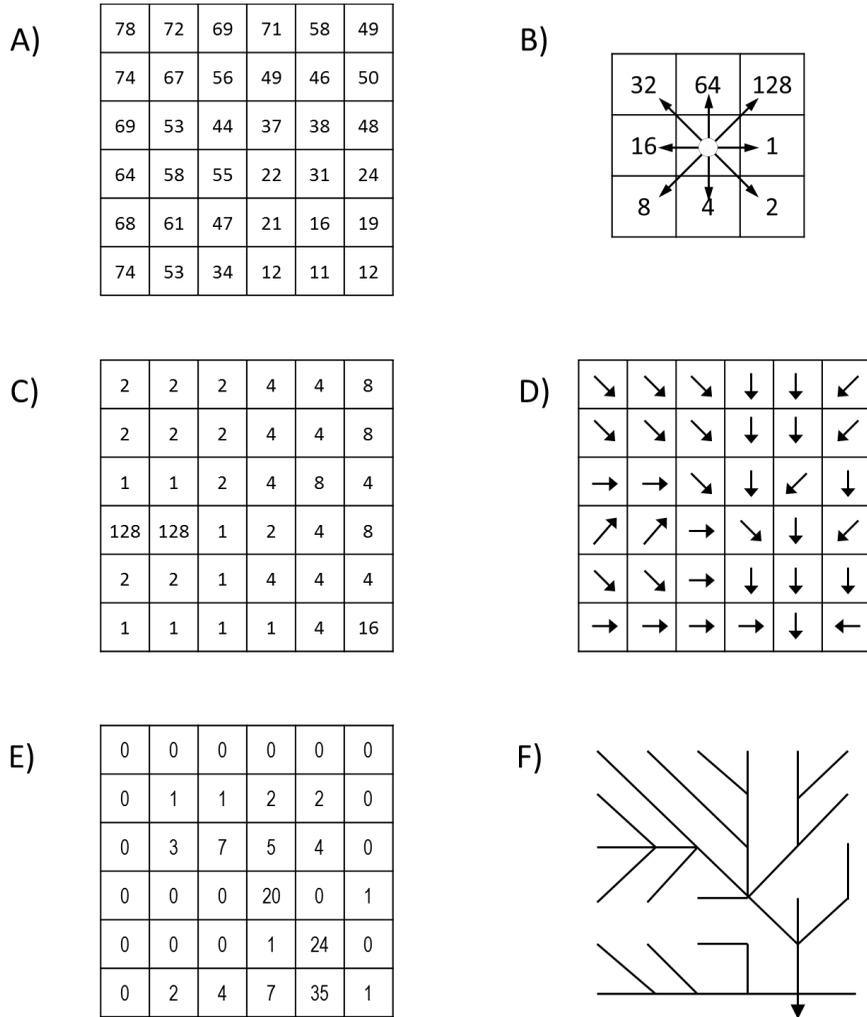


Figura 66. Esquema de cálculo de direcciones de flujo según el modelo. A) representa el MDE; B) codificación de dirección de flujo C) dirección de flujo interpretada en D). E) flujo acumulado y F representa gráficamente el significado del flujo acumulado.

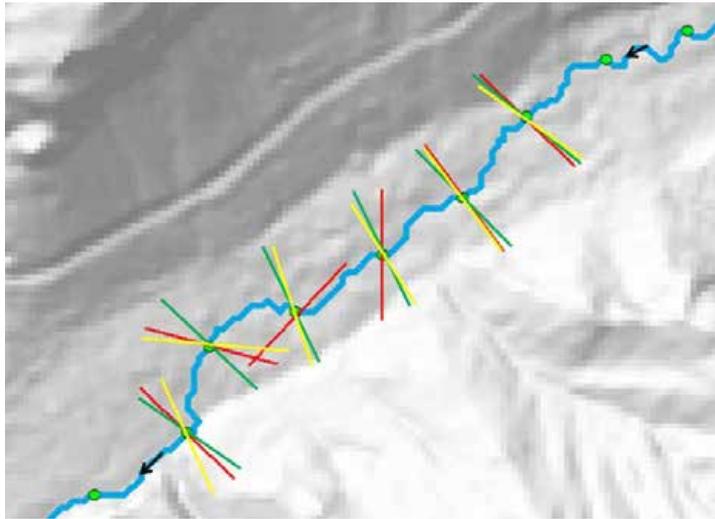


Figura 67. Distintas aproximaciones a la sección perpendicular. En rojo primera derivada un punto centrada. En verde, derivada a tres puntos centrada con distancia de 100m. En amarillo derivada un punto adelantada a 100m.

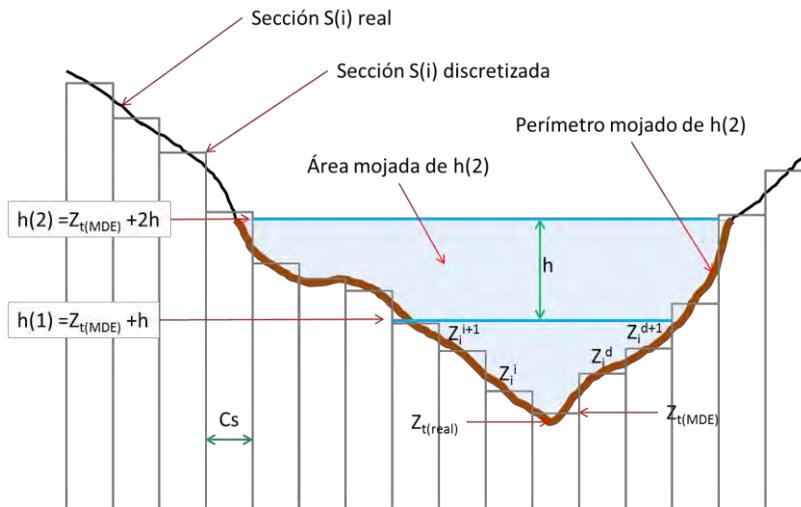


Figura 68. Discretización de una sección y nomenclatura utilizada.

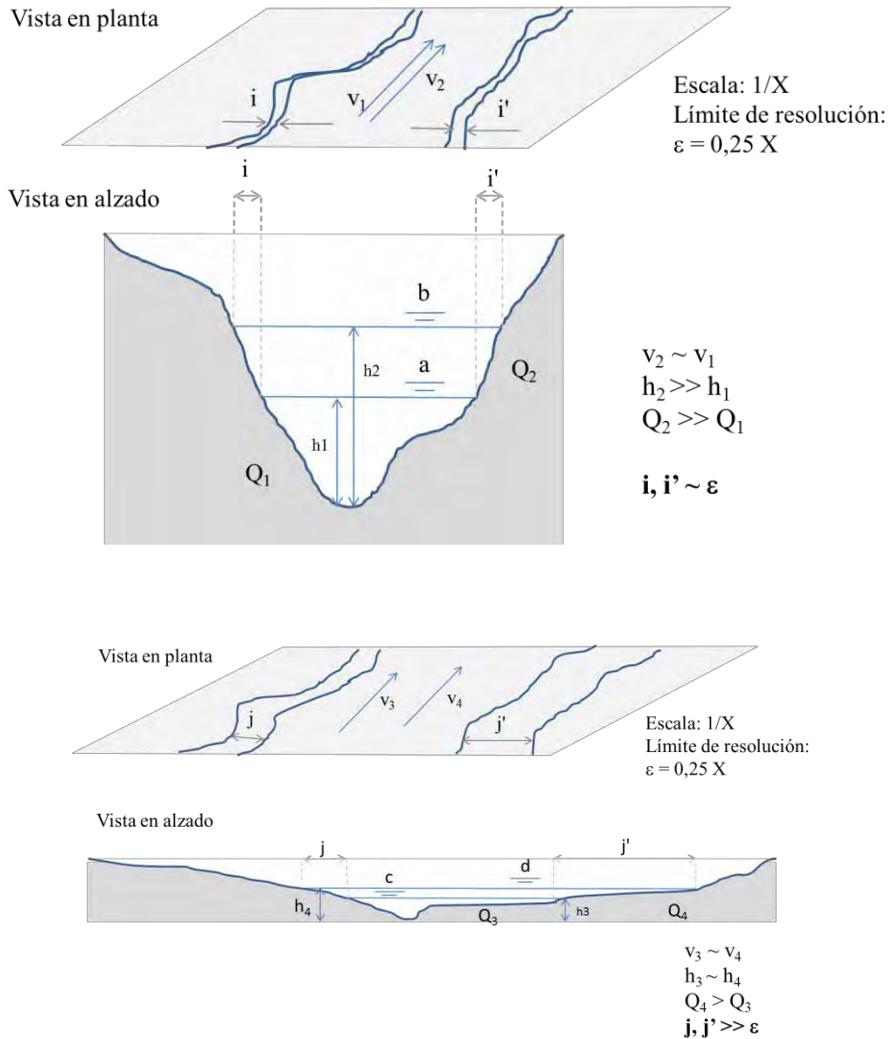


Figura 69. Errores cartográficos derivados del análisis hidráulico en dos secciones tipo. En la primera, la superior, la sección tipo permite importantes incrementos de  $Q$  sin que el efecto cartográfico sea representativo, y por tanto errores de estimación en el calado (y) no dan lugar a errores significativos en su representación cartográfica. En la sección inferior, pequeñas variaciones de calado dan lugar a diferencias muy significativas en la representación cartográfica.

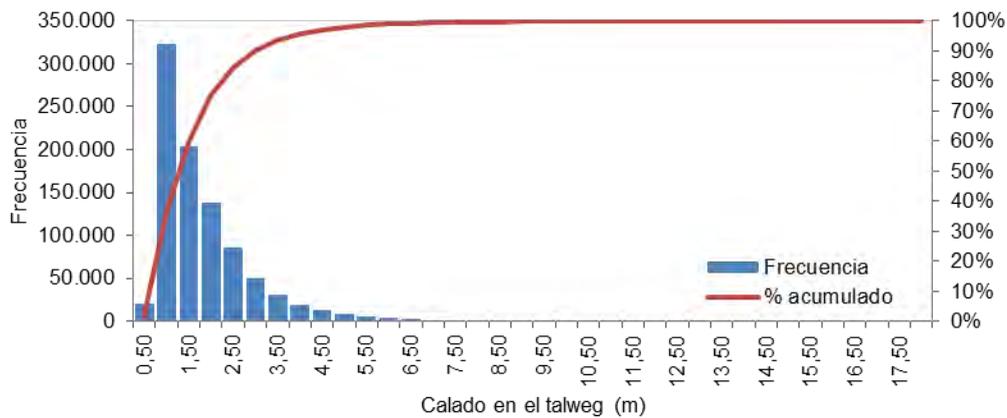


Figura 70. Histograma de calados calculados. El 90% acumulado presenta calados inferiores a 3 metros.

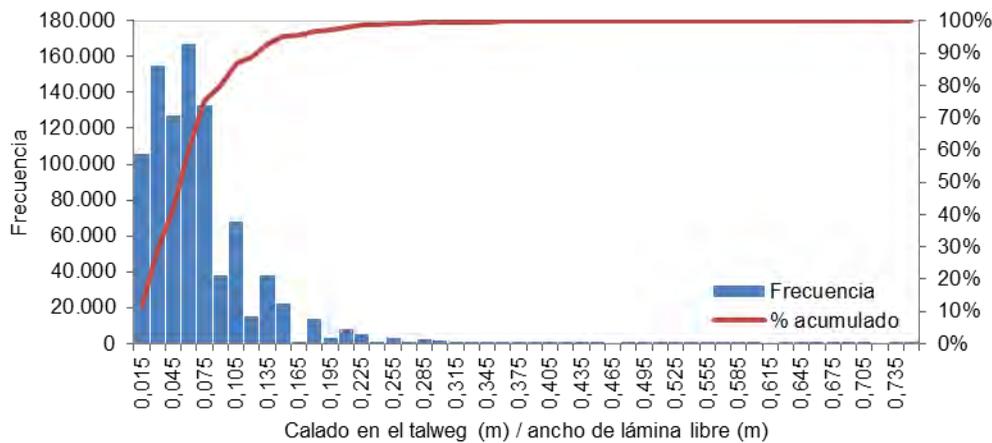


Figura 71. Histograma de relación calado vs ancho de lámina libre. El 90% acumulado presenta una relación inferior a 0,12.

Se ha comprobado que no existe correlación entre la relación calado/ancho de lámina libre con la altura absoluta, si bien la dispersión es menor a medida que crece la cota.

#### 4.4. Análisis geomorfológico

Un análisis geomorfológico completo es un estudio que se realiza en cuatro fases. En la primera se hace una recopilación de información básica sobre el territorio a

estudiar, lo que permite determinar el ambiente general gobernante (volcánico, sedimentario, etc.), recopilar antecedentes, realizar la síntesis de la cartografía geológica, hacerse con un catálogo de pares estereoscópicos verticales o elementos equivalentes, imágenes espaciales, mosaicos, Modelos Digitales de Elevaciones, etc. En la segunda etapa, se realiza una fotointerpretación es decir, una interpretación de la morfografía conforme con elementos que permitan identificar visualmente la configuración tridimensional del territorio. La tercera fase requiere trabajos de campo, recolección de muestras y caracterización de los materiales geológicos en términos de litologías, estructuras, texturas, edad, etc. Es en la última fase, con estos datos recopilados, en la que se genera la cartografía y se prepara la documentación de los trabajos. Según [Martín-Serrano et al. \(2005\)](#), el mapa geomorfológico en sentido estricto, expresa la agrupación morfodinámica funcional y relictas, así como aspectos relacionados con la morfogénesis. Es decir, se representan formas del terreno ya sean erosivas o de acumulación, activas o inactivas. Para este estudio, se han extraído de la cartografía GEODE aquellas formaciones geológicas en relación con la dinámica fluvial y de escorrentía superficial. Estos elementos se han utilizado como referencia de apoyo a la delineación de zonas inundables, junto con los resultados del cálculo hidrológico-hidráulico. En la Figura 72 se muestra un ejemplo de una zona que el modelo hidráulico es incapaz de resolver (un abanico detrítico); en la Figura 73 y en la Figura 74 se muestran dos ejemplos de cómo la geomorfología permite corregir errores derivados del MDE, y en la Figura 75 se muestra cómo la geología permite identificar zonas difíciles para la fotointerpretación.

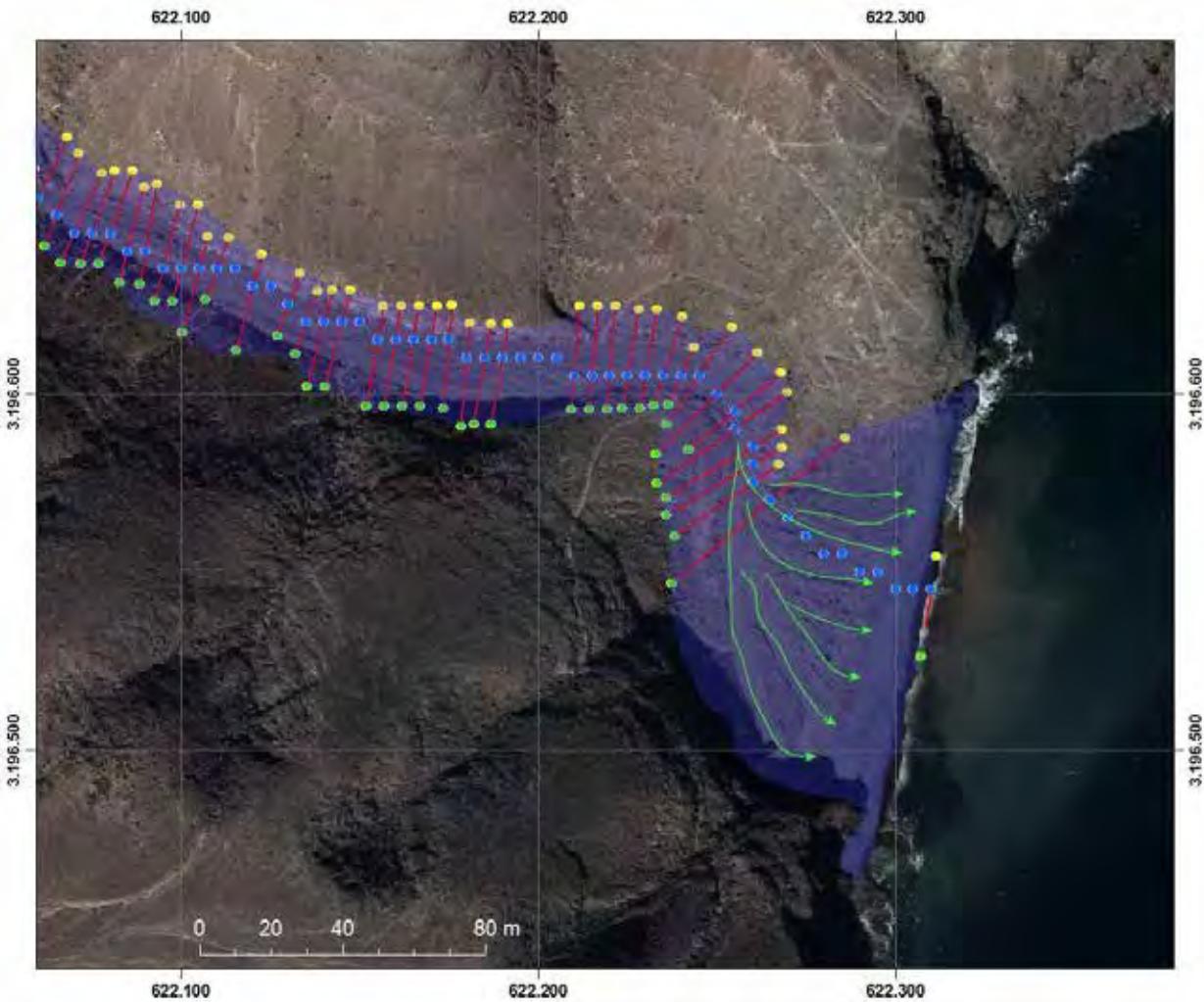


Figura 72. Delineación de zonas inundables con criterio combinado geomorfológico e hidrológico-hidráulico. Los puntos amarillos y verdes representan el extremo de la sección hidráulica calculada (en línea roja). Los puntos azules representan el trazado del cauce según el Modelo Digital de Elevaciones del IGN. El polígono azul transparente representa el estudio geomorfológico integrando la información hidráulica, fotointerpretación e información geológica (materiales de fondo de barranco y abanicos aluviales). Aquellos puntos azules sin línea roja asociada representan secciones complejas que el modelo hidráulico no es capaz de resolver. Las flechas verdes representan divergencias de flujo propias del abanico detrítico. Coordenadas en ETRS89 UTM28N.

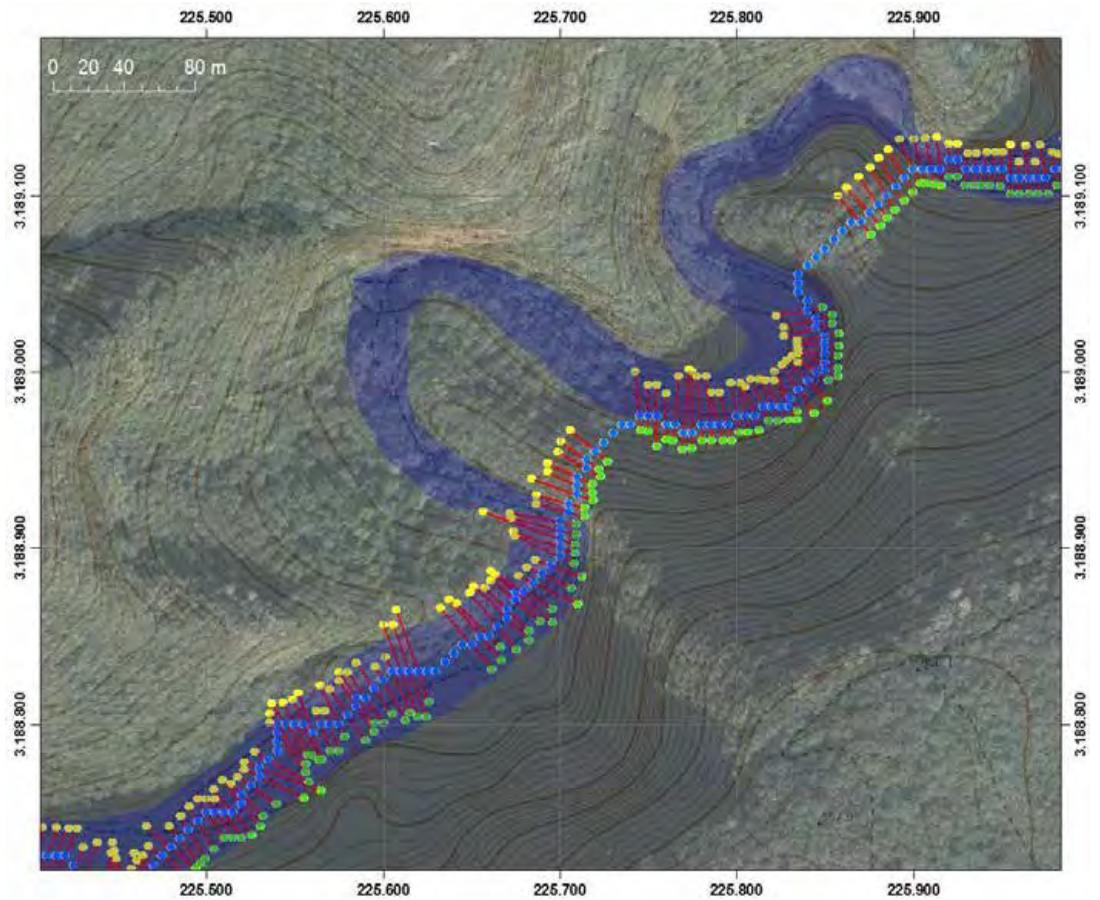


Figura 73. Delineación de zonas inundables con criterio combinado geomorfológico e hidrológico-hidráulico. En zonas muy encajadas se pueden observar desviaciones importantes del MDE respecto al trazado del cauce. Ver descripción de símbolos de la Figura 72.

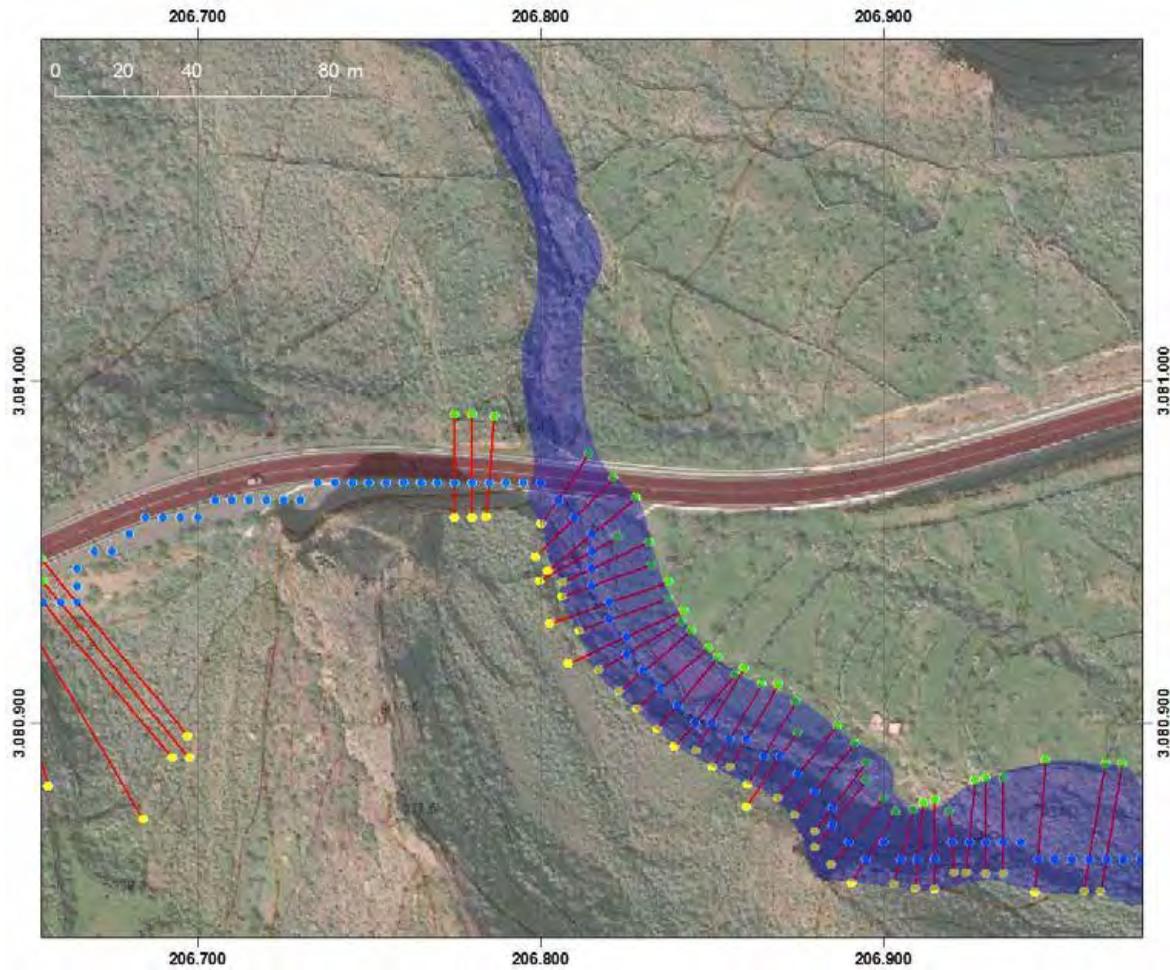


Figura 74. Delineación de zonas inundables con criterio combinado geomorfológico e hidrológico-hidráulico. Flujo desviado como consecuencia de una obstrucción al flujo procedente del MDE.

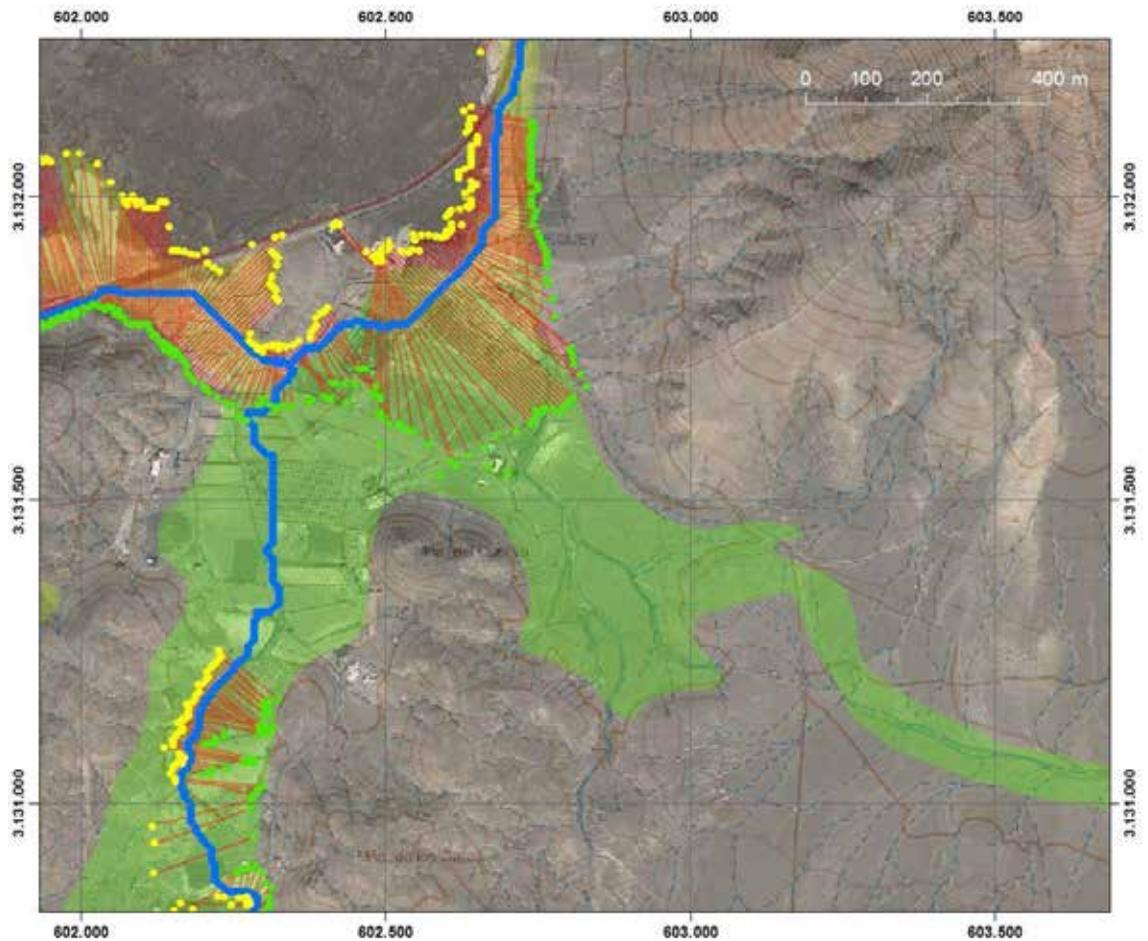


Figura 75. Delineación de zonas inundables en una zona compleja donde algunos barrancos no alcanzan un flujo acumulado suficiente en el MDE para ser identificados como cauces, y sin embargo, la información geológica refleja su alta actividad fluvial: los polígonos en verde y amarillo representan depósitos de barranco y aluviales recientes. Obsérvese la buena correlación del modelo con la geología en la zona norte, y la mala correlación en la zona sur.

Para este estudio se han identificado 29 unidades geológicas de la cartografía GEODE del IGME útiles para ser incluidas en el trabajo y que se pueden agrupar en diez tipos básicos, que son los siguientes:

### **1. Depósitos de barranco, fondos de valle o de barranco, arenas y cantos, indiferenciados**

Debido a la falta de precipitaciones y a la irregularidad de las mismas, los cauces suelen estar secos, pero en caso de lluvias fuertes, pueden funcionar como ramblas y arrastrar gran cantidad de material. Estos depósitos están constituidos mayoritariamente por arenas y gravas heterométricas, pero prácticamente monométricas, de composición fundamentalmente basáltica. La fracción arenosa es muy variable y presenta coloración gris. La potencia del depósito también es variable, con valores medios de 1,5 a 2,5 m.

La fracción de grava presenta tamaños variables desde 2 hasta 15 cm, generalmente sin ordenación ni imbricación de cantos, con raros lentejones horizontales de granulometría fina. En algunos depósitos hay bloques basálticos de hasta más de 1 m de diámetro, y cantos y arenas con tamaños de 1 a 40 cm.

### **2. Canales y barras de gravas longitudinales y laterales**

Se trata de cuerpos de gravas con base cóncava y techo plano, de espesor variable entre 0,40 y 3 m, con una extensión o anchura media de 1,5 a 5 m. Tienen base erosiva tapizada con lag de cantos. En general muestran granoclasificación positiva, con estratificaciones cruzadas de surco y de tipo planar. Es frecuente encontrar canales con rellenos multiepisódicos, formados por dos o más unidades de gravas separadas por superficies erosivas. En algunos casos se observan canales con morfología "*ribbons*", o canales con alas, mientras que en otros casos se presenta el sedimento granosoportado donde se reconocen superficies de acreción lateral difusas y estratificación cruzada planar.

Las barras fluviales son cuerpos con morfología lenticular o en algunos casos sigmoidal, con un espesor variable entre 0,50 y 1 m, que se acuñan lateralmente y están constituidos por gravas granosoportadas con matriz arenosa. Presentan un núcleo masivo de gravas sobre el que se desarrolla una estratificación cruzada planar y de surco, con caras de avalancha mal definidas y, con dificultad por el tamaño de grano, se pueden llegar a apreciar superficies de acreción. Se pueden observar cantos alineados.

### **3. Gravas de mantos de arroyada (*sheet floods*)**

Son cuerpos tabulares de conglomerados y gravas granosoportados, que ocupan una extensión lateral variable, en general de una decena de metros, cuyo espesor varía entre 0,30 y 0,70 m. En la base presentan cicatrices erosivas e interiormente

se puede observar una laminación paralela y cruzada planar de alto régimen de flujo. A veces esta laminación es difusa, dado el tipo de depósito, con cantos imbricados y alineaciones de clastos.

#### **4. Depósitos de tamiz (sieve)**

Son cuerpos lobulados constituidos por gravas sin matriz, con una media de 0,20 m de espesor. Se acuñan lateralmente y pueden aparecer relacionados con *sheet floods*. Son depósitos formados en zonas con bastante permeabilidad, con una carga de sedimento pobre en material fino, donde se produce una infiltración rápida de todo el flujo acuoso, denominados como depósitos de tamiz, situados en la zona proximal.

#### **5. Suelos**

Se trata de pequeños recubrimientos, de apenas uno o dos metros de espesor, desarrollados sobre las coladas basálticas del tramo inferior de la fase miocena. Están constituidos por material detrítico, arenas finas de color marrón con limos dispersos y bolsadas de cantos que parecen aportes de barranco.

#### **6. Aluviales; arenas y conglomerados; arenas y arcillas; rellenos de barranco y terrazas aluviales, aluviales indiferenciados**

Mientras que algunos depósitos están constituidos por arenas y gravas heterométricas de composición mayoritariamente basáltica, otros están formadas por acarreo redondeados y poligénicos, incluyendo lavas submarinas, traquitas, rocas plutónicas de diversa composición (gabros, sienitas) y basaltos (lavas y aglomerados volcánicos). Los tamaños más frecuentes se sitúan entre los 2 y 12 cm si bien se pueden observar incluso grandes bloques, pero con potencias de no más de 4 m. En otros casos, los depósitos son de granulometría fina, de color marrón-anaranjado y carácter terroso, que engloban a veces algunos niveles de cantos. Generalmente no presentan estratificaciones ni estructuras sedimentarias llamativas. En los depósitos de grano más grueso, la matriz es arenosa y en general poco abundante, conformando un depósito principalmente granosoportado. Los espesores visibles alcanzan entre uno y dos metros.

En el caso de depósitos aluviales indiferenciados, estos están formados por una matriz arenosa de grano medio a fino, que engloba cantos angulosos y subangulosos, de litologías basálticas y de tamaños variables, desde milimétricos hasta fragmentos del orden de 20 a 40 cm de diámetro. Presentan una

estratificación laminar subparalela y en algunos cortes se observa granoselección en los cantos.

### **7. Debris flows**

Se trata de niveles de paraconglomerados con los clastos soportados por la matriz, dispuestos en cuerpos de uno a dos metros de espesor, con la base y el techo planos, sin capacidad erosiva, que incluso se pueden adaptar a morfologías preexistentes. Se encuentran bloques de hasta 0,80 m de diámetro, flotando en una matriz arenosa-arcillosa, pudiendo presentar granoclasificación positiva a techo del depósito.

### **8. Conos de deyección**

Son cuerpos de acumulación de bloques y de geometría pseudo-triangular. A menudo se presentan coalescentes, solapándose unos con otros según disminuye la pendiente en sus partes más distales. Tienen mayor desarrollo longitudinal que los coluviones y suponen una rampa de enlace entre el cauce del barranco o valle y las partes intermedias de los relieves. Son depósitos detríticos mal seleccionados, formados por acumulaciones de cantos y bloques subangulosos de litologías diversas, empastados en una matriz de tipo arenoso fina. No tienen estructuración interna.

### **9. Coluviones; depósitos aluvio-coluviales (arenas y arcillas)**

En general se trata de depósitos de poco espesor (menos de cinco metros), constituidos por arenas, limos y arcillas de color marrón-rojizo. Ocasionalmente se observan algunas intercalaciones de material detrítico que constituyen aportes coluvionares de los relieves próximos. A veces presentan una morfología triangular (con el vértice hacia cabecera) con materiales detríticos gruesos de matriz arenosa, y con cantos heterométricos de tendencia angulosa dispuestos sin ordenación.

### **10. Depósitos de ladera; de deslizamientos gravitacionales y coladas de derrubios**

Estos depósitos se forman en zonas con pendientes pronunciadas debido a la fuerte erosión. La acumulación de estos depósitos se facilita cuando se forma previamente una superficie de asentamiento alejada de la erosión. Presentan la típica estructura en capas heterométricas y de depósitos caóticos, que pueden tener un origen diverso. Los fragmentos son de formas angulosas y la matriz que los envuelve es arenosa. La consolidación de los depósitos es baja, siendo su

estabilidad bastante precaria. En algunos casos están parcialmente cementados por caliche, adquiriendo algo más de cohesión.

Gracias a la fotointerpretación, se han podido además, identificar los siguientes elementos, en comparación con la información obtenida por el método del cálculo hidráulico:

- Buena correspondencia entre el modelo hidrológico-hidráulico y la interpretación geomorfológica.
- Discrepancia leve entre los datos geomorfológicos y el modelo hidrológico-hidráulico; generalmente son efectos derivados bien de errores en la topografía o delineación de la red, o bien debido al efecto de eliminación de zonas endorreicas.
- Discrepancia grave entre los datos geomorfológicos y el modelo hidrológico-hidráulico; generalmente se trata de una desviación importante de un cauce debido a la presencia de una obstrucción al flujo, que en ocasiones llega a ocasionar la captura del cauce por parte de otro canal.
- Obstrucciones al flujo; puentes, alcantarillas, etc., que causan desviaciones importantes en el modelo hidrológico. Estas llamadas obstrucciones son resultado de un MDE en el que no se han eliminado puentes y otras infraestructuras que pueden permitir el paso del flujo.
- Posible inundación de infraestructura significativa; puntos donde el flujo alcanza la boca de un túnel.
- Presas, embalses, y otros endorreísmos naturales o antrópicos.
- Delineación avanzada con criterio geomorfológico; deltas activos, abanicos aluviales, conos de deyección activos, meandros con canales de aguas altas, etc.
- Tramos canalizados.
- Discrepancia entre el modelo hidrológico-hidráulico y la cartografía oficial, identificando el modelo un tramo de río no delineado y de escasa incisión hídrica.
- Playas y zonas costeras susceptibles a inundarse.

## 4.5. Análisis histórico

Para completar el análisis de inundabilidad, se incorporó a la anterior delineación la información procedente de eventos o siniestralidades del Consorcio de Compensación de Seguros, que aquí se ha dado en denominar análisis histórico porque representa un catálogo de localizaciones donde se han identificado daños materiales como consecuencia de un episodio de inundación.

La BBDD de siniestralidades del CCS contiene un total de 11.469 reclamaciones de 27 fechas únicas. El primer año con datos es el 1999 y hay un total de 12 años con datos. El importe total reclamado asciende a algo más de 100 millones de euros (acumulados no actualizados), siendo el importe total indemnizado de algo más de 70 millones de euros (acumulados no actualizados), equivalentes a unos 87 millones de febrero de 2012 (unos 7,25 millones de euros anuales). Desde el año 2000, el CCS dispone de un sistema de información geográfica que permite georreferenciar de forma masiva las reclamaciones que recibe. Existen varios niveles de georreferenciación, ordenados de mayor a menor precisión: calle y número, código postal de grandes núcleos de población, entidad de población y código postal de restantes núcleos de población. El sistema de referencia empleado es ED50 UTM huso 30N extendido, si bien en 2015 se ha pasado a emplear el datum ETRS-89 conforme a la actualización de la norma española y (BOE 207, de 29 de agosto de 2007) y de acuerdo a la Directiva Europea INSPIRE (Directiva 2007/2/CE). Para poder explotar los datos no georreferenciados se procedió a geocodificar empleando dos algoritmos de aproximación, uno implementado en el buscador Google, y otro en el buscador de Yahoo. Se escogieron estos dos métodos por su facilidad de acceso y simplificación en el método de búsqueda masiva. Comparando resultados se pudo comprobar que ambos métodos presentaban resultados similares, con algunos datos completamente no localizados (campo de dirección del evento vacío o con errores de otro tipo), y diferentes grados de aproximación para los restantes, desde estado o región hasta edificio singular. Se comprobaron las diferencias entre ambos buscadores, dando como posibles resultados la localización a seis niveles con o sin concordancia entre localizadores. En la BBDD correspondiente se identificó el grado de precisión con un índice de 0 (no localizado) a 6 edificio singular, pasando por los códigos 1 (estado o región), 2 (ciudad), 3 (código postal), 4 (calle), 5 (calle y número de calle). Con el subcódigo 5 se indica si el nivel de geocodificación coincide con ambos buscadores y 0 para no concordancia. Con el código 99 se señalaron los elementos con coordenadas

obtenidas por medio de GPS. Gracias a este nivel de detalle en lo que a codificación se refiere se pudieron realizar diferentes ensayos del comportamiento de la BBDD, concluyendo que a los efectos de este estudio, se trabajaría con la precisión calle y número como mínimo, representando casi un 70% de los datos no geocodificados en términos de indemnización económica, y un 60% en términos de número de siniestros.

Al objeto de trabajar con los valores económicos como índices de valor actual, es decir, para poder comparar indemnizaciones de diferentes fechas, es necesario actualizar o normalizar los valores a una fecha dada (en este caso, febrero de 2012). Para ello se utiliza el método del Índice de Precios de Consumo (IPC). Este método establece que las rentas entre dos meses, siendo ambos anteriores al mes de enero de 2002 o bien ambos posteriores a enero de 2002 se calculan según la siguiente fórmula:

$$V_A = V_i \frac{IPC_{Mf}}{IPC_{Mi}}$$

Donde  $V_A$  es el valor actualizado,  $V_i$  el valor inicial,  $IPC_{Mf}$  es el IPC del mes final e  $IPC_{Mi}$  es el IPC del mes inicial. Cuando los valores a actualizar son, uno anterior y otro posterior a enero de 2002 se emplea a la siguiente ecuación:

$$V_A = V_i \frac{LAU_{Mf}}{IPC_{Mi}}$$

Donde  $LAU_{Mf}$  (índice Ley de Arrendamientos Urbanos) es un índice tabulado del mes final.

Siguiendo esta metodología, las indemnizaciones quedarían registradas tal y como figura en la Tabla 17 y en la Tabla 18.

Tabla 17. Indemnizaciones actualizadas (en euros) al 1/02/2012 por fechas.

Fecha	Nº de reclamaciones	Nº siniestros	€	Valor medio por siniestro (€)
05/01/1999	72	20	526.307	26.315
11/11/2000	247	110	1.316.158	11.965
04/11/2001	66	31	150.922	4.868
20/11/2001	1120	721	11.024.909	15.291
31/03/2002	3576	1963	40.804.946	20.787
12/12/2002	568	301	5.036.696	16.733
12/12/2004	12	9	51.838	5.760
17/01/2005	40	32	1.350.416	42.201
18/08/2005	32	20	1.412.950	70.648
16/11/2005	7	6	33.358	5.560
24/01/2006	260	205	2.215.989	10.810
28/10/2006	219	163	853.731	5.238
31/10/2006	227	153	1.131.552	7.396
26/01/2007	60	40	371.948	9.299
27/01/2007	51	23	158.263	6.881
14/03/2007	58	47	131.868	2.806
17/03/2007	41	31	155.336	5.011
22/11/2007	119	97	1.649.705	17.007
13/12/2007	48	26	198.417	7.631
27/03/2009	29	24	127.312	5.305
16/11/2009	259	183	1.246.913	6.814
17/11/2009	75	39	155.424	3.985
21/12/2009	82	54	439.973	8.148
01/02/2010	3771	2506	15.378.855	6.137
24/01/2011	226	151	530.414	3.513
29/01/2011	195	121	513.265	4.242
16/04/2011	9	6	13.900	2.317
Total	11.469	7.082	86.981.366	12.321

Tabla 18. Indemnizaciones (en euros) actualizadas al 1/02/2012 por isla (el 0,15% de los datos no pudo ser asignado con seguridad a ninguna isla).

Isla	€	%	Fechas con siniestro
Tenerife	62.137.174	71,44	16
La Palma	836.224	0,96	5
El Hierro	163.742	0,19	5
La Gomera	1.675.749	1,93	8
Gran Canaria	20.055.985	23,06	16
Fuerteventura	1.323.793	1,52	5
Lanzarote	654.364	0,75	9
Total	86.847.031	99,85	27

Representar las fechas de los siniestros y la ratio de indemnización que se encuentra geolocalizada con precisión mejor que calle, ayuda a comprender mejor la calidad de los datos que originalmente no disponen de posicionamiento instrumental (GPS). Como se puede observar en la Figura 76, hay 15 fechas (“eventos”), cuya ratio se encuentra por encima del 50%, y tan sólo 6 fechas por debajo del 40%. Por encima del 70% económico, hay ocho fechas. Es decir, la representatividad en términos económicos de los eventos es relativamente escasa, puesto que tan sólo un 30% de las fechas es capaz de reflejar al menos un 70% de las indemnizaciones.

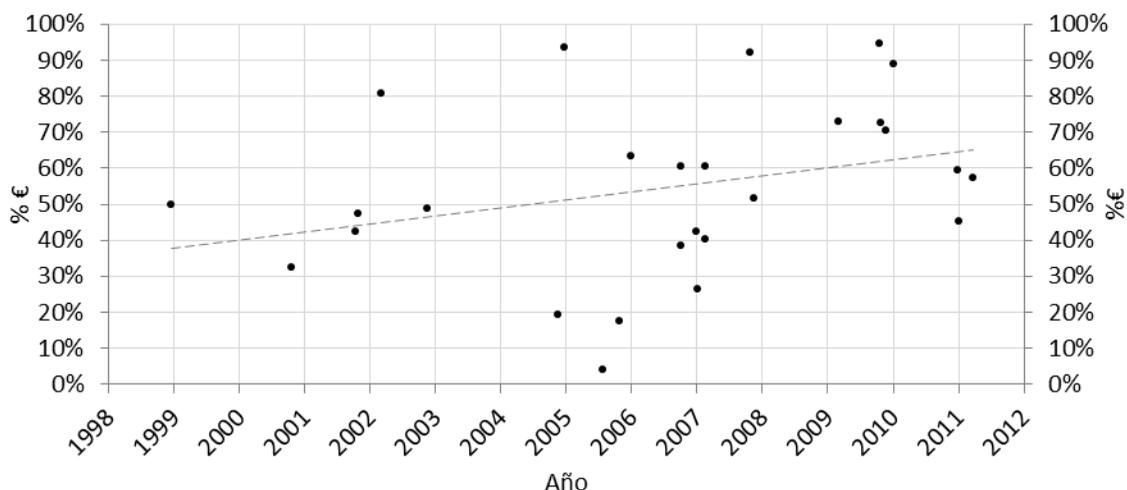


Figura 76. Ratio del total indemnizado (actualizado) respecto al total indemnizado actualizado con precisión igual o mejor que calle.

Representar este mismo gráfico, pero en relación al número de siniestros (Figura 77), también permite conocer mejor el comportamiento de los datos. Así, se puede observar que el 70% de los eventos con precisión igual o mejor que calle representa más del 50% de los eventos totales.

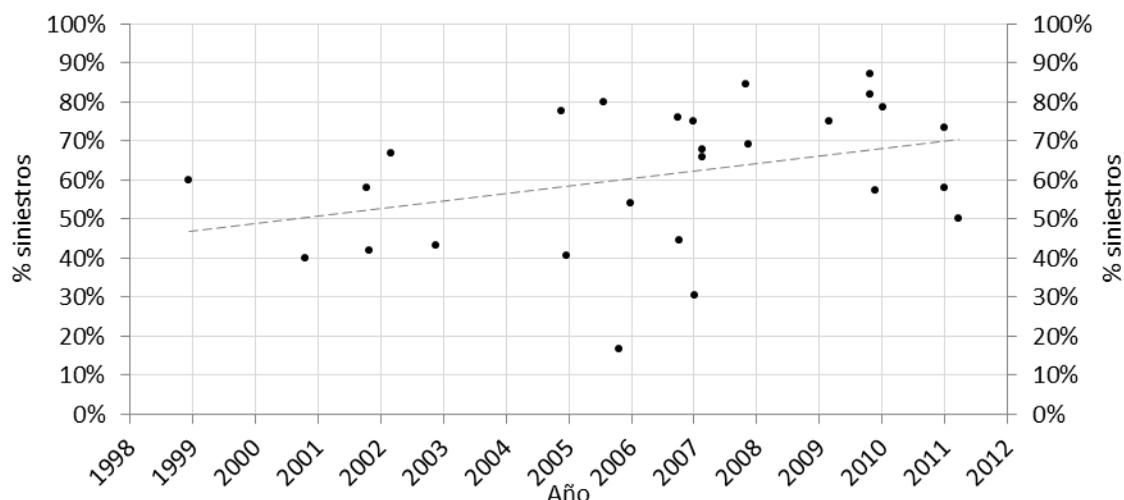


Figura 77. Ratio del número de siniestros respecto al total con precisión igual o mejor que calle.

Estas gráficas (Figura 76 y Figura 77) ponen de relieve que el error es relativamente aleatorio, con una cierta tendencia a ser menor a medida que la fecha del siniestro es más reciente. Pese al hecho de la baja representatividad de los datos en su conjunto, sí se pueden aprovechar aquellos para los que la calidad es superior al 70% en valor económico.

Con la finalidad de identificar una posible correspondencia o discrepancia entre la siniestralidad y el agente causante (la precipitación), se buscaron aquellas cuencas con más de un siniestro en distintas fechas (con calidad superior al 70%) y se buscaron los datos de los pluviómetros cercanos correspondientes a la fecha del siniestro. Siguiendo el método de los polígonos de Thiessen se calculó el promedio de la precipitación del evento para cada subcuenca identificada con más de un siniestro, se asoció a su correspondiente periodo de retorno y se compararon los resultados con los importes indemnizados. En teoría, según el método de los cuatro cuadrantes (Mora y Díez 2008), hubiera cabido esperar un gráfico como el de la Figura 78, donde se pudiera correlacionar la probabilidad de ocurrencia de un evento con los potenciales daños esperados. Como ya se

mencionó anteriormente, no se pudo encontrar esta correspondencia, en primer lugar por falta de datos, y en segundo lugar por el comportamiento errático de éstos. De las 759 cuencas mayores de 1 km<sup>2</sup>, y sin depurar por calidad de geolocalización, el 84% de las cuencas (641 cuencas) o bien no han registrado eventos, o sólo han registrado un evento. Tan sólo un 9% de las cuencas ha registrado tres o más eventos. La cuenca que más eventos ha registrado alcanza a 14 fechas diferentes de las 27 posibles. Pero estas cifras caen dramáticamente si se eliminan del cómputo los siniestros con geolocalización mejor que código postal. Además, para poder establecer una correlación con los eventos, es necesario caracterizar adecuadamente la pluviometría del evento, para lo cual se acude a los datos de pluviometría diaria de la AEMET, y por polígonos de Thiessen se calcula el valor medio de la precipitación de la cuenca, que se compara con el valor medio por periodo de retorno para dicha cuenca, obteniéndose así una curva de precipitación e indemnizaciones por periodo de retorno (Figura 80 y Figura 81). Con los datos disponibles tan sólo se han identificado eventos de periodos de retorno inferiores a 15 años (con un par de excepciones sin relevancia) y un comportamiento errático propio de una muestra insuficiente. Pese a que los datos no son representativos, resulta llamativo el hecho de que para valores del agente causante muy similares se observan datos muy diferentes en cuanto a indemnización pagada. Tal vez el motivo se deba a que la evaluación del estudio de [Mora y Díez \(2008\)](#) hacen referencia a bienes inmuebles o muebles inmóviles, mientras que el caso de este estudio parece estar marcado o por los bienes muebles móviles o por variaciones significativas en el entorno y que modifican sustancialmente la escorrentía.

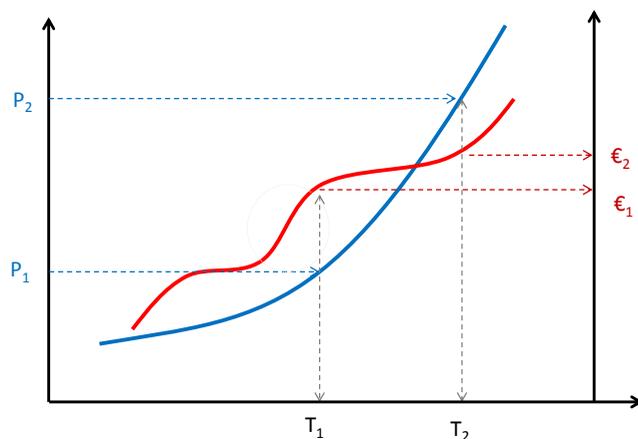


Figura 78. Correlación teórica entre peligrosidad, periodo de retorno y riesgo. En azul, la peligrosidad, en rojo el riesgo (con sus típicas curvas de incremento súbito del riesgo para el caso de las inundaciones).

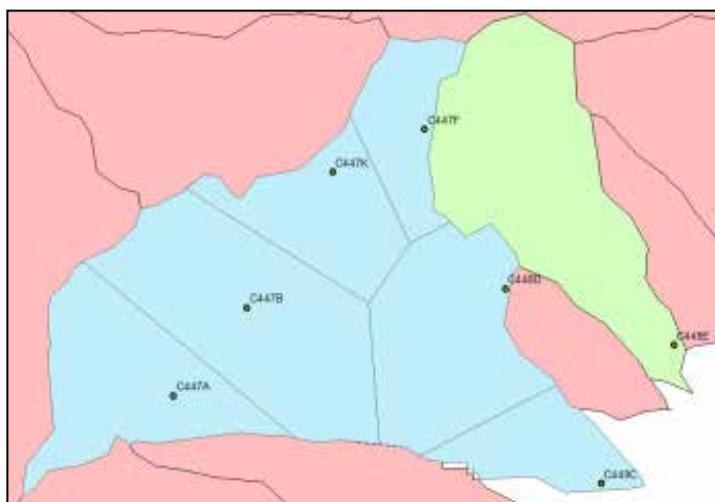


Figura 79. Ejemplo de dos cuencas (azul y verde) con datos de siniestros de distintas fechas, y pluviómetros con registro de eventos en la fecha del siniestro. Mientras que para la cuenca azul sí se puede hacer una estimación de precipitación media del evento, para la cuenca verde, no se ha podido encontrar pluviómetros suficientes para evaluar el evento.

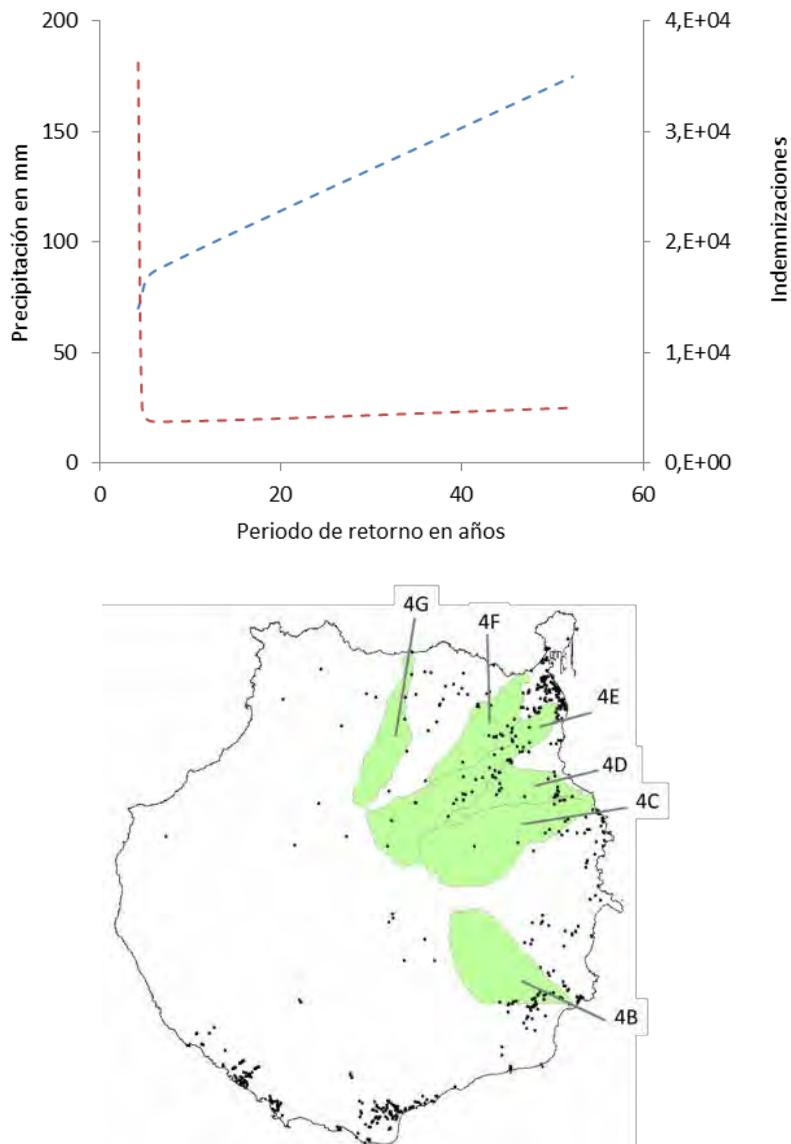


Figura 80. Curva de precipitación-daños vs periodo de retorno para la cuenca 4C de Gran Canaria. Abajo, algunas cuencas donde se han caracterizado dos o más eventos (máximo 5 eventos, cuenca 4E).

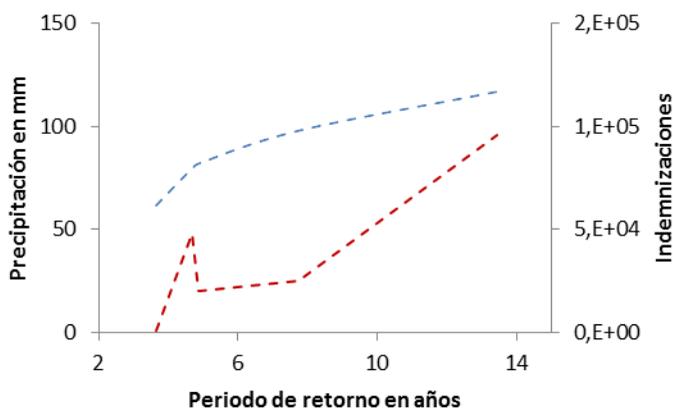


Figura 81. Curva de precipitación-daños vs periodo de retorno para la cuenca 4E de Gran Canaria (Figura 80).

Con los datos de siniestralidades se han realizado ensayos para el cálculo de densidad de eventos, densidad de eventos ponderados económicamente, y densidad de eventos doblemente ponderados (económicamente y e indizados según precisión estimada). El problema que plantea esta aproximación es que los métodos ensayados generan muchos artefactos propios al método, añadidos a los artefactos por la escasez de datos y por su heterogénea distribución en el territorio. Por ejemplo, la selección del tamaño de pixel o el área de influencia para un muestreo de tipo paso de malla, determinan la coalescencia o no de eventos. El método del inverso del área de los polígonos de Thiessen, produce distorsiones relacionadas con la distribución de los eventos cuando éstos se encuentran situados paralelos a los cauces, dando lugar a polígonos muy alargados. El método de análisis de clusters, en la zona de mayor densidad de eventos y por tanto la más representativa de la distribución e influencia de éstos, muestra que el grueso del cluster está a una distancia inferior a 60 ó 40 metros. Por este motivo, se escogió una distancia intermedia (50m) como distancia representativa de cada evento. Tomando la muestra completa de eventos, la correlación por distancia parece estabilizarse a unos treinta metros. Por todo ello se obtuvo una capa de 50 m de proximidad a cada uno de los eventos y se utilizó como base para hacer una corrección interpretada de los resultados con criterio experto.

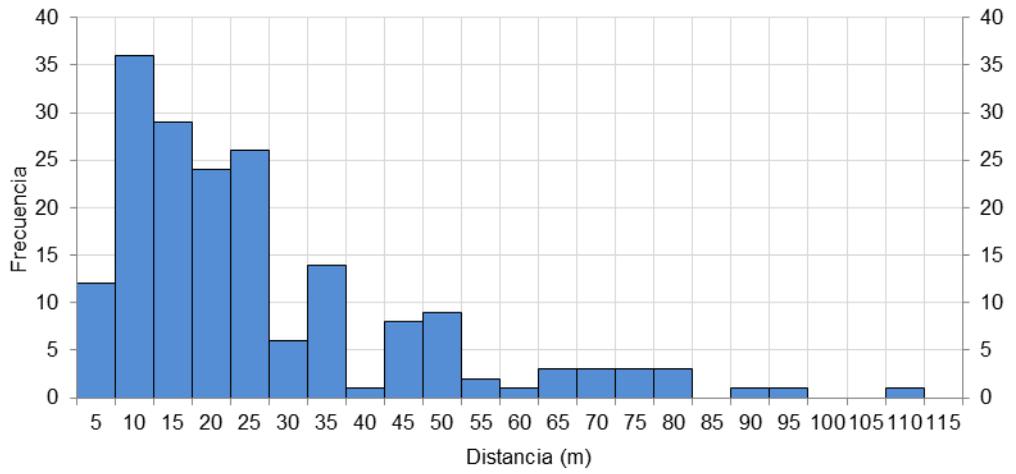


Figura 82. Análisis de distancia entre eventos extraída del cluster más poblado.



## 5. Estudio de la sismicidad

### 5.1. Introducción

El análisis de la seguridad frente al peligro sísmico tiene dos vertientes reconocidas: en primer lugar, evaluar la seguridad estructural contra las fuerzas dinámicas potencialmente destructivas y en segundo lugar estudiar la seguridad de un sitio, en sí mismo, relacionada con fenómenos geotécnicos inducidos tales como la amplificación, los deslizamientos y la licuefacción. Para mitigar el riesgo de terremotos y para garantizar la seguridad de las estructuras bajo las cargas de un terremoto, habitualmente se han tenido en consideración los efectos dinámicos en los códigos de diseño en muchos países gracias al uso de mapas de zonificación basados en evaluaciones geológicas de los peligros sísmicos que están incorporados en los códigos o normas de construcción.

Sin embargo, se ha prestado poca atención a la evaluación de la seguridad de los sitios para formular regulaciones sobre los posibles usos del suelo y su ordenación urbana. La seguridad del lugar durante los terremotos se relaciona con fenómenos geotécnicos tales como la amplificación, deslizamientos, flujos de lodo, licuefacción y movimientos de las fallas. Aunque la evaluación de estos fenómenos geotécnicos específicos se ha efectuado en varios países según una amplia variedad de procedimientos, en los que con alta probabilidad sufran este tipo de fenómenos, estos intentos rara vez se han hecho para formalizar un enfoque estándar en términos de reglamentos, normas o requisitos para los códigos técnicos de construcción.

Ante esta realidad, la importancia de la seguridad contra el riesgo sísmico ha recibido una atención creciente en los últimos años entre ingenieros, científicos, servicios de planificación y usuarios del terreno en regiones sísmicamente activas. El creciente reconocimiento de la importancia de este problema ha venido dado por la preocupación acerca de las desastrosas consecuencias que en los últimos años han tenido tanto deslizamientos como licuefacciones inducidas por movimientos sísmicos, y también por el hecho de que muchas grandes ciudades están sometidas a un alto nivel de riesgo por su grado de exposición a los peligros geotécnicos en caso de terremotos. Sin embargo, aún se está lejos de un nivel aceptable de entendimiento de este fenómeno inducido. A las incertidumbres que muchas veces existen en el diseño de un modelo geomecánico para el análisis de la estabilidad asísmica, se une el

desconocimiento de las características del input sísmico. De manera que la complejidad y dificultad para valorar con confianza factores, como el input sísmico local, el comportamiento geotécnico del terreno o las condiciones previas del talud, que controlan la rotura de la ladera en un determinado lugar, hacen necesario más avances en la investigación para predecir con mayor precisión dónde y en qué condiciones los terremotos pueden producir movimientos de ladera. En respuesta a estos nuevos desarrollos, y a la necesidad de su conocimiento y valoración particular en zonas densamente pobladas y a la vez sometidas a una posible sismicidad de magnitud significativa capaz de desencadenar alguno de estos procesos, se han hecho varios intentos para identificar y evaluar los peligros geotécnicos y de representarlos en forma de mapas o inventarios. En general, el resultado de una evaluación del peligro se presenta en un mapa del territorio sobre el que se identifican áreas o zonas con diferentes niveles de peligro geotécnico sísmicamente inducido.

De acuerdo con los diferentes procedimientos de zonificación de peligros geotécnico-sísmicos recogidos en el TC4 (ISSME, 1999), estos se agrupan de acuerdo a una serie de criterios organizados en orden creciente de cantidad de información manejada y escala de representación según el tipo de movimiento-efecto inducido en el terreno por la acción sísmica (Tabla 19).

El trabajo aquí desarrollado se encuentra entre los métodos de grado 2 y 3, al utilizar la información procedente de estudios geotécnicos simplificados y que cubren el contexto de las Islas Canarias, sin entrar al análisis particular y pormenorizado de la respuesta del terreno frente a la señal sísmica. Esta solo se considera en su valor máximo de aceleración posible en su movimiento y para diferentes periodos de retorno.

Tabla 19. Información utilizada en los tres niveles de zonificación.

	<b>Grado-1 / General</b>	<b>Grado-2 / Detallada</b>	<b>Grado-3 / Rigurosa</b>
<b>Movimiento del terreno</b>	Terremotos históricos y otra información existente Cartografía geológica Entrevista con la población	Prospección geofísica Estudio geotécnico simplificado	Investigación geotécnica detallada Análisis de respuesta del terreno
<b>Inestabilidad de ladera</b>	Terremotos históricos y otra información existente Cartografía geológica y geomorfológica	Fotogrametría y teledetección Estudios de campo Cobertura vegetal y meteorología	Investigación geotécnica detallada Análisis de respuesta del terreno
<b>Licuefacción</b>	Terremotos históricos y otra información existente Cartografía geológica y geomorfológica	Fotogrametría y teledetección Estudios de campo Entrevista con la población	Investigación geotécnica detallada Análisis de respuesta del terreno
<b>Escala de representación</b>	1/1.000.000– 1/50.000	1/100.000 – 1/10.000	1/25.000 – 1/5.000
<b>Metodologías</b>	Empíricas: magnitud-distancia, intensidad mínima	Gobierno de Kanagawa (1986), Mora y Vahrson (1993), Asociación Japonesa de Carreteras (1988), Mulas et al (2003)	Newmark (1965), Wilson et al. (1979), Siyahi y Ansal (1999).

### 1. Zonificación Grado-1

El primer nivel de zonificación se basa en la recopilación e interpretación de la información disponible a partir de documentos históricos, informes publicados y otras bases de datos disponibles. Este es el enfoque menos preciso y de más bajo coste, que se utiliza para cubrir una amplia región, como un país, un estado, una provincia, una comunidad o áreas locales.

Para la zonificación de movimientos de tierra locales, pueden ser utilizados los catálogos instrumentales de terremotos. Estos catálogos están disponibles para casi todas las áreas del mundo y contienen información sobre la ubicación, magnitud, mecanismo focal, etc., para los terremotos de magnitud moderada a alta. Los datos históricos sobre los diversos tipos de daños en muchas áreas también pueden estar disponibles, y esto se puede utilizar para obtener una visión global de la distribución en la superficie de la intensidad para los terremotos históricos. También se puede utilizar la información sobre los terremotos más antiguos para delinear aproximadamente las fuentes sismogénicas y para generar estimaciones de magnitud y frecuencia de

terremotos futuros. Incorporando la atenuación que el terreno produce al alejarse de las fuentes sísmicas, se puede cartografiar una estimación del posible movimiento del terreno.

A este nivel las áreas de inestabilidad potencial se establecen usando criterios de magnitud o intensidad a partir de terremotos pasados. Cabe señalar que, a pesar de que la tasa de movimientos de ladera se reduce con la distancia, el límite exterior exacto de las inestabilidades no está bien definido generalmente. Por otro lado, se debe tener en cuenta que la magnitud no incorpora los efectos locales, y que las condiciones del terreno, así como la topografía y el contenido en agua pueden tener una importante influencia sobre la estabilidad de las laderas.

## **2. Zonificación Grado-2**

A los métodos anteriores se les puede incorporar la información geológica y topográfica adicional del área de estudio con lo que se pueden mejorar considerablemente los resultados. Esto puede requerir investigaciones de campo adicionales. No obstante, es posible usar la información acerca de las condiciones geológicas y topográficas que se encuentre disponible. Por ejemplo las fotografías aéreas pueden ayudar a definir mejor las estructuras de discontinuidad, fallas y las condiciones geológicas. En algunos casos, las fotografías más antiguas, si son anteriores al desarrollo urbano, pueden ser más útiles en la comprensión de la estructura de las unidades geológicas locales. Con estudios adicionales de campo, se pueden identificar unidades geológicas susceptibles a licuefacción o de características concretas en relación a la sismicidad.

La población local puede proporcionar información histórica sobre las consecuencias que se hayan podido derivar de la ocurrencia de terremotos en el pasado. Los datos de prospección sísmica también pueden ser utilizados para obtener información más detallada sobre la estratigrafía del subsuelo o las características de amplificación de los movimientos de tierra. La [ISSME \(1999\)](#) propone una serie de aproximaciones metodológicas que ilustran el rango de factores considerados significativos en la evaluación de la susceptibilidad a sufrir movimientos de ladera desencadenados por terremotos.

## **3. Zonificación Grado-3**

Cuando es necesario un nivel muy alto y muy detallado de zonificación, por ejemplo, en el rango de escalas de 1/25.000 a 1/5.000, son necesarios otros datos específicos y detallados para el área en cuestión. Los resultados de estas

investigaciones de caracterización se pueden incorporar en los análisis asistidos por ordenador de la respuesta sísmica del suelo, del comportamiento de laderas inestables, o del potencial de licuefacción. Este nivel de zonificación generalmente es muy costoso, principalmente por la cantidad de datos que requiere.

Este tipo de metodologías considera el estado de esfuerzos en el terreno, contemplando, por tanto, las propiedades de los materiales, la morfología de las laderas y la sismicidad del territorio. Estos análisis se suelen realizar en base a las condiciones específicas del lugar de estudio, por lo que se pueden obtener zonaciones muy fiables con una investigación de detalle.

Son muy pocas las investigaciones que se han llevado a cabo hasta el momento sobre el peligro y el riesgo asociado a la sismicidad en el archipiélago. La Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) vigente actualmente, ha sido hasta hace relativamente poco, la única referencia que había en la que se reflejaba la peligrosidad sísmica en el archipiélago. Recientemente la publicación de [González de Vallejo et al. \(2006\)](#) abordan con detalle una solución que resulta en una primera aproximación adecuada para cubrir esta necesidad. En los resultados, el autor muestra cómo la costa este de Tenerife ha sido identificada como la que posee el peligro sísmico más elevado del archipiélago para los periodos de retorno considerados, debido a la existencia de una fuente sismogénica importante (la falla Gran Canaria-Tenerife), que es capaz de generar terremotos tectónicos de magnitud más que moderada ( $M_w > 6,0$ ). Precisamente en esta zona de Tenerife los valores de la PGA (*peak ground acceleration*; aceleración pico del suelo) están comprendidos entre los 0,06 g y los 0,09 g para unos periodos de retorno de 475 y 950 años, respectivamente. El resto de las Islas Canarias presentan una distribución de la PGA relativamente uniforme entre los 0,05g y los 0,07g, para el mismo rango de años, habida cuenta de la geometría considerada para las fuentes sismogénicas corticalmente distribuida sobre toda la extensión del archipiélago. Los valores así obtenidos, particularmente además para algunas de las ciudades más importantes de las islas, son entre un 50% y un 25% superiores a los que se recogen en la NCSE-02.

La estimación que [González de Vallejo et al. \(2006\)](#) logran en su trabajo es la mejor posible hasta el momento, considerando las limitaciones de los datos disponibles. Por otra parte se han descrito y reconocido muy pocas estructuras tectónicas capaces de generar terremotos que supongan un riesgo para la

población de las islas, cuando existen registros históricos de terremotos sentidos con una intensidad de  $I_{MSK} = X$  (ligado a la erupción del de Timanfaya entre 1730 y 1736; Mezcua y Martínez Solares, 1983).

Este trabajo busca reproducir y mejorar en lo posible los resultados obtenidos por González de Vallejo et al. (2006), en cuanto a la distribución en superficie de la PGA para los diferentes periodos de retorno considerados. El método de cálculo utilizado es el descrito por Cornell (1968) implementado en una versión actualizada del programa CRISIS2007 (Ordaz, 2001) en el que se han incorporado las últimas funciones de atenuación que se han encontrado en Douglas (2011), aptas para este archipiélago volcánico.

## 5.2. Marco tectónico

### 5.2.1. Discontinuidades tectónicas

Sobre el archipiélago se han descrito muy pocas estructuras de tectovolcánicas. Entre estas, la más notable, es la que se describe en forma de estrella de tres puntas formada por tres discontinuidades relacionadas con los principales centros volcánicos en Tenerife y El Hierro. La exploración sísmica y la geofísica marina más reciente han revelado parte de la estructura cortical de las islas más occidentales. Se ha trazado una gran discontinuidad ligada a una fuerte variación en la anomalía gravimétrica que discurre de norte a sur paralela por el oeste a la línea formada por la isla de la Palma y El Hierro (Carbó et al., 2003; Figura 83) en una corteza de unos 11 km de potencia (Figura 84). Las islas más orientales se encuentran sobre una corteza algo más gruesa, de unos 15 km, y se orientan paralelamente a la Cresta Este Canaria.

Por otra parte, entre las estructuras tectónicas que se han encontrado, la más importante está entre las islas de Tenerife y Gran Canaria (Figura 85). En ésta área se encuentra una falla de dirección noreste sobre la que se ha registrado instrumentalmente el mayor terremoto del archipiélago, de magnitud superior a cinco ( $m_{BLg}$  5.2) el 9 mayo 1989. Además de este registro instrumental, recientemente se han identificado una serie de estructuras de licuefacción en depósitos de arenas del Holoceno al sur de Tenerife, estimando la magnitud del terremoto que pudo generarlas en  $M_w$  6,8, cuyo epicentro probablemente se localizara en la falla anteriormente citada.

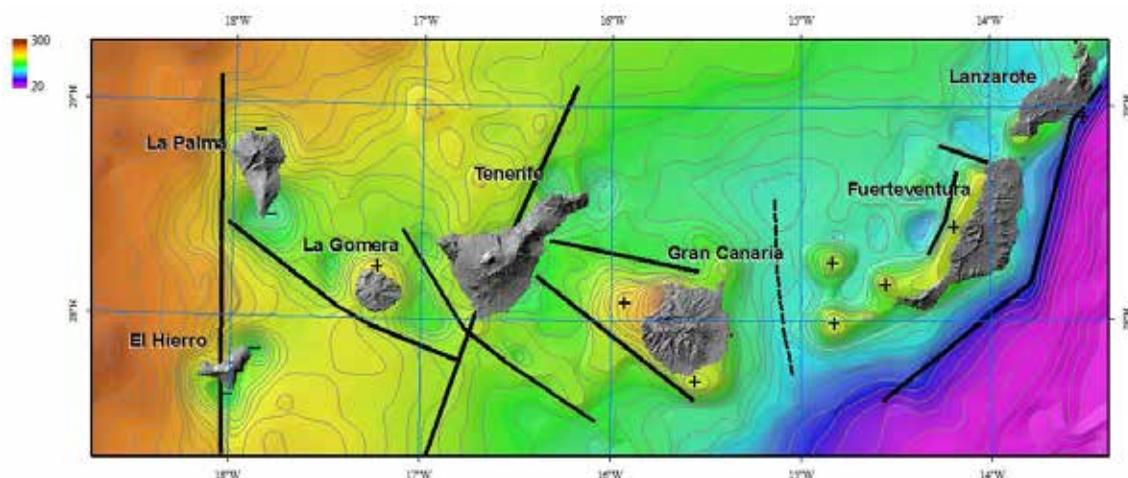


Figura 83. Esquema aproximado de la distribución de la anomalía de Bouguer (en mGal) e interpretación; las zonas con valores elevados de gravedad se indican con el símbolo + y con - las zonas de baja gravedad, modificado de Carbo et al. (2003).

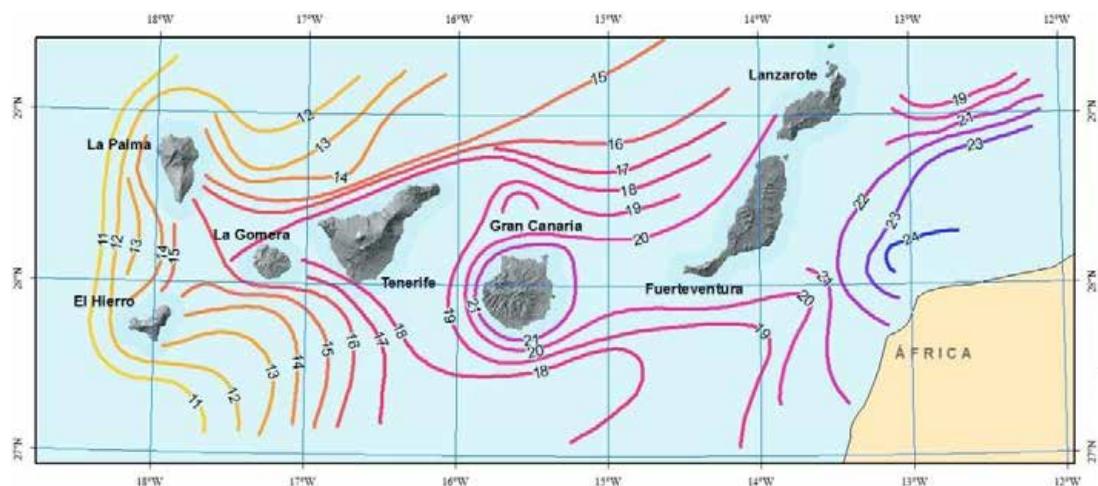


Figura 84. Esquema de la distribución del espesor de la corteza terrestre (en km) en el ámbito del archipiélago canario (modificado Bosshard y Macfarlane, 1970).

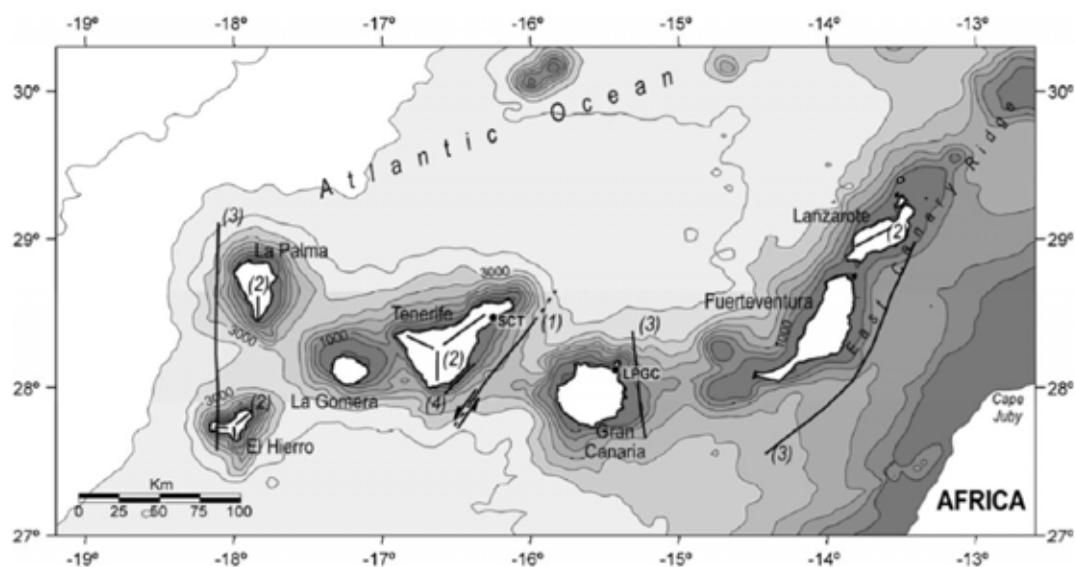


Figura 85. Principales estructuras y lineamientos tectónicos del archipiélago canario. *González Vallejo et al. (2006).*

### 5.2.2. Catálogo sísmico

El catálogo sísmico utilizado en el estudio de *González de Vallejo et al. (2006)* procede del Instituto Geográfico Nacional. El conjunto de datos ha sido completado añadiendo cuatro eventos registrados por el Centro Sismológico Internacional entre 1964 y 1975 además del evento paleosísmico del sur de Tenerife que dio lugar a las arenas con evidencias de licuefacción. Este catálogo ha sido dividido en dos tramos temporales: uno pre-instrumental o histórico, y otro instrumental.

Los primeros registros históricos que se tienen de la sismicidad en las islas datan del siglo XIV, a partir de entonces, se han registrado un importante número de terremotos, principalmente relacionados con erupciones volcánicas. El primer gran evento sísmico registrado se localizó en la Palma en 1677 ( $I_{MSK} = VII$  a VIII). Sin embargo el terremoto más intenso sobre el archipiélago tuvo lugar en Lanzarote en 1730 ( $I_{MSK} = X$ ), ligado a la erupción ocurrida en el volcán de Timanfaya (de 1730 a 1736), tal y como consta en el catálogo sísmico español histórico (*Mezcua y Martínez Solares, 1983*). Otros terremotos históricos importantes se registraron en 1920 y 1949 sobre la isla de la Palma ( $I_{MSK} = VII$ ), en

1913 en la isla de Gran Canaria ( $I_{MSK} = VII$ ), y en 1915 y 1917 en Fuerteventura ( $I_{MSK} = VII$ ).

La primera red sísmica operativa sobre el área se estableció en 1975, compuesta por tres estaciones ubicadas en Tenerife, La Palma, y El Hierro. Desde 1980 la red ha ido extendiéndose sobre otras islas y actualizándose para efectuar un registro de banda ancha. El catálogo instrumental muestra un gran número de eventos de baja magnitud distribuidos preferentemente alrededor de Gran Canaria y Tenerife, en particular, entre ambas islas. Hasta 1997 la escala de magnitud se relaciona con la duración de la señal, a partir de entonces la magnitud de los terremotos se calcula de acuerdo con la amplitud de la onda  $L_g$  ( $m_{bLg}$ ) y sólo unos pocos utilizando la escala  $m_b$ . Los mayores terremotos instrumentales registrados en el archipiélago ocurrieron el 9 mayo 1989 y el 21 marzo 1991. El primer evento ( $m_{bLg} = 5,2$ ) de 1989 se localizó entre las islas de Gran Canaria y Tenerife, a una profundidad comprendida entre los 15 y los 36 km según diferentes cálculos, y con un gran número de réplicas. Su origen parece estar relacionado con la falla submarina entre ambas islas, pues el mecanismo focal calculado se orienta igual que la falla. El evento de 1991 ( $m_{bLg} = 5,1$ ) se localizó a unos 60 km al sur oeste de El Hierro.

El catálogo sobre el cual se basa este trabajo considera el año 1850 como fecha de inicio, pues a partir de este año se puede considerar que el catálogo está completo.

### **5.2.3. Fuentes sismogénicas**

La sismicidad sobre las Islas Canarias tiene un origen principalmente volcánico. Históricamente se han encontrado claras relaciones entre las erupciones volcánicas y el incremento de la sismicidad en la zona. No obstante, a partir del terremoto de 1989 y sus réplicas, se tiene constancia de la existencia de terremotos tectónicos. Su origen, muy probablemente se encuentre ligado a la colisión entre la Placa Africana y la Placa Euroasiática. Teniendo en cuenta estas premisas, las mayores discontinuidades tectónicas y la distribución de la sismicidad, dividen el área de interés en tres zonas sismogénicas para su uso en el cálculo de la peligrosidad sísmica (González de Vallejo et al., 2006; Figura 86).

Las zonas 1 y 2, recogen la ocurrencia de terremotos de magnitud baja a moderada, independientemente de su origen volcánico o tectónico. Sus límites

occidental y oriental se establecen coincidiendo con la disminución en la sismicidad que se encuentra hacia la dorsal centro Atlántica o hacia la costa del continente Africano, respectivamente. Hacia el norte y el sur los límites paralelos los marca la continuación submarina de la estructura del Atlas. La frontera entre ambas representa un cambio abrupto en el espesor de la corteza que tiene lugar en dirección este-oeste. La orientación de la frontera coincide aproximadamente con la que se refleja en el borde canario oriental.

La zona 3 se definió aparte y específicamente dentro de la zona uno entre Gran Canaria y Tenerife donde pueden darse terremotos tectónicos de magnitud moderada a grande debido a la presencia de una falla. La extensión de esta zona queda limitada por la longitud estimada para la falla, de unos 30 km, y su anchura queda limitada por la extensión de los registros de réplicas y por la costa oriental de Tenerife.

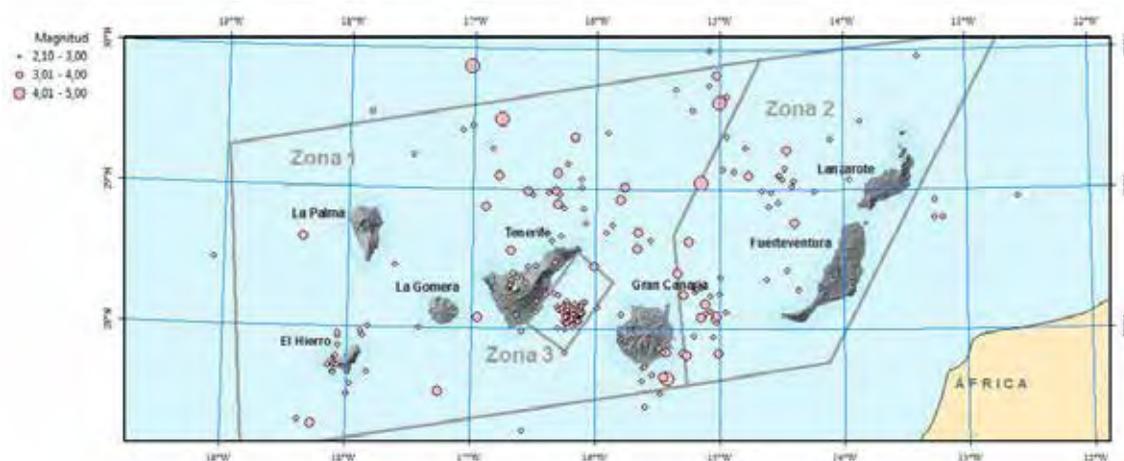


Figura 86. Distribución de las zonas sísmicas y la sismicidad considerada en cada una para el ajuste de los parámetros de cálculo. Modificado de González de Vallejo et al. (2006).

### 5.3. Evaluación probabilística del peligro sísmico

Conceptualmente, el análisis probabilista de peligro sísmico (*Probabilistic Seismic Hazard*, PSH) no ha cambiado desde los desarrollos hechos por Esteva y Cornell en la década de los sesenta (Ordaz, 1997; Coppersmith y Youngs, 1990). Así, el cálculo del peligro sísmico requiere determinar tres aspectos principales:

- 1) Las posibles fuentes de sismos que puedan afectar al sitio en estudio.

- 2) La tasa de recurrencia de sismos de todas las magnitudes en cada fuente.
- 3) La atenuación de movimientos fuertes del terreno, como una función de la magnitud del sismo y de la distancia del origen del sismo al sitio en estudio.

Lo que sí ha mejorado de manera importante desde los sesenta, es la capacidad para estimar los parámetros que intervienen en el análisis probabilista de peligro sísmico (Coppersmith y Youngs, 1990), gracias al importante desarrollo tecnológico de los últimos tiempos, y especialmente a los medios informáticos. En este sentido, se ha utilizado para este trabajo el programa CRISIS 2007, una herramienta que presenta numerosas ventajas a la hora de estimar el peligro sísmico desde la perspectiva probabilística, como por ejemplo que permita involucrar incertidumbres presentes en el conocimiento del fenómeno sísmico. Además, la sencillez del modelo otorga mayor control de los parámetros involucrados (Allen, 1995).

CRISIS 2007 calcula tasas de excedencia de la intensidad para un sitio o una región, indicando dos aspectos:

- 1) La probabilidad de que una intensidad (aceleración máxima, velocidad máxima, etc.), sea excedida en un determinado intervalo de tiempo.
- 2) El periodo de recurrencia de dicha intensidad.

Así, un valor de la tasa de excedencia de 0,01 para una aceleración de 0,5 g, indica que existe un 1% de probabilidad de que se excedan las 0,5 g en un año. También significa que la aceleración de 0,5 g se presenta, en promedio, una vez cada 100 años.

### 1. Método de cálculo

Si se considera una fuente sísmica y un punto de cálculo, y si se conoce la distancia de los focos al sitio,  $R_o$ , y los parámetros  $\underline{p}$  que definen la curva de tasas de excedencia de la magnitud,  $\lambda(M)$ , es posible obtener la tasa de excedencia de aceleración (o de otra intensidad),  $v(a|Ro,\underline{p})$  mediante:

$$v(a|Ro,\underline{p}) = - \int_{M_o}^{M_u} \frac{\partial \lambda}{\partial M} Pr(A > a|M, Ro) dM$$

Donde  $Pr(A > a | M, Ro)$  es la probabilidad de que la intensidad  $A$ , exceda el valor  $a$ , dadas una determinada magnitud y distancia. En este caso:

$$Pr(A > a|M, Ro) = \phi\left(\frac{1}{\sigma_{\ln a}} \ln \frac{\tilde{a}(M, Ro)}{a}\right)$$

Donde  $\phi$  denota distribución normal estándar;  $\sigma_{\ln a}$  es la desviación estándar del logaritmo natural de las intensidades de la ley de atenuación y  $\tilde{a}$  es la mediana de la intensidad, obtenida de la tabla o curva de atenuación, dadas una magnitud y una distancia.

En la expresión de  $v(a|Ro, \underline{p})$  se incluyen tanto la ley de atenuación como la incertidumbre en ella. Sin embargo, para la zona sismogénica, ni la distancia epicentral es constante ni los parámetros  $\underline{p}$  que definen la curva de tasas de excedencia de la magnitud, son deterministas. Por tanto, para calcular la tasa de excedencia no condicionada,  $v(a)$ , hay que calcular el valor esperado con respecto a las variables inciertas, por lo que la expresión de cálculo de la tasa de excedencia de la aceleración es:

$$v(a) = \int_{R(Ro)} \int_{R(\underline{p})} v(a|Ro, \underline{p}) p_{\underline{p}}(\underline{p}) d\underline{p} dRo$$

Donde  $R(\underline{p})$  es la densidad conjunta de probabilidades de los parámetros que definen a  $\lambda(M)$  y  $R(Ro)$  es la densidad de probabilidades de la distancia epicentral. Esta ecuación proporciona la contribución de una fuente, y cuando se consideran varias fuentes basta sumar las contribuciones de todas las fuentes sísmicas para obtener la tasa de excedencia total. De esta forma, el cálculo de peligro sísmico implica la solución de integrales múltiples. Para lograrlo CRISIS2007 emplea métodos numéricos.

La integración que con respecto a la distancia requiere realizar CRISIS2007 presenta problemas adicionales, porque la distancia es un factor determinante en los efectos que puede producir un sismo. Con esta consideración y con la idea de hacer cálculos eficientes, CRISIS emplea un método de división de la fuente sísmica, en función de la distancia de la fuente al sitio de cálculo. Así, cuando un sitio está muy cerca de una fuente sísmica el programa divide en numerosas subfuentes la fuente sísmica, para lograr mayor precisión durante la integración espacial. En zonas fuente de tipo área, la división se realiza en triángulos, es decir, independientemente de la forma de la fuente la zona será dividida en triángulos. Cada uno de los triángulos resultantes a su vez se dividirá en más triángulos si la cercanía con el sitio en estudio lo precisa.

Para calcular tasas de excedencia de intensidades sísmicas es necesario establecer cinco aspectos:

- Precisar la región en estudio, mediante una malla de puntos.
- Definir las zonas en las que se generan sismos (fuentes sísmicas).
- Fijar las relaciones de recurrencia de la magnitud para cada fuente sísmica.
- Proporcionar las leyes de atenuación de las ondas sísmicas.
- Establecer otros parámetros de cálculo (tiempos de retorno e integración).

El dominio espacial se ha establecido conforme a una superficie amplia que integra el conjunto del archipiélago, además de las estructuras sismogénicas mencionadas con anterioridad. Este rectángulo queda definido por las coordenadas 18,5°W a 12°W y 27°N a 30,3°N. Para llevar a cabo la integración espacial y calcular una aproximación del valor de la PGA sobre un número finito de puntos en la superficie, esta región se ha discretizado con una malla regular de 0,1° N-S y 0,1° E-W (Figura 87).

En cuanto a las zonas sismogénicas, se han utilizado las tres zonas descritas anteriormente: la zona 1 cubre la mitad occidental del archipiélago; la zona 2 cubre la mitad oriental; y la zona 3 queda entre las islas de Tenerife y Gran Canaria.

Frente a la incertidumbre de su estructura real se ha supuesto que las tres son zonas planas, paralelas a la superficie y que están a una profundidad de unos 14 km (por ser la más desfavorable).

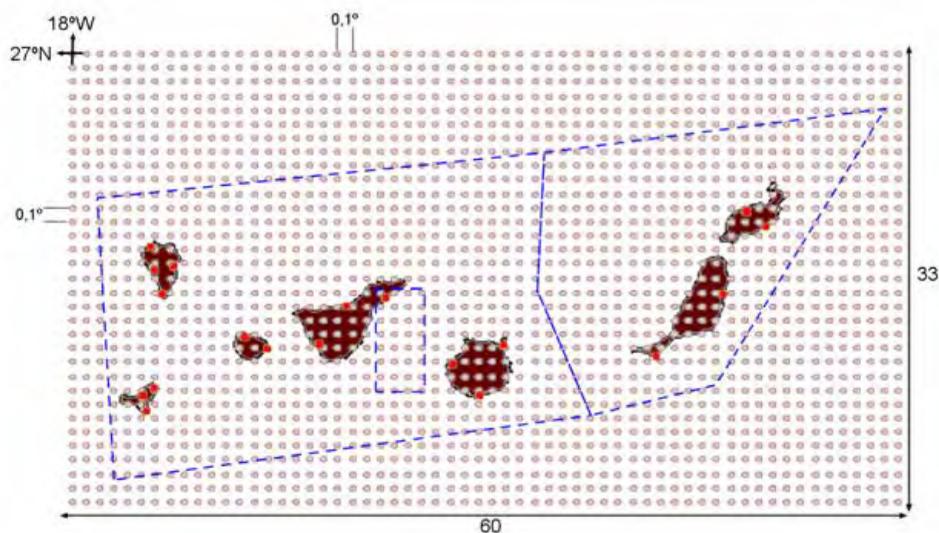


Figura 87. Discretización de la zona de cálculo. Los puntos rojos representan puntos adicionales a la malla de cálculo empleada (Tabla 20 y Figura 88), compuesta por 60x33 elementos. Las líneas discontinuas representan las zonas sismogénicas.

Tabla 20. Localizaciones singulares.

ISLA	Ciudad	Longitud E	Latitud N
El Hierro	Frontera	-18,0067	27,7556
El Hierro	Valverde	-17,9154	27,8089
El Hierro	Restinga	-17,9808	27,6396
La Palma	Santa Cruz	-17,7647	28,6848
La Palma	Los Llanos	-17,9128	28,6573
La Palma	Santo Domingo	-17,9448	28,8295
La Palma	Los Canarios	-17,8438	28,4917
Gomera	San Sebastián	-17,1065	28,0921
Gomera	Vallehermoso	-17,265	28,1804
Tenerife	Santa Cruz	-16,256	28,4653
Tenerife	P. De La Cruz	-16,5454	28,417
Tenerife	Adeje	-16,7249	28,1218
Gran Canaria	Las Palmas	-15,4265	28,1153
Gran Canaria	Maspalomas	-15,5842	27,7561
Gran Canaria	San Nicolás	-15,7875	27,9868
Fuerteventura	Puerto Rosario	-13,8642	28,4993
Fuerteventura	Jable	-14,3342	28,0468
Lanzarote	Arrecife	-13,5514	28,9642
Lanzarote	Tinajo	-13,6785	29,0657

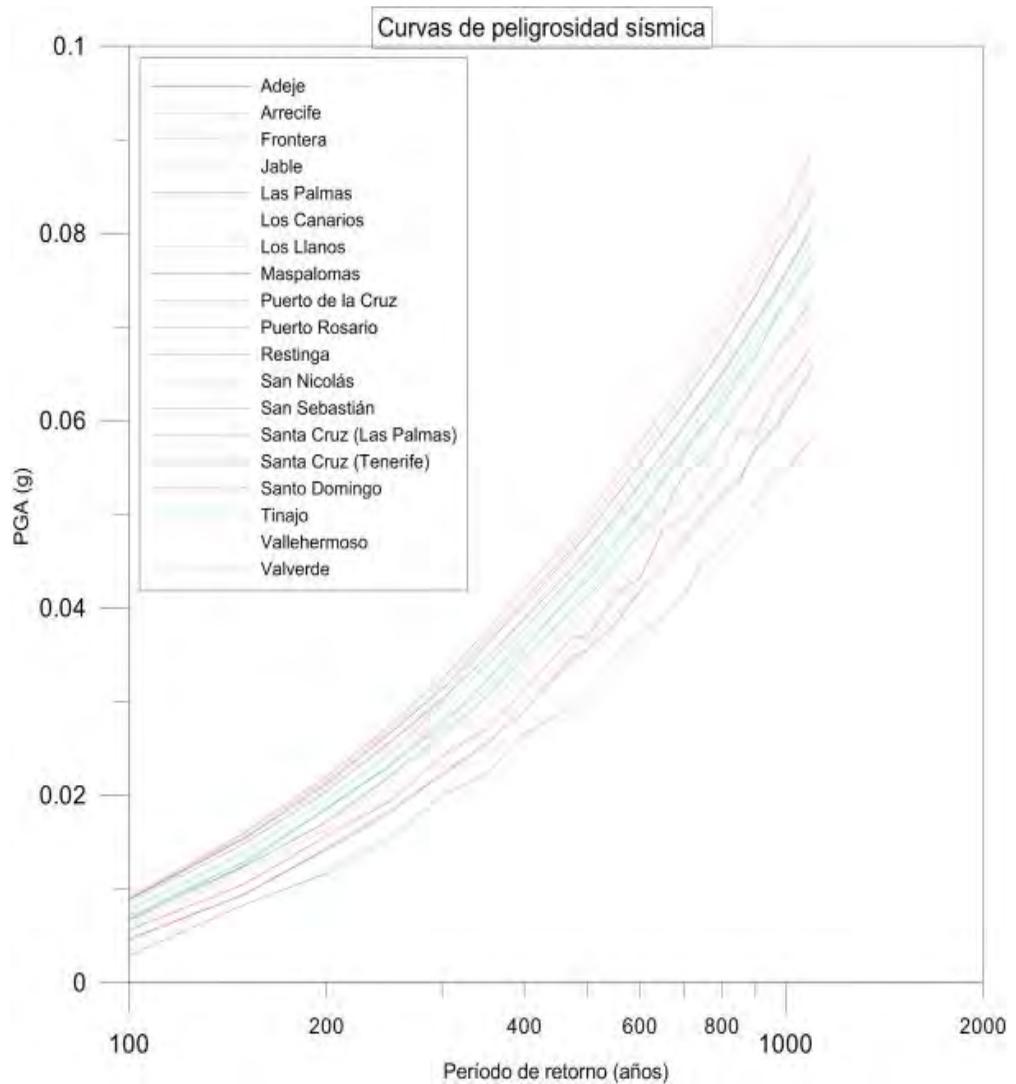


Figura 88. Curvas de PGA correspondientes a cada una de las localizaciones singulares.

Para realizar el análisis de regresión que permita estimar las relaciones de recurrencia sísmica en cada una de las zonas sismogénicas, y a fin de satisfacer la condición de Poisson, se debe partir de una base de datos sísmica homogénea y uniformemente distribuida, después de suprimir los terremotos relacionados con procesos volcánicos y réplicas de origen tectónico. Para suprimir réplicas y precursores, se ha considerado una distancia inferior a 5 km para una ocurrencia de  $\pm 3$  días del evento de mayor magnitud. Para homogeneizar las magnitudes se

han transformado todas a una magnitud momento  $M_w$ , lo que plantea el inconveniente de que no hay conversiones locales para las diferentes magnitudes con las que se registran los datos ( $m_D$ ,  $m_b$ ,  $m_{bLg}$ ), y por tanto se debe suponer compatibilidad con la magnitud momento. Esta suposición se puede dar por válida debido a que todas las magnitudes del catálogo son inferiores a 5,4 y a que la mayoría de los registros están referidos a la escala  $m_{bLg}$ , una escala con muy pocas diferencias con respecto a la  $M_w$  según el IGN.

Dado que este estudio se basa en el método de [Cornell, 1968](#) (que supone que la ocurrencia de un terremoto se rige por un proceso de Poisson y se distribuye uniformemente dentro de las zonas sismogénicas) las magnitudes de los terremotos en cada zona se ajustan a una función exponencial, por lo que la tasa de excedencia media anual  $\lambda(m)$  para una magnitud  $m$  viene dada por ([Cornell y Vanmarcke, 1969](#)):

$$\lambda(m) = \lambda_{m_0} \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta m_1}}{e^{-\beta m_0} - e^{-\beta m_1}} \text{ para } m \in [m_0, m_1]$$

Donde  $\lambda_{m_0}$  es la tasa de excelencia media anual para magnitudes por encima de  $m_0$ , valor de magnitud por encima del cual el catálogo está completo;  $m_1$  y  $m_0$  son las cotas superior e inferior de la distribución; el valor del parámetro  $\lambda_{m_0}$  viene dado por:

$$\lambda_{m_0} = e^{\alpha - \beta m_0}$$

Para ambas expresiones  $\alpha = \log_{10} a$  y  $\beta = \log_{10} b$ , siendo  $a$  y  $b$ , los parámetros de la distribución de Gutenberg-Richter (GR; Tabla 21).

Tabla 21. *Parámetros de la ley de GR de las zonas sismogénicas consideradas (modificado de González de Vallejo et al., 2006).*

Zona sismogénica	a	b	$\pm\Delta b$	$\alpha$	E[ $\beta$ ]	$\pm\Delta\beta$
Zona 1	3,72	1,12	0,01	8,565616546	2,578895304	0,01
Zona 2	2,75	0,95	0,08	6,332109006	2,187455838	0,08
Zona 3	3,72	1,12	0,01	8,565616546	2,578895304	0,01

Dada la definición de  $\lambda(m)$  y los valores ajustados, la densidad de la magnitud resulta:

$$p_m(m) = -\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda(m)}{dm}; \quad m_0 \leq m \leq m_1$$

Con la que se define la distribución de los tiempos entre eventos y la distribución de las magnitudes del proceso de Poisson (Tabla 22).

Tabla 22. Caracterización de las zonas sismogénicas según los parámetros sísmicos utilizados en la evaluación de la peligrosidad sísmica para el modelo de Poisson (modificado de González de Vallejo et al., 2006).

Zona sismogénica	$m_0$	$\lambda_{m_0}$	$E[m_1]$	$\sigma[m_1]$	L. Inf.	L. Sup.
Zona 1	4	0,16760	6,0	0,5	4,0	6,0
Zona 2	4	0,09090	6,0	0,5	4,0	6,0
Zona 3	6	0,00095	6,8	0,5	6,0	6,8

Se considera inadecuado estimar la máxima magnitud en una fuente con el empleo exclusivo de los catálogos de terremotos, ya que los máximos sismos que se generan en las fuentes tienen periodos de recurrencia de cientos o miles de años, y por el momento no hay catálogos confiables que cubran tales periodos. En lugar de ello suelen estimarse la máxima longitud de ruptura, máxima área de ruptura y máximo desplazamiento que pueden presentarse en la fuente (Coppersmith et al., 1990). Con el uso de relaciones empíricas entre dichos parámetros y la magnitud, se obtienen magnitudes máximas esperadas. Como hay dispersión asociada a los valores de la magnitud máxima, se emplea la desviación estándar para medir la dispersión (Wells et al., 1994).

## 2. Leyes de atenuación

Las leyes de atenuación permiten estimar intensidades sísmicas en cualquier sitio, en función de la magnitud del terremoto y la distancia del sitio al foco del sismo. Por ejemplo, es posible estimar la aceleración del suelo que se podrá presentar en un sitio alejado 100 km del origen de un sismo profundo de magnitud 7. Tal como se intuye, las leyes de atenuación dependen de las características del origen del sismo, del camino que recorrerán las ondas sísmicas y de las propiedades del terreno. Es decir, el movimiento generado por un sismo en un sitio depende de los siguientes factores:

- De la profundidad del foco (efecto de fuente y de trayectoria).
- De los materiales que recorren las ondas (roca sana, fracturada; efecto de trayectoria).
- Del relieve del sitio (un cerro o un valle; efectos topográficos).
- De los materiales en el sitio (suelo, roca; efecto de sitio).

Para obtener relaciones empíricas de atenuación requeridas para el cálculo de peligro sísmico, se emplean los registros de movimientos sísmicos. Dichos registros incluyen diversos factores que modifican a las ondas sísmicas durante su recorrido. Sin embargo, los registros que existen son insuficientes para predecir la atenuación sísmica ante cualquier tipo de sismo y tipo de medio, a través del cual se propagan las ondas sísmicas en la Tierra. Esto es así porque, como se mencionó anteriormente, los factores que determinan las características de los sismos son diversos y los registros disponibles son únicamente de ciertos tipos de sismos, de ciertas regiones y de algunas magnitudes. De manera que las intensidades que se obtienen con las leyes de atenuación tienen asociadas grandes dispersiones.

No se conocen leyes de atenuación específicamente desarrolladas para las Islas Canarias ni hasta el momento hay información acelerométrica suficiente como para diseñarla. En este caso se hace necesario encontrar una ley de atenuación derivada para condiciones semejantes a la sismotectónica del archipiélago. Hasta el momento se conocen dos leyes: la de [Munson y Thurber, 1997](#) (definida para el archipiélago de Hawái), y la de [Beauducel et al., 2004](#) (en [Douglas, 2011](#), para la islas de Guadalupe). Se ha optado por la primera de las dos para realizar los cálculos.

CRISIS requiere un archivo por cada ley de atenuación a considerar en los cálculos. Cada archivo deberá contener en forma de tabla los valores que representen a la ley de atenuación de intensidades sísmicas, es decir, valores que permitan generar curvas de atenuación de intensidades originadas por sismos de diferentes magnitudes, a diversas distancias del foco de los terremotos. El empleo de tablas para representar leyes de atenuación facilita la incorporación de complejos comportamientos asociados a la atenuación de las ondas sísmicas.

### **3. Parámetros de integración espacial**

En el programa CRISIS 2007, dos parámetros controlan la división de fuentes de tipo área: 1) El tamaño equivalente, igual a la raíz cuadrada del área de la subfuente triangular y 2) La distancia equivalente, igual a la distancia desde el centroide de la subfuente hasta el sitio en estudio dividido por el tamaño equivalente. Los valores de dichos parámetros se determinan por ensayo y error y criterio experto.

Los resultados de peligro sísmico son también sensibles a la forma de las fuentes, especialmente a la forma de los triángulos en que se dividirán dichas fuentes. Por

ello, se recomienda evitar geometrías que al interpolar produzcan triángulos muy alargados, algo fácil de verificar por método gráfico.

Finalmente y para reducir la irregularidad de la distribución en los valores de PGA causada por la discretización espacial utilizada en el cálculo, se ha llevado a cabo una interpolación lineal de Delaunay, con un paso de malla de 0,001º, y posteriormente se ha proyectado a ETRS89 UTM28N, con un paso de malla de 100 m.

## **5.4. Efecto de sitio**

Al igual que en el resto del territorio nacional, la peligrosidad sísmica en la Comunidad Autónoma de Canarias queda definida según la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 (RD 997/2002 de 27 de septiembre; BOE 244 de 11 de octubre de 2002) a la que se debe incorporar la *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España (IGN, 2013)*, mediante dos parámetros: el coeficiente de contribución,  $S$ , que tiene en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremoto sobre el terreno que cabe esperar y la aceleración sísmica básica,  $a_b$ , valor de la aceleración horizontal característica del terreno, expresado en relación al valor de la gravedad y determinado de forma probabilística para un periodo de retorno de quinientos años. Por ello, una vez identificada la aceleración sísmica básica, así como la PGA, hay que asignar la clasificación de cada unidad geotécnica a efectos de su comportamiento sísmico, definiendo el coeficiente de suelo  $C$  en cada emplazamiento como promedio del valor de cada unidad geotécnica.

### **5.4.1. Geotécnia**

Para incorporar en el cálculo la zonificación geotécnica, se ha procedido a realizar una parcelación a escala 1/25.000 del archipiélago canario en áreas de características litológico-geotécnicas similares, que permitan establecer cada unidad geotécnica. Las características litológicas de los terrenos canarios son muy conocidas por los numerosos estudios geológicos que se han realizado en las islas y que han dado como fruto una extensa bibliografía así como una detallada cartografía geológica del territorio insular. Esto contrasta de manera significativa con una literatura muy escasa en lo que se refiere a propiedades geotécnicas de los materiales canarios, debido, en parte, a la singularidad de las formaciones geológicas de las Islas Canarias que, en muchos casos, no permite extrapolar los

estudios realizados en otras partes del territorio peninsular y, en parte también, al ámbito privado y disperso de la información existente.

Por este motivo se utilizó la caracterización geotécnica más reciente de los materiales canarios (disponible para consultas en WMS de IDECAN) y con ello se ha obtenido una variedad representativa de litotipos comunes al conjunto del archipiélago, cada uno de los cuales presenta unas características petrológicas y geotécnicas propias.

Los grupos de terrenos que contempla el CTE (Código Técnico de la Edificación aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo) para la programación del reconocimiento del terreno, se recogen en el capítulo 3 “Estudio Geotécnico”, del Documento Básico de Seguridad Estructural-Cimientos (DB SE-C) y son los que figuran en la Tabla 23.

Tabla 23. Grupos de Terreno según el Código Técnico de Edificación de 2006.

Grupo del terreno	Descripción del terreno
T-1	Terrenos favorables: aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados.
T-2	Terrenos intermedios: los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 m
T-3	Terrenos desfavorables: los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores. De forma especial se considerarán en este grupo los siguientes terrenos: a) Suelos expansivos b) Suelos colapsables c) Suelos blandos o sueltos d) Terrenos kársticos en yesos o calizas e) Terrenos variables en cuanto a composición y estado f) Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m g) Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos h) Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades i) Terrenos con desnivel superior a 15° j) Suelos residuales k) Terrenos de marismas

### 5.4.2. Geología

Dado que en las Islas Canarias, tanto la litología como la edad de las formaciones condicionan de manera directa o indirecta el comportamiento geotécnico de los materiales, se ha considerado la división de las diferentes superficies territoriales de cada una de las siete islas del archipiélago canario, en diez unidades geotécnicas según la combinación de dichos criterios litológicos y geocronológicos. Estas presentan, en su conjunto, una homogeneidad suficiente para su delimitación cartográfica, para su asimilación a los grupos de terrenos contemplados en el CTE, y para el establecimiento de los criterios mínimos referidos a la planificación de la información geotécnica a incorporar en el cálculo derivado del análisis probabilístico del peligro sísmico (PSHA, *probabilistic seismic hazard assessment*).

Atendiendo a la cartografía geológica del archipiélago canario (extraída de la base cartográfica GEODE, Geología digital Continua de España, IGME), se ha considerado la síntesis y reclasificación de ésta a unidades geotécnicas y luego éstas pueden ser asociadas a un grupo de terreno de los que contempla el CTE, según establece la GETCAN-011 ([Gobierno de Canarias, 2011](#)). Dicha diferenciación se estructura en la siguiente clasificación y su distribución geográfica por islas:

#### **Unidad I: complejos basales**

Los complejos basales, considerados como las raíces de los primitivos edificios volcánicos, afloran en extensiones significativas en las islas de La Palma, La Gomera, Fuerteventura y de manera más incipiente en el Norte de Anaga (Tenerife). Los complejos basales de las Islas Canarias están representados por sedimentos Cretácicos, lavas submarinas y rocas plutónicas (gabros y sienitas). Este conjunto está atravesado por multitud de diques con una densidad de intrusión tan elevada que frecuentemente no dejan rastro de la roca encajante. Es habitual que presenten un alto grado de alteración por lo que los materiales rocosos son muy deleznable y de difícil reconocimiento.

#### **Unidad II: coladas y macizos sálicos**

Para esta unidad, constituida por materiales rocosos altamente resistentes, aparecen dos formas de afloramiento: 1) como coladas de gran espesor, habitualmente con disposición horizontal o como paquetes tabulares gruesos con pendientes no muy pronunciadas y gran extensión horizontal. En ocasiones,

estos paquetes pueden estar formados por brechas muy compactas de fragmentos de naturaleza igualmente sílica y 2) como domos, a modo de macizos rocosos de grandes dimensiones verticales enraizados en el subsuelo y de extensión horizontal más limitada. En cualquier caso, las características geotécnicas de ambos tipos de afloramiento se consideran, a efectos prácticos, similares por lo que procede considerarlos como una misma unidad geotécnica.

### **Unidad III: macizos basálticos alterados**

Esta unidad está formada por coladas basálticas de pequeño espesor (en torno a un metro o menos) con un grado de alteración moderada a alta. La peculiaridad destacable de las coladas basálticas es que se manifiestan como una alternancia vertical de niveles de compacto basáltico (roca basáltica) y niveles de escorias (material granular) de autobrechas. Además, en estos macizos alterados aparecen también intercalados mantos piroclásticos y frecuentes zonas rubefactadas (almagres), que corresponden a niveles de paleosuelos calcinados por la colada suprayacente. Esta unidad es muy heterogénea, tanto en la vertical por la alternancia, como en la horizontal por el alcance limitado de las coladas. En términos generales, los niveles escoriáceos suelen comportarse como un suelo granular poco o nada compacto, si bien en estados de alteración avanzados se observa una impermeabilización y formación de materiales arcillosos que plantean posibles problemas como expansividad, deformabilidad e inestabilidades de ladera.

### **Unidad IV: coladas basálticas sanas**

En esta unidad se integran las coladas basálticas que conservan su estructura original debido a su escaso estado de alteración, por lo que se pueden distinguir los tipos pahoehoe y aa. Las lavas pahoehoe se caracterizan por tener una superficie lisa y ondulada, y en detalle tienen un aspecto de cuerdas entrelazadas y corrugadas. Internamente presentan un gran número de vacuolas o pequeños huecos más o menos esféricos que les otorgan gran porosidad. Las lavas aa, o lavas escoriáceas, se forman con magmas más viscosos que las lavas pahoehoe, por lo que fluyen más lentamente y adquieren un aspecto muy diferente: la superficie es extremadamente rugosa o incluso espinosa, por lo que localmente se conocen como *malpaís*. Entre estos dos tipos extremos de lavas existen términos intermedios que se denominan lavas de transición.

**Unidad V: materiales piroclásticos**

Esta unidad está formada por extensiones de depósitos piroclásticos de composición indiferenciada. Se forman por caída de fragmentos de magma emplazándose en las inmediaciones del foco de emisión, y por tanto, las potencias y el buzamiento están relacionados con la disposición de la topografía en el momento de la erupción. La erosión también determina variaciones en los espesores originales. Se clasifican según el tamaño y la composición. Los piroclastos basálticos de pequeño tamaño (entre 2 y 20 mm) se denominan lapilli o picón; los de mayor tamaño reciben el nombre genérico de escorias, que en algunos casos adquieren formas redondeadas al girar en el aire (bombas); los traquíticos y/o fonolíticos, más ligeros, más claros y más porosos, constituyen los depósitos de piedra pómez. Los denominados conos de cínider están formados por depósitos mixtos, predominando los términos escoriáceos desde el punto de vista granulométrico. Se acumulan alrededor de la chimenea eruptiva construyendo los conos volcánicos, también conocidos como conos de tefra. Localmente estos materiales pueden estar cementados y entonces reciben en nombre genérico de *tobas*.

**Unidad VI: materiales brechoides**

Esta unidad está asociada a episodios eruptivos de alta explosividad, relacionados o no, con procesos de colapso de caldera o a fenómenos de deslizamientos. Su resultado final es una masa caótica y brechoide, formada por bloques de diversa naturaleza, en general muy angulosos, muy heterométricos, englobados en una matriz fina, más o menos cementada, y ocasionalmente muy dura. Forman paquetes con espesores de hasta cientos de metros y presentan pendientes poco pronunciadas de brechas compactas y caóticas, de naturaleza mono o polimíctica.

**Unidad VII: depósitos aluvio-coluviales**

Los depósitos aluvio-coluviales se extienden a lo largo de los tramos inferiores y zonas de desembocadura de los fondos de barranco. Ocasionalmente pueden aparecer a cotas superiores como consecuencia del encajamiento de los barrancos. Generalmente presentan escaso espesor. También forman mantos en forma de abanicos con signos notables de inestabilidad, ya que, en ocasiones, la pendiente es prácticamente la pendiente de equilibrio. Son depósitos constituidos por arenas y cantos muy heterométricos con tamaños desde centimétricos a mayores de un metro y clastos redondeados a subredondeados. La matriz, de naturaleza detrítica, puede ser abundante o estar ausente.

### **Unidad VIII: arenas litorales**

Esta unidad está constituida por depósitos de playa, formados por arena suelta de coloración oscura y naturaleza basáltica, o bien, arena clara de naturaleza silíceo o calcárea, en extensiones o acumulaciones por transporte y sedimentación marina o eólica (formaciones de dunas). Aparecen a lo largo de la línea de costa o en sus proximidades, así como en las desembocaduras de los principales barrancos.

### **Unidad IX: suelos arcillosos y/o limosos**

Esta unidad está constituida por suelos residuales y sedimentos lacustres arcillosos y limosos. Se encuentran bien desarrollados en cuencas endorreicas o cuasi-endorreicas, lacustres, por sedimentación de detritos finos o muy finos de tamaño arcilla, o bien asociados a la intensa alteración superficial del material rocoso hasta la formación de capas de suelos que, en ocasiones, pueden alcanzar espesores de varios metros.

### **Unidad X: rellenos antrópicos**

Bajo esta denominación se incluyen los depósitos antrópicos en general y de diverso origen, como por ejemplo, materiales derivados de movimientos de tierras asociados a la construcción de vías de comunicación, de edificaciones, de canteras (activas o abandonadas), explanadas para infraestructuras, etc. La naturaleza de estos depósitos es muy variada y en ocasiones depende de la finalidad para la que fueron destinados. En términos generales se pueden asimilar a sedimentos heterométricos, con bolos y bloques angulosos a subangulosos y abundantes finos en la matriz (arenas y limos). En determinadas circunstancias pueden contener materiales de reciclaje y residuos de la actividad humana.

En la Tabla 24 se muestra un resumen con las equivalencias entre las unidades geotécnicas diferenciadas para este estudio, según se definen en la GETCAN-011, y los grupos de terrenos definidos en el CTE. A cada tipo de terreno se le asigna un coeficiente según la NCSE-02 (Tabla 25).

Tabla 24. Equivalencias entre Unidades Geotécnicas y grupos de terrenos del CTE.

Unidad	Litología	Subunidad	Grupo CTE
I	Complejos basales		T3e
II	Coladas y macizos sálicos		T1
III	Macizos basálticos alterados		T3h
IV	Coladas basálticas sanas	IVa coladas aa poco escoriáceas	T1
		IVb coladas pahoehoe y aa muy escoriáceas	T3e
V	Materiales piroclásticos	Va ignimbritas y tobas	T2
		Vb depósitos piroclásticos sueltos o débilmente cementados	T3b
VI	Materiales brechoides		T2
VII	Depósitos aluvio-coluviales		T3c
VIII	Arenas litorales		T3c
IX	Suelos arcillosos y/o limosos		T3j
X	Rellenos antrópicos		T3f

Tabla 25. Coeficientes para cada tipo de terreno según la NCSE-02.

Unidad	Grupo CTE	Coefficiente del terreno (NCSE-02)
II, IVa	T1	1,0
IVb*, Va, VI	T2, T1-T3	1,3
III	T3h, T3	1,6
I, Vb, VII, VIII, IX, X	T3e, T3b, T3c, T3j, T3f	2,0

Una vez asignados los coeficientes de terreno, la NCSE-02 establece que el coeficiente de amplificación del terreno ( $S$ ) se encuentra relacionado con el coeficiente de terreno ( $C$ ) según el rango de valores que tome la aceleración sísmica básica. Dado que en Canarias, ésta alcanza pero no supera los 0,1 g, el coeficiente de amplificación es directamente proporcional al coeficiente de terreno, en un factor de 1/1,25; si bien con la *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012* del IGN (2013), bajo estas mismas condiciones se corrige a  $S = C$ .

### 5.4.3. Topografía

Hasta aquí se ha evaluado la PGA y el efecto de los materiales geológicos en la amplificación de la PGA. No obstante, son muchos los estudios que desde hace tiempo buscan correlaciones con la geometría del terreno desde distintas

perspectivas, pues se sabe que tiene influencia (IGME y DGOT Murcia, 2007). Algunos autores han evaluado el impacto de la topografía en la amplificación sísmica con medidas sobre el terreno y mediante análisis del registro instrumental, mostrando amplificaciones de hasta un 50% mayor en zonas de alta pendiente (Boore, 1973), e incluso mayores, como el caso del terremoto de Chile de 1985 (Celebi, 1987). Más recientemente, con el desarrollo de la tecnología computacional y los avances en la cantidad y calidad de información topográfica, se ido incorporando la información de la geometría del terreno en distintos ámbitos y de distintas maneras en los análisis de la amplificación sísmica. Geli (1988) realizó una recopilación de algunos de los métodos desde elementos finitos, diferencias finitas, métodos de ecuación integral y método de contorno, comparándolos con la teoría de amplificación sísmica. Shiann-Jong et al. (2009) muestran en una modelización 3D por el método de análisis espectral, cómo la variación en la PGA es del orden del 50% (amplificación-atenuación) al considerar el relieve. Anggraeni (2010) concluye que en todos los casos se observa una amplificación sísmica en las partes altas de las laderas y se observan relaciones complejas en las superficies de las laderas, llegando a cifrar la variación en el orden del 70% para el caso del terremoto de Haití de 2010, y para la región de Kashmir señala que la variación en la amplificación sísmica entre zonas de valle y zonas elevadas es de hasta el doble.

Algunas de las formas más recientes de incluir la pendiente en los análisis de amplificación sísmica son los siguientes:

- El efecto de concentración y dispersión de geometrías convexas y cóncavas respectivamente (Lay y Walalce, 1995).
- El tamaño de las pendientes y la frecuencia normalizada (Scott et al., 1997),
- La dirección relativa de las ondas sísmicas respecto a la orientación de las pendientes (Ashford y Sitar, 1997).
- La pendiente como indicador de las condiciones de amplificación de sitio (Wald y Allen, 2007).
- La topografía como indicador de deformación activa (Kirby et al., 2008),
- El gradiente hipsométrico como parte de análisis multivariable en SIG (Laín y Llorente, 2011).
- La pendiente del terreno como variable en modelos numéricos de simulación de la amplificación sísmica (Anggraeni, 2010; Huang, 2013).

Wald y Allen (2007) muestran unas gráficas de correlación entre la velocidad de las ondas S ( $V_s$ ) y la pendiente, que si bien parecen apuntar a una correlación no lineal (Figura 89), se puede evaluar siguiendo una relación indizada de 0 al 70%. Por su parte, en el trabajo del IGME y DGOT Murcia, (2007), establecen criterios de amplificación sísmica crecientes considerando las recomendaciones del Eurocódigo 8, de tal modo que para pendientes comprendidas entre 15 y 25° la amplificación sería del 30%, entre 25 y 45° del 60% y más de 45° es del 200%. De seguir este último método, las aceleraciones alcanzan valores difícilmente justificables (más de dos veces la aceleración máxima registrada durante el terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011, de magnitud 9 y aceleración cercana a 3g), lo que posiblemente se deba al ajuste de los rangos en relación al tamaño de pixel (la escala de trabajo) y a la adaptación a las condiciones del terreno (IGME y DGOT Murcia, 2007).

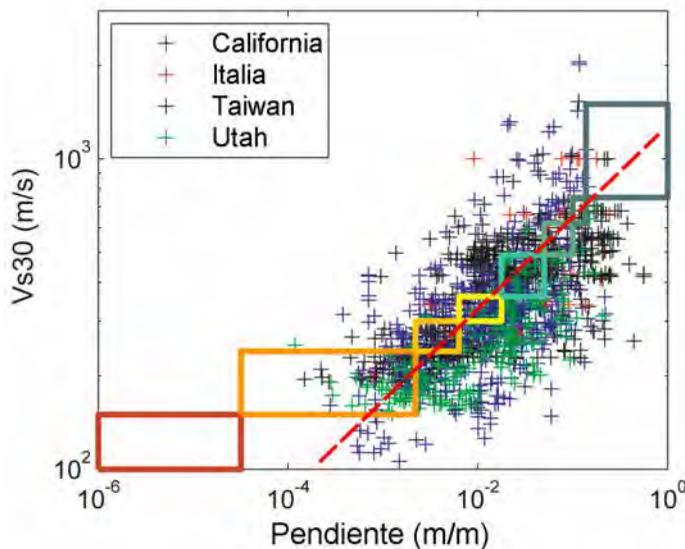


Figura 89. Correlación entre  $V_s$  y la topografía. Modificado de Wald y Allen (2007).

Para este proyecto, se ha adoptado de entre los distintos métodos, el criterio que parecía devolver aceleraciones en un rango aceptable, suponiendo que la aceleración sigue una amplificación que se puede calcular con la indización del 0 al 70% del gradiente, y sin atenuación, lo que se calcula según la siguiente relación:

$$PGA_{st} = PGA_s * \left( \frac{S}{MAX(S)} \right) * 1,7$$

Donde  $PGA_s$  es la aceleración sísmica con efecto de sitio sin considerar el efecto topográfico,  $S$  es la pendiente, y  $PGA_{st}$  la aceleración sísmica con efecto de sitio considerando el efecto topográfico.

## 5.5. Vulnerabilidad y correlación PGA-Intensidad

La primera norma sismorresistente se publica en España en 1962, y se renueva en los años 1968, 1978, 1994, 2002 y una última actualización en 2013 que si bien no ha pasado al plano normativo, se considera como tal de facto. La norma de 1962 excluía los archipiélagos balear y canario, que se incorporan en 1968. Canarias queda entonces en la zona de intensidad MSK VII. La norma PDS-1974 no incluye cambios significativos en lo que a la cartografía se refiere, salvo que las regiones sísmicas pasan a describirse como zonas primera, segunda y tercera (sismicidad baja, media y alta respectivamente). Según [Cabañas Rodríguez, et al. \(2011\)](#) la NCSE-94 representa la renovación más importante de las normas sismorresistentes, con un gran salto cualitativo, pues se presenta por primera vez el mapa de peligrosidad sísmica en términos de aceleraciones sísmicas, donde las Islas Canarias figuran con una aceleración básica de 0,04g. Además, se trata de un mapa elaborado conforme a estudios probabilistas de peligrosidad e incluye para los espectros de respuesta el efecto de terremotos regionales. En la NCSE-02, se establece como ámbito de aplicación el valor de la aceleración básica mayor o igual a 0,08g para estructuras a base de pórticos de hormigón y 0,04 para edificaciones de fábrica. La mampostería ordinaria queda proscrita en todo el ámbito de aplicación de la norma ([Cabañas Rodríguez, et al. 2011](#)). En la actualización de los mapas de peligrosidad sísmica del IGN ([2013](#)), se hace un análisis de relaciones empíricas entre aceleraciones pico del suelo e intensidades. De entre las muchas disponibles, se comparan las relaciones de [Atkinson y Kaka, 2007 \(AK07\)](#); [Tselentis y Danciu \(2008\)](#); [Faenza y Michelini, 2010 \(FM10\)](#) y [Worden et al. 2012](#). De entre éstas relaciones, el IGN ([2013](#)) considera que se ajusta mejor una relación ponderada entre la AK07 y la FM10, lo que queda según la siguiente expresión, ya adaptada al archipiélago canario (y cuyos resultados cartográficos se pueden observar desde la Figura 91 a la Figura 97):

$$I_{EMS98} = (2,65 + 1,39 * \text{Log}_{10}(PGA) + 1,68 + 2,58 * \text{Log}_{10}(PGA)) * 0,5$$

Donde PGA se expresa en  $\text{cm/s}^2$  ( $g/980,0665$ ). El IGN (2013) aclara que, si bien existen distintas escalas de intensidad (escala MCS – Mercalli-Cancani-Sieberg; escala MWN –Mercalli-Wood-Neuman; escala MM – Mercalli Modificada; escala EMS98, European Macroseismic Scale, Grünthal, 1998), y a pesar de que existen recomendaciones explícitas sobre la no conveniencia de conversión entre diferentes escalas, se admite una equivalencia práctica entre ellas. Este método de cálculo plantea una interpretación algo compleja, pues su estimación viene del análisis de datos subjetivos con un margen de incertidumbre importante (Figura 90). El motivo de esta incertidumbre es que son muchos los elementos que influyen en la determinación de la intensidad, como los componentes de amplitud del sismo, los componentes direccionales, los efectos de sitio (tipo de suelo, propiedades geotécnicas y geométricas de los materiales infrayacentes, topografía), la frecuencia o la duración de la oscilación. Por este motivo, un valor de aceleración del 0,10 g puede dar lugar a intensidades entre V y VIII. Sería conveniente realizar un análisis de la distribución de frecuencias para aclarar, en el sentido de acotar o para conocer mejor el comportamiento de esta incertidumbre, pero es complicado debido a la decreciente disponibilidad de datos conforme aumenta la aceleración registrada y a la influencia de los efectos de sitio. Además, la escala de intensidad no es una escala numérica, sino una escala subjetiva y cualitativa, y las aproximaciones cuantitativas a ésta son una forma de describir un fenómeno gobernado por más variables de las que hasta el momento pueden ser descritas con precisión; y por si fuera poco, las variaciones locales en las aceleraciones pueden ser significativas, distorsionando aún más, las posibles aproximaciones.

La EMS-98 (Grünthal, 1998) propone una correlación entre la clase de vulnerabilidad y el tipo de estructura (Tabla 26), así como los grados de daño que se pueden esperar según la tipología (Tabla 27; Tabla 28 y Tabla 29). Para asignar a un único edificio o a un pequeño grupo de edificios una tipología de vulnerabilidad hay que evaluar aspectos tales como la edad del edificio, su tipología constructiva y estructural, estado de conservación, altura y número de plantas, geometría, uso, o considerar daños observados de terremotos pasados en edificios similares. Sin embargo, cuando se trata de evaluar grandes conjuntos de datos, se suele optar por simplificar en la medida de los datos disponibles. Entre los métodos disponibles para acometer esta evaluación de vulnerabilidad se encuentran los métodos empíricos, los analíticos y los híbridos (SVAPG, 2013).

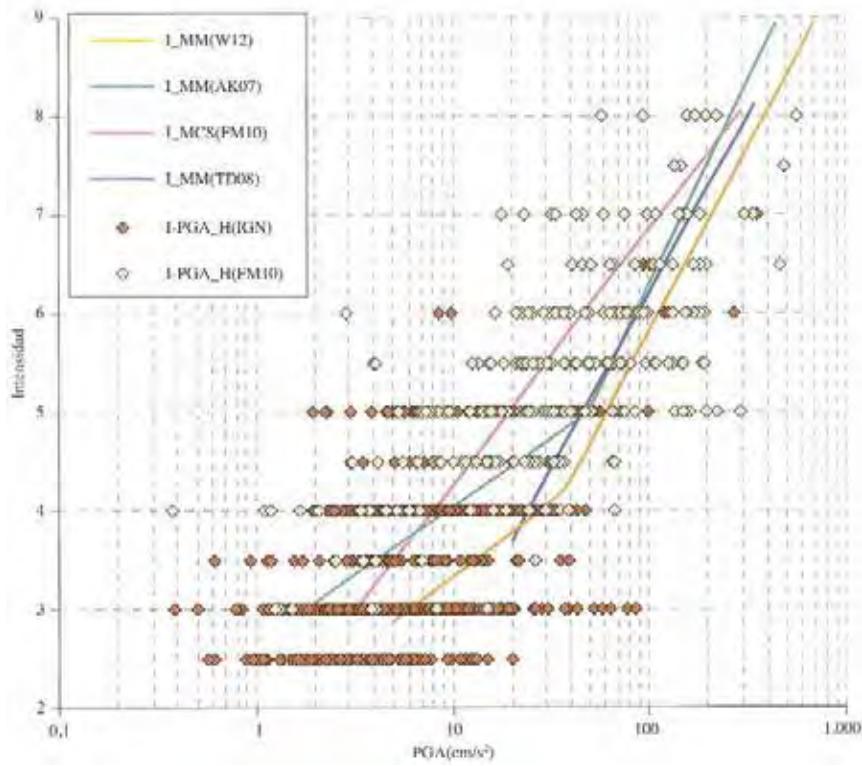


Figura 90. Relaciones analizadas y datos de intensidad vs PGA de España (en marrón oscuro) e Italia (en amarillo claro; IGN, 2013).

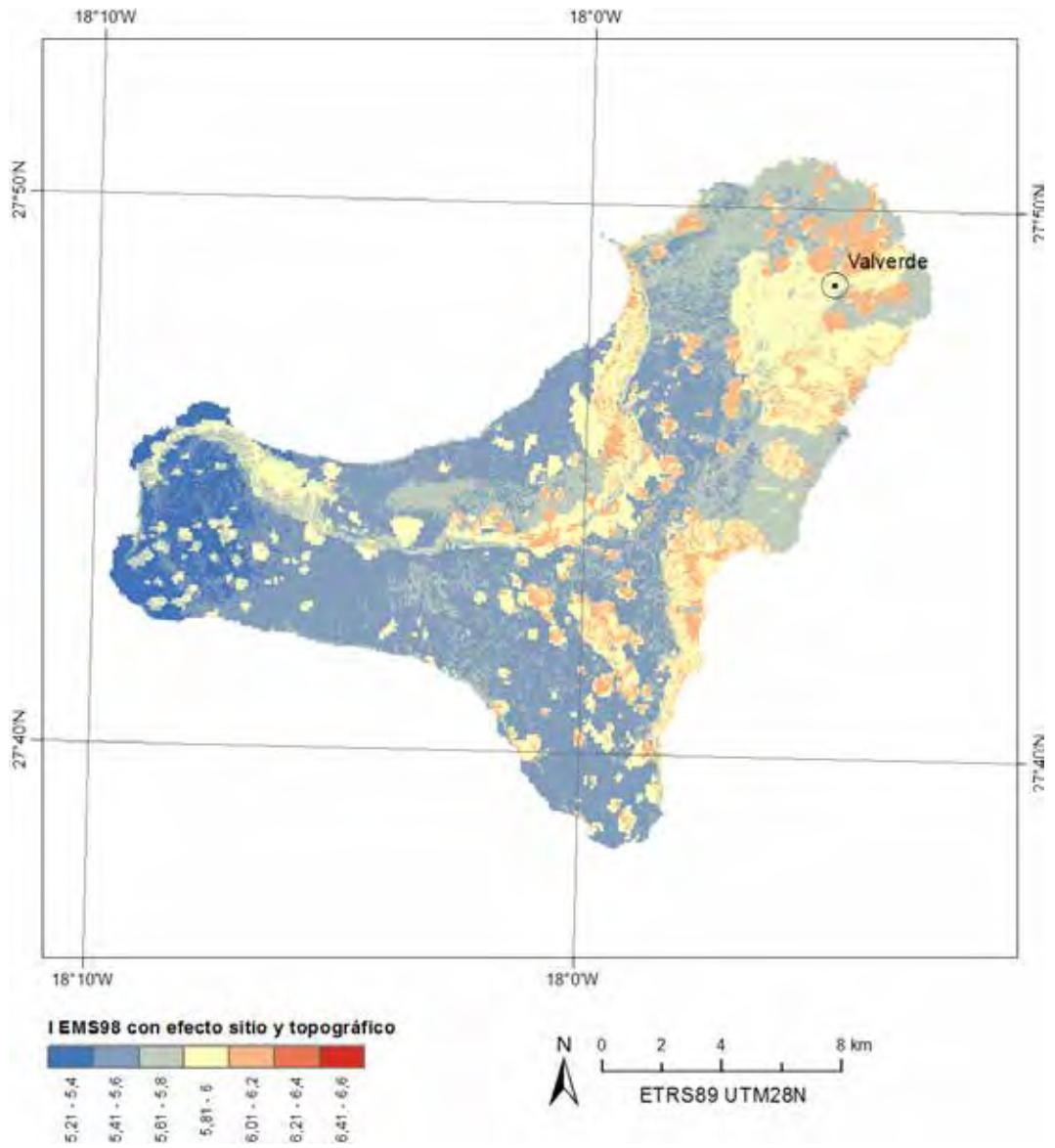


Figura 91. Mapa de Intensidades EMS98 de El Hierro.

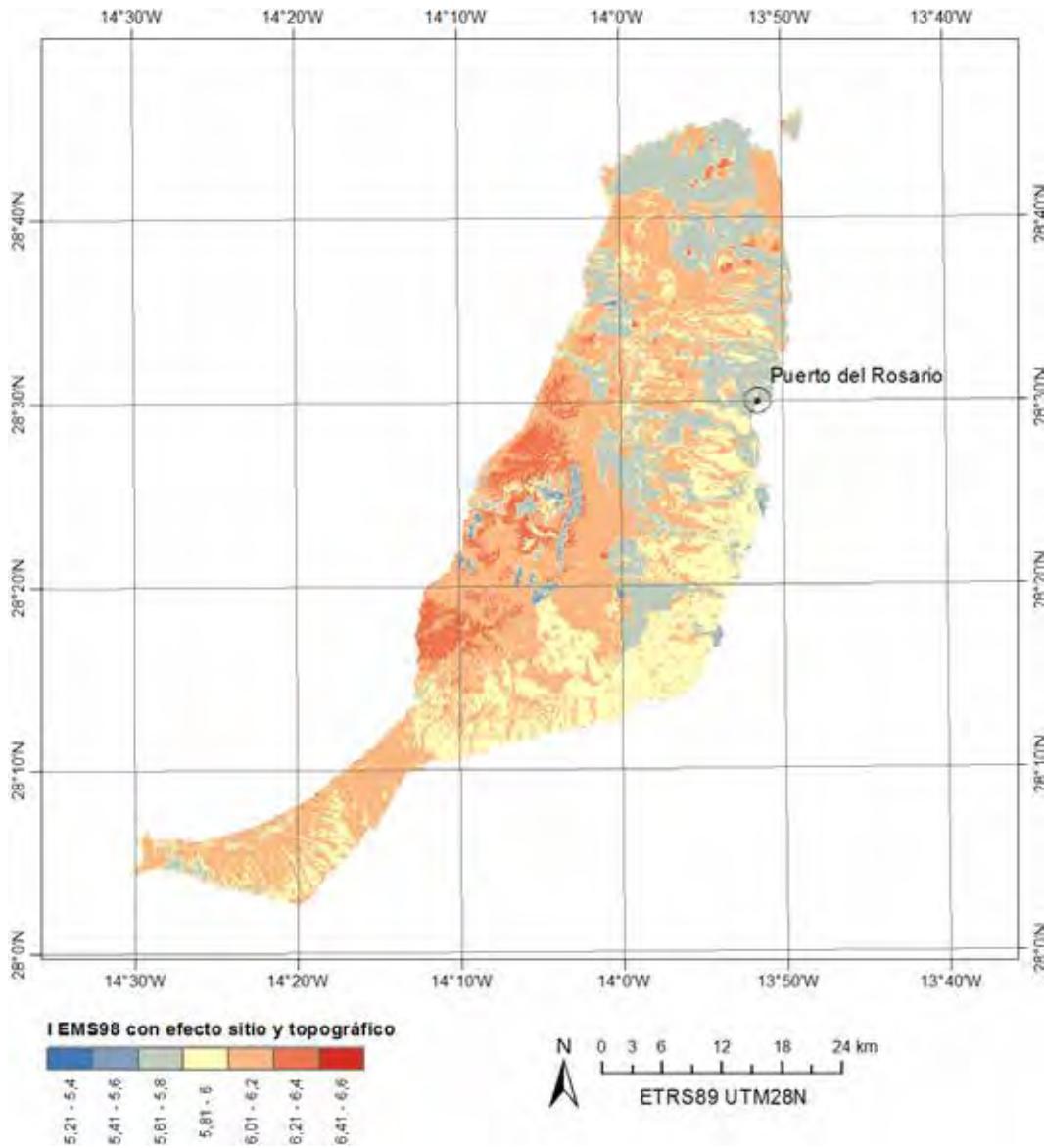


Figura 92. Mapa de Intensidades EMS98 de Fuerteventura.

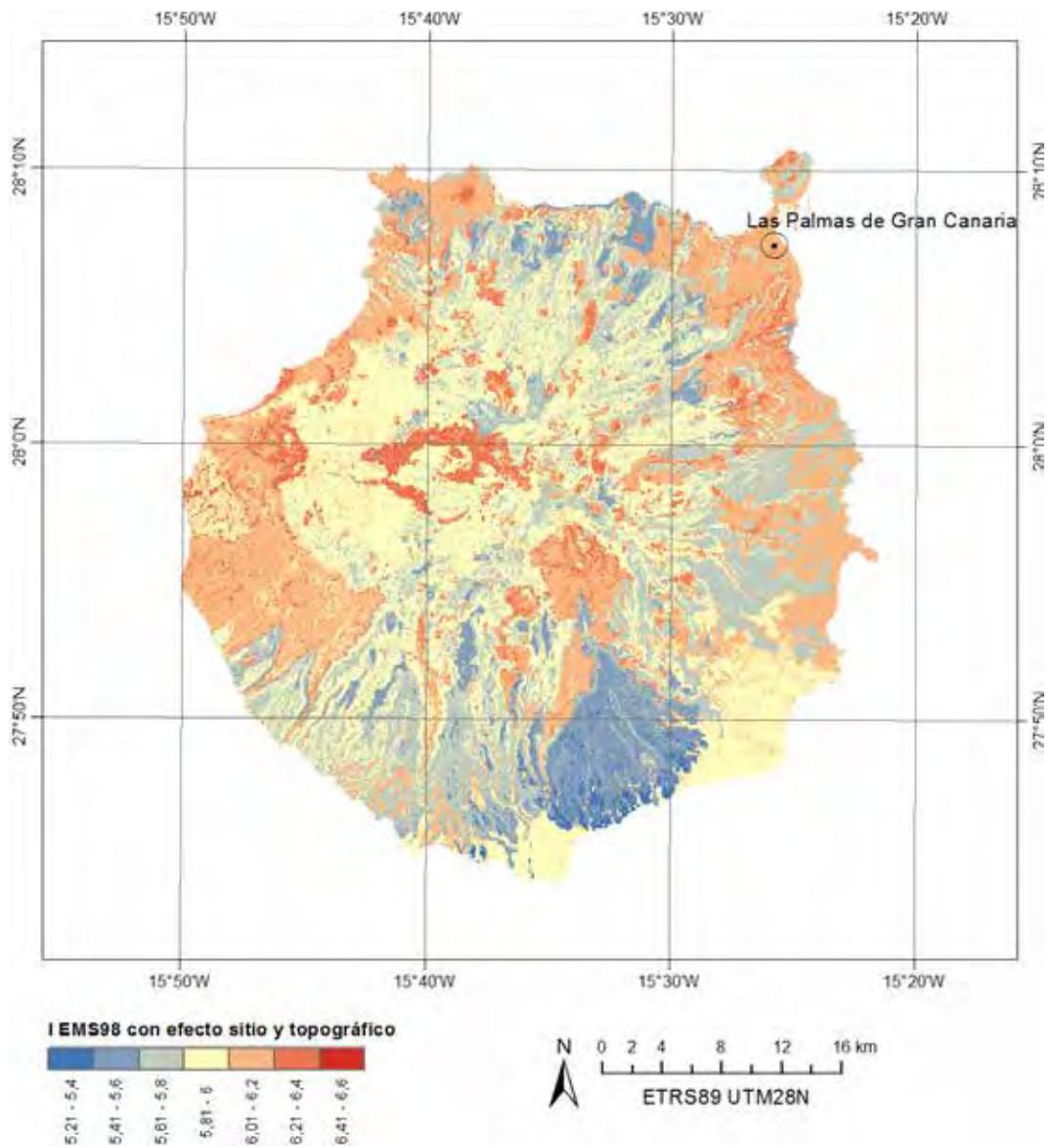


Figura 93. Mapa de Intensidades EMS98 de Gran Canaria.

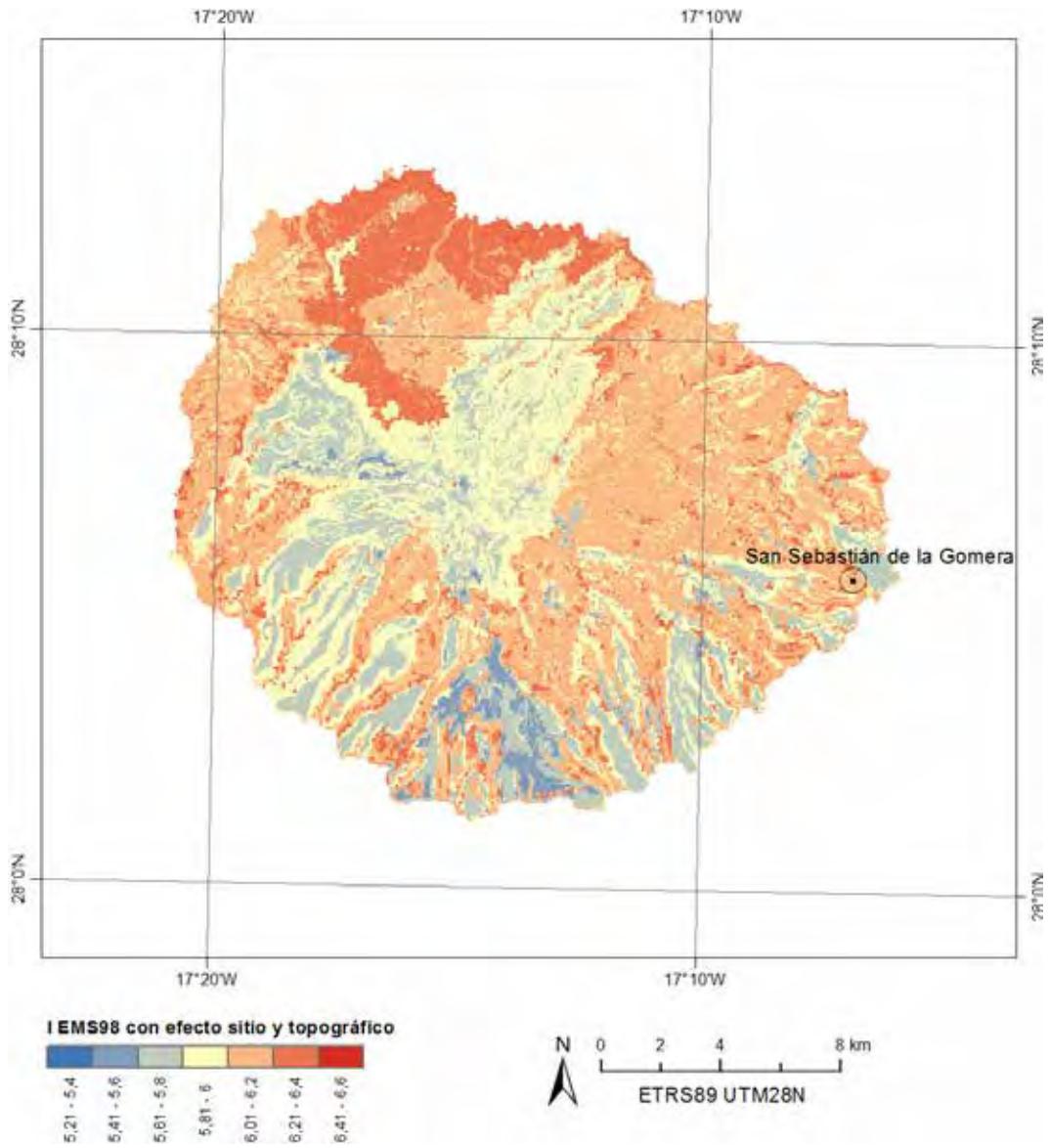


Figura 94. Mapa de Intensidades EMS98 de La Gomera.

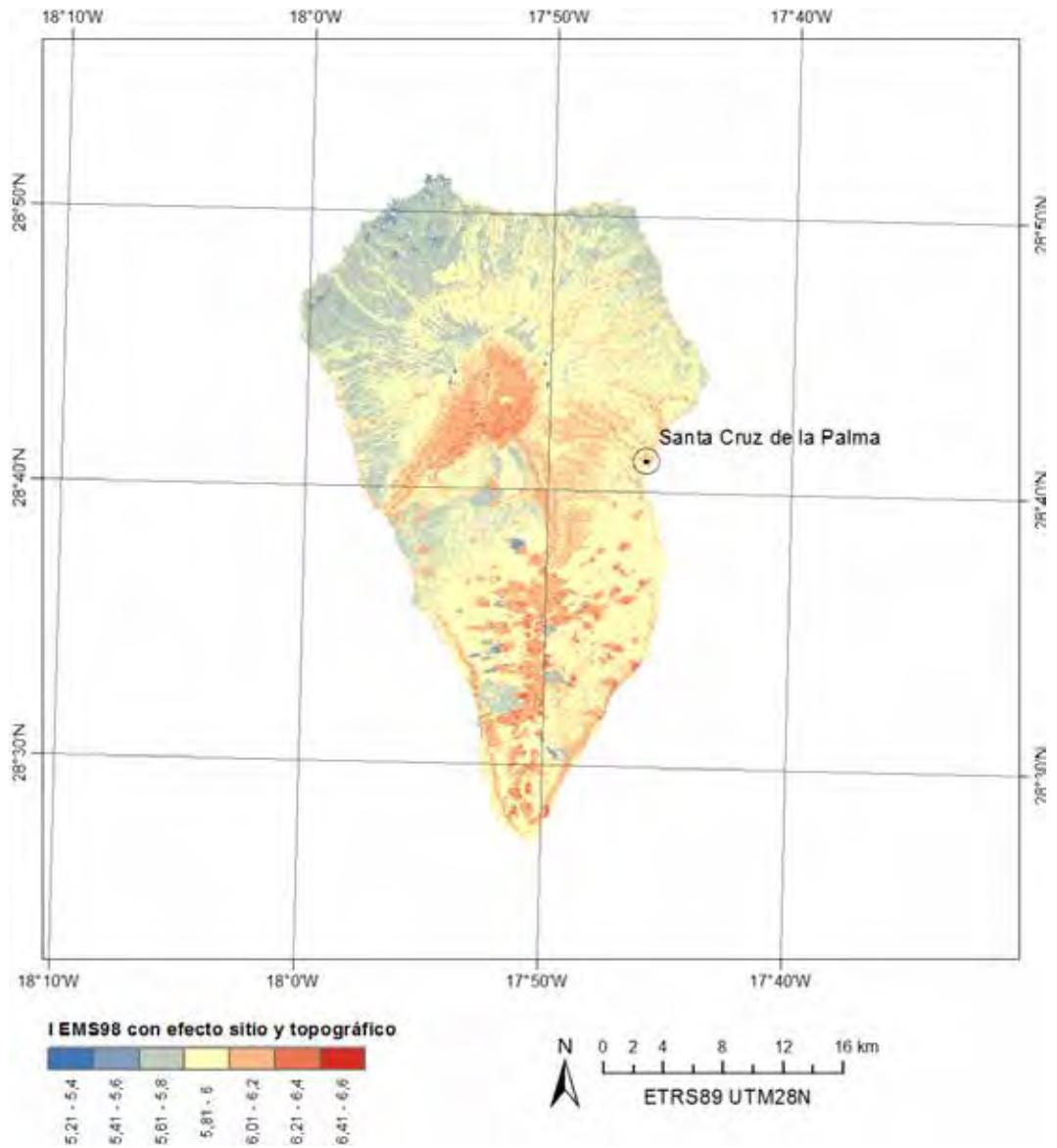


Figura 95. Mapa de Intensidades EMS98 de La Palma.

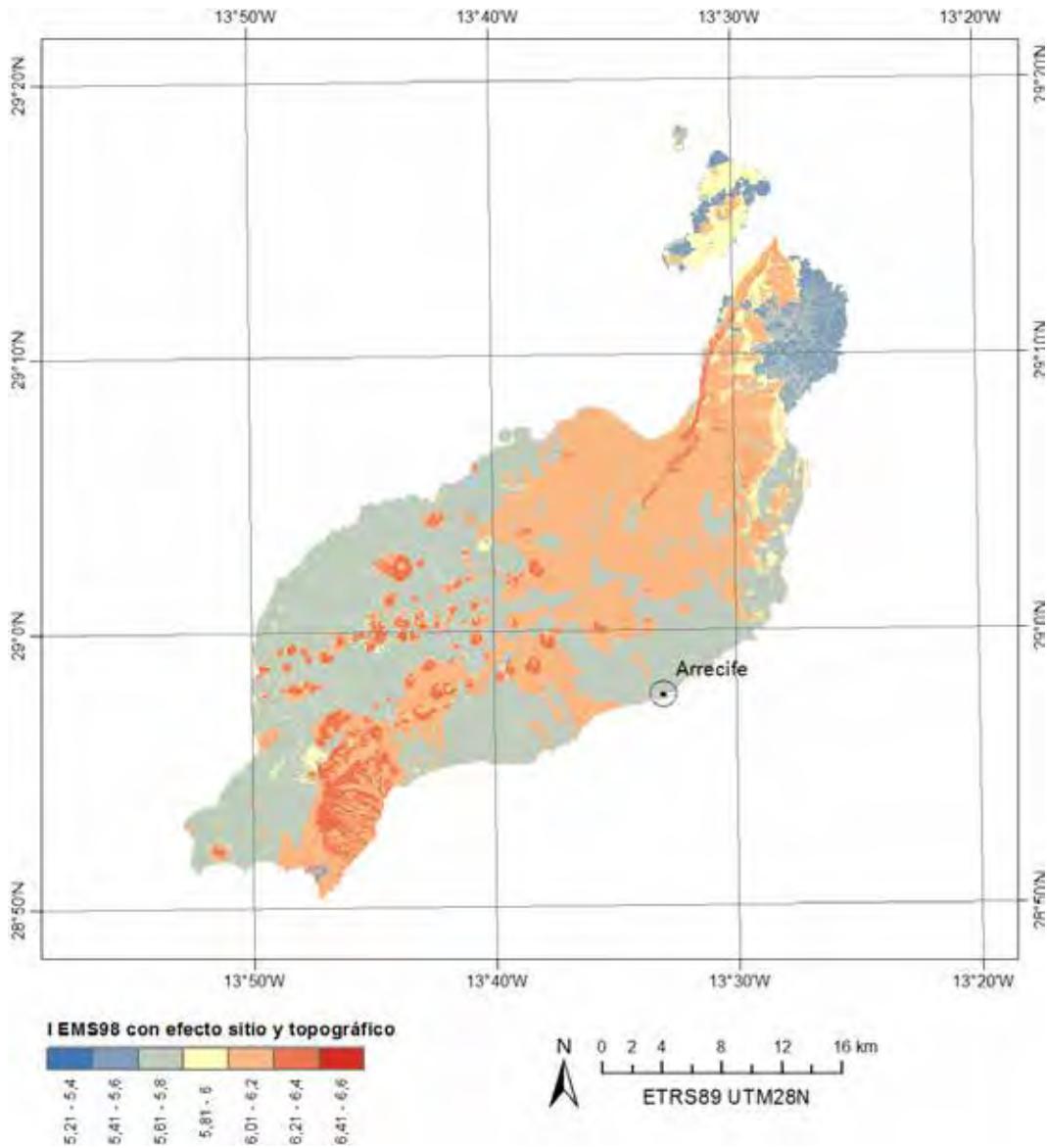


Figura 96. Mapa de Intensidades EMS98 de Lanzarote.

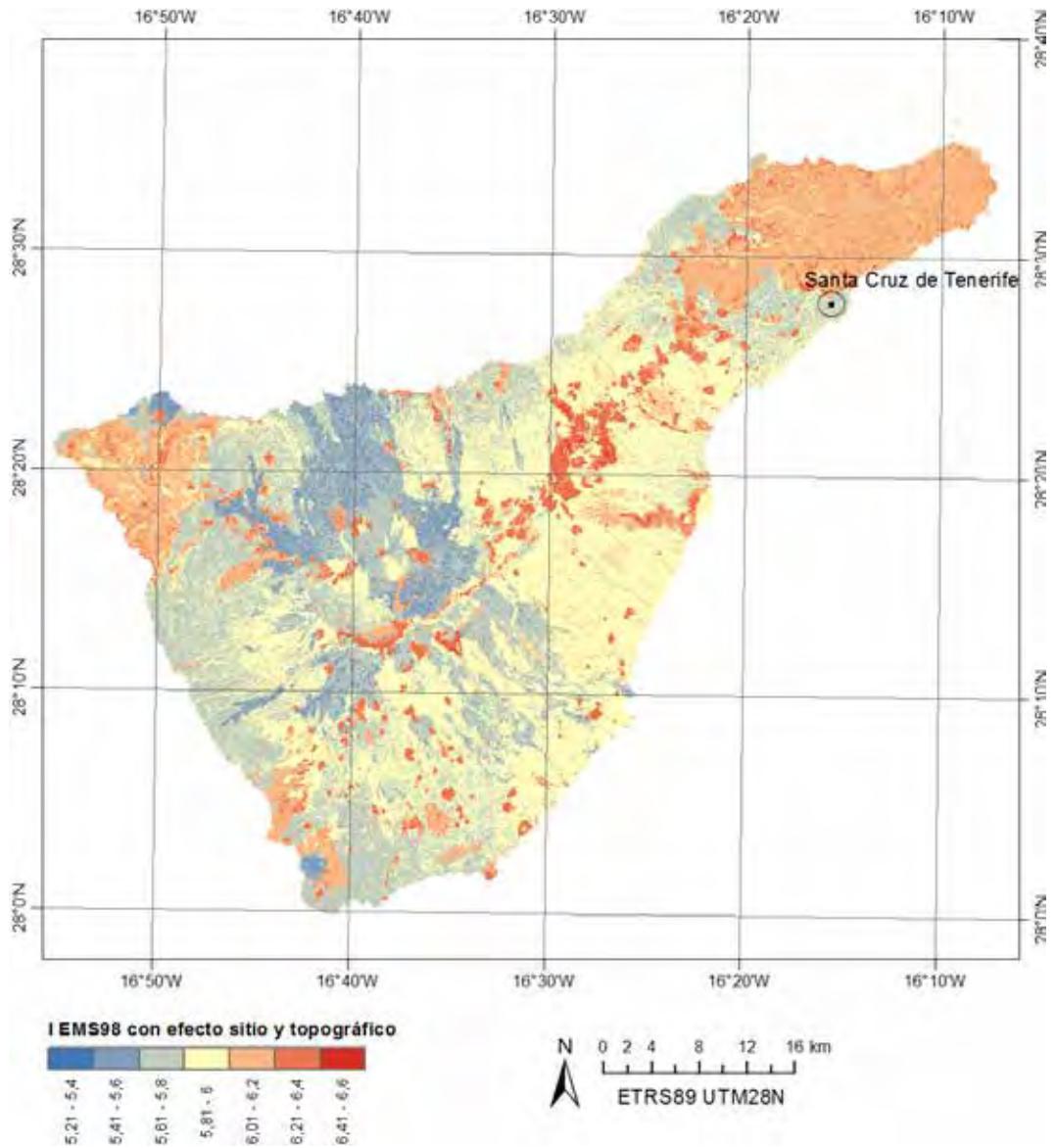


Figura 97. Mapa de Intensidades EMS98 de Tenerife.

Tabla 26. Clases de vulnerabilidad según estructuras (edificios).

Tipo de estructura		Clase de vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
Fábrica	Piedra suelta o canto rodado						
	Adobe (ladrillos de tierra)						
	Mampostería						
	Sillería						
	Sin armar, de ladrillos o bloques						
	Sin armar, con forjado s de hormigón armado						
	Armada o confinada						
Hormigón armado (HA)	Estructura sin diseño sismorresistente (DSR)						
	Estructura con nivel medio de DSR						
	Estructura con nivel alto de DSR						
	Muros sin DSR						
	Muros con nivel medio de DSR						
	Muros con nivel alto de DSR						
Acero	Estructuras de acero						
Madera	Estructuras de madera						

Clase de vulnerabilidad más probable ■  
 Rango probable ■  
 Rango menos probable, excepcional ■

Tabla 27. Clasificación de daños a edificios de fábrica (esquemas tomados de SISIMUR).



**Grado 1: Daños de despreciables a ligeros**

Ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros. Fisuras en muy pocos muros. Caída sólo de pequeños trozos de revestimiento. Caída de piedras sueltas de las partes altas de los edificios en muy pocos casos.



**Grado 2: Daños moderados.**

Daños estructurales ligeros, daños no-estructurales moderados. Grietas en muchos muros. Caída de trozos bastante grandes de revestimiento. Colapso parcial de chimeneas.



**Grado 3: Daños de importantes a graves.**

Daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves. Grietas grandes y generalizadas en la mayoría de los muros. Se sueltan tejas del tejado. Rotura de chimeneas por la línea del tejado. Se dañan elementos individuales no-estructurales (tabiques, hastiales y tejados).



**Grado 4: Daños muy graves.**

Daños estructurales graves, daños no-estructurales muy graves. Se dañan seriamente los muros. Se dañan parcialmente los tejados y forjados.



**Grado 5: Destrucción.**

Daños estructurales muy graves. Colapso total o casi total.

Tabla 28. Daños a edificios de hormigón armado (esquemas tomados de SISMIMUR).



**Grado 1: Daños de despreciables a ligeros**

Ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros. Fisuras en el revestimiento de pórticos o en la base de los muros. Fisuras en tabiques y particiones.



**Grado 2: Daños moderados**

Daños estructurales ligeros, daños no-estructurales moderados. Grietas en vigas y pilares de pórticos y en muros estructurales. Grietas en tabiques y particiones; caída de enlucidos y revestimientos frágiles. Caída de mortero de las juntas de paneles prefabricados.



**Grado 3: Daños de importantes a graves**

Daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves. Grietas en pilares y en juntas viga/pilar en la base de los pórticos y en las juntas de los muros acoplados. Desprendimiento de revocos de hormigón, pandeo de la armadura de refuerzo. Grandes grietas en tabiques y particiones; se dañan paneles de particiones aislados.



**Grado 4: Daños muy graves**

Daños estructurales graves, daños no-estructurales muy graves. Grandes grietas en elementos estructurales con daños en el hormigón por compresión y rotura de armaduras; fallos en la trabazón de la armadura de las vigas; ladeo de pilares. Colapso de algunos pilares o de una planta alta.



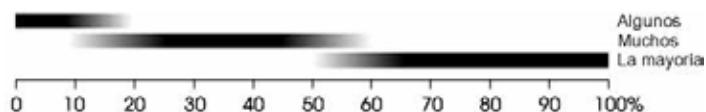
**Grado 5: Destrucción**

Daños estructurales muy graves. Colapso de la planta baja o de partes (por ejemplo alas) del edificio.

Tabla 29. Definiciones de los grados de intensidad de la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98; Grünthal, 1998).

<b>Intensidad I</b> No sentido	No sentido, ni en las condiciones más favorables. Ningún efecto. Ningún daño.
<b>Intensidad II</b> Apenas sentido	El temblor es sentido sólo en casos aislados (1%) de individuos en reposo y en posiciones especialmente receptivas dentro de edificios. Ningún efecto. Ningún daño
<b>Intensidad II</b> Débil	El terremoto es sentido por algunos dentro de edificios. Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor. Los objetos colgados oscilan levemente. Ningún daño.
<b>Intensidad IV</b> Ampliamente observado	El terremoto es sentido dentro de los edificios por muchos y sólo por muy pocos en el exterior. Se despiertan algunas personas. El nivel de vibración no asusta. La vibración es moderada. Los observadores sienten un leve temblor o cimbreo del edificio, la habitación o de la cama, la silla, etc. Golpeteo de vajillas, cristalerías, ventanas y puertas. Los objetos colgados oscilan. En algunos casos los muebles ligeros tiemblan visiblemente. En algunos casos chasquidos de la carpintería. Ningún daño.
<b>Intensidad V</b> Fuerte	El terremoto es sentido dentro de los edificios por la mayoría y por algunos en el exterior. Algunas personas se asustan y corren al exterior. Se despiertan muchas de las personas que duermen. Los observadores sienten una fuerte sacudida o bamboleo de todo el edificio, la habitación o el mobiliario. Los objetos colgados oscilan considerablemente. Las vajillas y cristalerías chocan entre sí. Los objetos pequeños, inestables y/o mal apoyados pueden desplazarse o caer. Las puertas y ventanas se abren o cierran de pronto. En algunos casos se rompen los cristales de las ventanas. Los líquidos oscilan y pueden derramarse de recipientes totalmente llenos. Los animales dentro de edificios se pueden inquietar. Daños de grado 1 en algunos edificios de clases de vulnerabilidad A y B.
<b>Intensidad VI</b> Levemente dañino	Sentido por la mayoría dentro de los edificios y por muchos en el exterior. Algunas personas pierden el equilibrio. Muchos se asustan y corren al exterior Pueden caerse pequeños objetos de estabilidad ordinaria y los muebles se pueden desplazar. En algunos casos se pueden romper platos y vasos. Se pueden asustar los animales domésticos (incluso en el exterior). Se presentan daños de grado 1 en muchos edificios de clases de vulnerabilidad A y B; algunos de clases A y B sufren daños de grado 2; algunos de clase C sufren daños de grado 1.
<b>Intensidad VII</b> Dañino	Cada grado de intensidad puede incluir también los efectos de la sacudida de los grados de intensidad menores, aunque dichos efectos no se mencionen explícitamente. La mayoría de las personas se asusta e intenta correr fuera de los edificios. Para muchos es difícil mantenerse de pie, especialmente en plantas superiores. Se desplazan los muebles y pueden volcarse los que sean inestables. Caída de gran número de objetos de las estanterías. Salpica el agua de los recipientes, depósitos y estanques. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 2 ; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad C presentan daños de grado 2. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 1.
<b>Intensidad VIII</b> Gravemente dañino	Para muchas personas es difícil mantenerse de pie, incluso fuera de los edificios. Se pueden volcar los muebles. Caen al suelo objetos como televisiones, máquinas de escribir, etc. Ocasionalmente las lápidas se pueden desplazar, girar o volcar. En suelo muy blando se pueden ver ondulaciones. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 2.

<b>Intensidad IX</b> Destructor	Pánico general. Las personas pueden ser lanzadas bruscamente al suelo. Muchos monumentos y columnas se caen o giran. En suelo blando se ven ondulaciones. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A presentan daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad E presentan daños de grado 2.
<b>Intensidad X</b> Muy destructor	La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad A presentan daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad F presentan daños de grado 2.
<b>Intensidad XI</b> Devastador	La mayoría de los edificios de clase B de vulnerabilidad presentan daños de grado 5. La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4; muchos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad F sufren daños de grado 2; algunos de grado 3.
<b>Intensidad XII</b> Completamente devastador	Se destruyen todos los edificios de clases de vulnerabilidad A, B y prácticamente todos los de clase C. Se destruyen la mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad D, E y F. Los efectos del terremoto alcanzan los efectos máximos concebibles.



Los métodos empíricos de evaluación de la vulnerabilidad se basan en técnicas de identificación de patrones de daños o de pérdidas para sismos registrados y de este modo realizar predicciones para el futuro. Éstos métodos plantean el problema de que su validación es muy local su generalización no siempre es posible. Con los avances en computación y en técnicas de recolección de datos, aparecieron modelos con una base matemática, que se conocen como métodos analíticos. A medio camino entre los empíricos y los analíticos quedarían aquellos modelos analíticos que presentan calibraciones basadas en datos empíricos; se conoce a estos últimos como modelos semi-analíticos o híbridos. En España, los Planes Especiales de Riesgo sísmico que contemplan el catálogo de elementos vulnerables, han seguido otro modelo de evaluación: el de criterio experto. Este modelo requiere un conocimiento importante por parte de los evaluadores de las condiciones locales de las edificaciones y las particularidades de la región. En todos ellos, con independencia del grado de simplificación, número de elementos a considerar o uso o no de índices de vulnerabilidad, la variable que adquiere mayor significancia es la edad de los edificios. La edad de

los edificios se agrupa de forma aproximada a los periodos de aplicación de las correspondientes normas sísmicas (Figura 98).

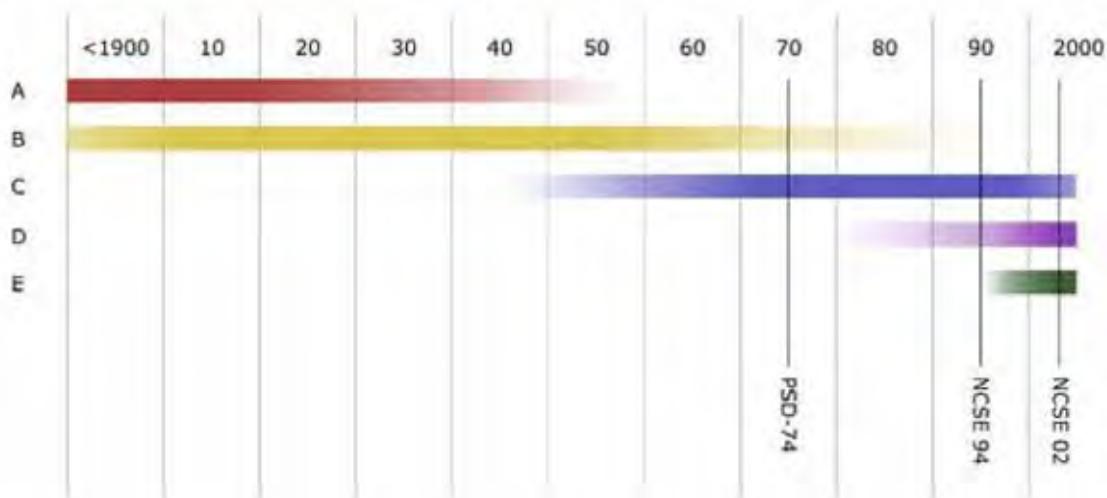


Figura 98. Gráfico de tipologías de vulnerabilidad (sólo identificadas de la A a la E) según EMS-98 y cronología (Región de Murcia, 2006).

El motivo de que el año sea la variable de mayor peso es doble, por un lado la fecha de construcción de un edificio es un parámetro fácil de obtener para la gran mayoría de los edificios (de las BBDD del Catastro, por ejemplo) y por otro, si bien con cierto grado de incertidumbre, la fecha de construcción se relaciona con un modelo o tipología constructiva dominante en la época (Figura 98). En la Tabla 30 se reproduce la correlación entre tipologías constructivas y edad de construcción para el caso de Lorca, en la Tabla 31 y en la Figura 99 para el caso de la región de Murcia.

Para el caso del SISMIGAL, se emplea la agrupación de viviendas según González et al. (2001), reproducida en la Tabla 32 y según DGPCE (2002), reproducida en la Tabla 33.

Tabla 30. Asignación de vulnerabilidad de los edificios de Lorca de acuerdo a las metodologías de la escala EMS, Índice de Vulnerabilidad y FEMA; *Cabañas Rodríguez, et al. (2011)*.

Tipología	Edad	Nº plantas	EMS	Iv	FEMA	Code
EMM	<1900	1-2	A	0.85 M11L	34 URML	Pre-code
		3-5	A	0.89 M11M	35 URMM	Pre-code
		6	A	0.93 M11H	35 URMM	Pre-code
EML	1921 -1940	1-2	B	0.72 M31L	34 URML	Pre-code
		3-5	B	0.76 M31M	35 URMM	Pre-code
		6	B	0.80 M31H	35 URMH	Pre-code
EMH	1941 -1964	1-2	C	0.59 M34L	31 RM2L	Pre-code
		3-5	C	0.61 M34M	32 RM2M	Pre-code
		6	C	0.67 M34H	33 RM2H	Pre-code
EHP	1965 -1996	1-2	C	0.59 M34L	31 RM2L	Pre-code
		3-5	C	0.60 RC1M	23 C3M	Pre-code
		6	C	0.68 RC1H	24 C3H	Pre-code
EHP94	1997 -2004	1-2	D	0.40 RC1L	22 C3L	Lowcode
		3-5	D	0.44 RC1M	23 C3M	Lowcode
		6	D	0.48 RC1H	24 C3H	Lowcode
EHP02	2005 -2010	1-2	D	0.40 RC1L	22 C3L	Lowcode
		3-5	D	0.44 RC1M	23 C3M	Lowcode
		6	D	0.48 RC1H	24 C3H	Lowcode

Tabla 31. Matriz de porcentajes de tipologías según vulnerabilidad para las zonas urbanas de la región de Murcia (*Región de Murcia, 2006*).

	<1900	1901 a 1920	1921 a 1940	1941 a 1950	1951 a 1960	1961 a 1970	1971 a 1980	1981 a 1990	1991 a 1995	1996 a 2001
A	0,80	0,72	0,72	0,69	0,46	0,18	0,05	0,00	0,00	0,00
B	0,20	0,28	0,28	0,28	0,49	0,38	0,40	0,38	0,28	0,18
C	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,44	0,55	0,57	0,62	0,69
D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,13

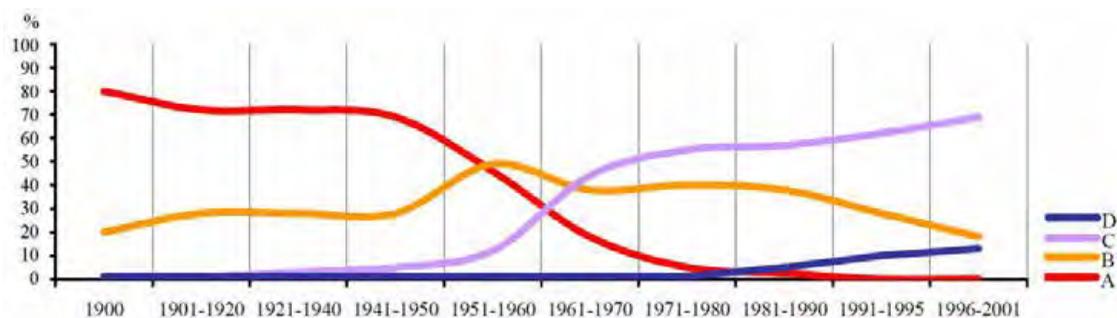


Figura 99. Representación gráfica de la evolución de las tipologías constructivas para las regiones urbanas de Murcia (Región de Murcia, 2006).

Tabla 32. Clasificación de edificios según su edad y altura en los grupos de vulnerabilidad de la EMS-92 (González et al. 2001) expresados en porcentajes.

Altura	Hasta 1950		1951-1970		Posterior a 1970		Tipo EMS-92
	Localización		Localización		Localización		
	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	
< 5 plantas	20	30	5	15	0	5	A
	80	70	50	70	0	20	B
	0	0	45	15	85	65	C
	0	0	0	0	15	10	D
	Tipo 1	Tipo 4	Tipo 7	Tipo 10	Tipo 13	Tipo 16	
5 plantas	20	40	10	20	5	10	A
	80	60	60	70	20	30	B
	0	0	30	10	65	55	C
	0	0	0	0	10	5	D
	Tipo 2	Tipo 5	Tipo 8	Tipo 11	Tipo 14	Tipo 17	
> 5 plantas	40	60	15	30	8	15	A
	60	40	70	65	27	45	B
	0	0	15	5	60	40	C
	0	0	0	0	5	0	D
	Tipo 3	Tipo 6	Tipo 9	Tipo 12	Tipo 15	Tipo 18	

Tabla 33. Clasificación de edificios según su antigüedad y tipología EMS-98 (DGPCE 2002).

Fecha	Urbana	Rural
Antes de 1950	35%A+65%B	45%A+55%B
1951-1975	15%A+65%B+20%C	25%A+70%B+5%C
1976-1995	7%A+20%B+58%C+15%D	5%A+20%B+65%C+10%D
Posterior a 1995	5%A+10%B+50%C+20%D+15%E	20%B+60%C+20%D

## 6. Estudio del volcanismo

El estudio del volcanismo se ha basado en los escenarios de coladas de lava desarrollados en el marco del proyecto VOLCANTEN (Lain et al., 2007). Por ello, ha sido necesario hacer una revisión de la metodología utilizada para obtener los escenarios más representativos. Parte de los apartados que a continuación se presentan forman parte de dicho proyecto.

### 6.1. Introducción

Según el Programa Global de Volcanismo, existen alrededor de 1.500 volcanes activos, considerando como tales a aquellos que han manifestado actividad volcánica en los últimos 10.000 años. En muchos de ellos hay importantes asentamientos humanos como consecuencia de la fertilidad de sus suelos y del interés turístico que generan. En España, la única zona volcánica activa son las Islas Canarias, donde en la última década se han producido cinco crisis sismovolcánicas: una en Tenerife 2004 y cuatro en El Hierro desde 2011. Sólo la primera de El Hierro finalizó con una erupción submarina en octubre de 2011 (Figura 100, Tabla 34). En el resto la actividad cesó sin manifestarse actividad eruptiva.

Los largos periodos de reposo de algunos volcanes, añadido a que algunas de las manifestaciones de actividad volcánica no siempre tienen efectos perceptibles en superficie, hacen que muchas veces los habitantes próximos a volcanes activos no tengan conciencia del peligro existente. Los principales daños causados por la actividad volcánica son sobre todo de tipo socioeconómico, y según muchos autores (el propio USGS en su sitio web o Wignall, 2011, en la prestigiosa revista *Nature*, y otros muchos), también de tipo medio-ambiental con consecuencias graves en el entorno y normalmente irreversibles. Si bien esta última aseveración pasa por alto que el fenómeno volcánico es de carácter natural y la esencia de sus procesos implica cambios, en ocasiones dramáticos, en las condiciones físicas y químicas del medio. En relación con otros fenómenos naturales, los peligros volcánicos provocan directamente un menor número de víctimas (aunque en grandes erupciones las víctimas indirectas por hambre, enfermedades o lahares pueden ser numerosas), lo que tal vez sea debido a que es relativamente fácil identificar las morfologías volcánicas, a que es frecuente que existan precursores volcánicos, y a que la velocidad con que se suelen desarrollar los procesos suele permitir la evacuación de las personas.

Tenerife, por la presencia del Teide y Lanzarote, por las evidencias geotérmicas superficiales asociadas a la erupción más larga del archipiélago (Timanfaya, 1730-1736), son las dos islas con un mayor número de estudios sobre peligrosidad y riesgo volcánico. Si bien el interés por la isla de El Hierro en términos de peligrosidad volcánica comenzó antes de las últimas crisis ([Becerril Carretero, 2009](#)), se han incrementado notablemente los estudios como consecuencia de éstas y del impacto mediático de la erupción submarina, llegando a ser una imagen de la isla la ganadora del premio de 2012 de la NASA, (Figura 100).

Tabla 34. Volcanismo histórico en Canarias.

Isla	Año	Erupción	Duración
La Palma	1430/1440?	Tacande o Montaña Quemada	?
	1585	Tehuya	19 may-10 ago
	1646	Martín o Tígalate	2 oct-21 dic
	1677-1678	San Antonio	17 nov-21 ene
	1712	El Charco	9 oct-3 dic
	1949	San Juan o Nambroque	24 jun-30 jul
	1971	Teneguía	26 oct-18 nov
Tenerife	1492	Boca Cangrejo	?
	1704/1705	Siete Fuentes	31 dic-4-5 ene
		Fasnia	5-16 ene
		Arafo	2 feb-27 mar
	1706	Garachico o Montaña Negra	5 may-13 jun
	1798	Chahorra o Narices Del Teide	9 jun-14-15 sep
1909	Chinyero	18-27 nov	
Lanzarote	1730-36	Timanfaya	1 sep-16 abr
	1824	Tao o Clérigo Duarte	31 jul
		Nuevo Del Fuego o Chinero	29 sep-5 oct
		Tinguatón o Volcán Nuevo	16-24 oct
El Hierro	1793	Lomo Negro	?
	2011-2012	Sur de La Restinga	10 oct-5 mar



Figura 100. Imagen en color natural tomada por el satélite EO-1 de la mancha por la erupción submarina en El Hierro en 2012, galardonada como “imagen del año” (de <http://earthobservatory.nasa.gov>).

## 6.2. El volcanismo histórico en Canarias

Las erupciones ocurridas durante el periodo histórico en Canarias (los últimos 500 años aproximadamente) han sido un total de 16 (Tabla 34). Todas las erupciones fueron fisurales y subaéreas a excepción de la erupción submarina de El Hierro. Es decir, se alimentaron a través de un conducto planar por el que ascendió el magma, que al intersectar la superficie, generó varios centros de emisión alineados según la dirección del conducto. En algunas ocasiones, como las erupciones triples de Tenerife (1704-1705) y Lanzarote (1824) las distintas fases de la erupción corresponden a fisuras eruptivas separadas varios kilómetros de distancia y con periodos de inactividad de días a meses entre ellas.

En cuanto a la tipología eruptiva, las erupciones canarias se caracterizan por ser predominantemente efusivas, emitiendo coladas lávicas y piroclastos. En el caso de las erupciones submarinas, las coladas son de tipo almohadilladas y los piroclastos y la fragmentación de las coladas dan lugar a la formación de hialoclastitas. En el caso de las erupciones subaéreas, los piroclastos son tanto de proyección balística como de dispersión eólica. Las columnas eruptivas están en general poco desarrolladas, produciéndose la dispersión de cenizas hacia la dirección predominante del viento. Ocasionalmente se han producido eventos explosivos debido a la interacción del magma con los acuíferos o el agua de mar (erupciones hidromagmáticas). La erupción submarina del Mar de Las Calmas (en el Hierro) también fue de carácter efusivo, con emisión de coladas submarinas y de hialoclastitas.

En Canarias en general y en Tenerife en particular, los flujos de lava constituyen el fenómeno volcánico más común. Estas lavas pueden clasificarse como de tipo pahoehoe, aa y de transición. Los espesores son muy variables, desde pocos centímetros a decenas de metros. Esto se debe en gran medida a la variedad de composiciones que se encuentran en la isla, que permiten la formación de lavas muy fluidas (máficas) a más viscosas (félsicas). Las lavas más fluidas pueden llegar a moverse con velocidades en superficie de hasta unos 10 km/h en zonas de fuerte pendiente, y pueden alcanzar velocidades superiores a 30 km/h en el interior de tubos volcánicos. Las lavas más viscosas presentan un movimiento notablemente más lento.

Las distancias máximas recorridas son del orden de varios kilómetros, pero en muchos casos son difíciles de estimar, ya que alcanzan la línea de costa formando en ocasiones plataformas costeras o islas bajas. En algunas zonas de Tenerife, las

lavas llegaron a zonas costeras donde el agua atrapada en el sedimento bajo las coladas se evaporó provocando explosiones en el seno de la colada y dando lugar a la formación de pseudocráteres, muy similares a conos volcánicos pero sin raíz magmática. Asociado a la formación de estos pseudocráteres se produce la fragmentación y proyección de fragmentos de lava que pueden alcanzar distancias de decenas de metros, aumentando la peligrosidad del evento.

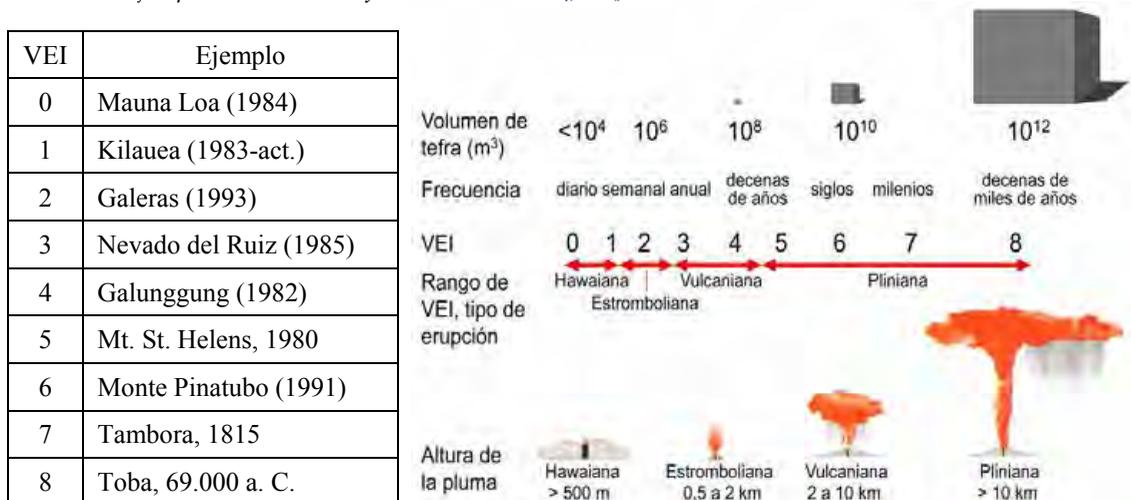
En Tenerife, las cuatro erupciones históricas fueron de tipo fisural, efusivas y de corta duración (entre 5 y 22 días; [Romero, 1991](#)). La peligrosidad de este tipo de erupciones es baja y los daños asociados a ellas suelen ser escasos, salvo en el caso de que afecten a núcleos urbanos o zonas con infraestructuras de importancia. En este sentido, cabe destacar la erupción del volcán Garachico, durante la cual, las lavas emitidas alcanzaron el pueblo de Garachico y destruyeron parte del mismo y el principal puerto de la isla, que en aquella época comunicaba Canarias y América.

Para estas erupciones de tipo efusivo se ha considerado un Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés, Tabla 35 y Tabla 36) equivalente a un valor entre 2 y 3. Dado que casi todos los datos geocronológicos fueron obtenidos de coladas de lava, y por lo tanto podrían relacionarse con eventos efusivos se ha estimado la probabilidad de que ocurra un evento volcánico de VEI 2-3 en Tenerife es de una vez cada 400 años en promedio.

Tabla 35. Índice de Explosividad Volcánica (VEI; [Newhall y Self, 1982](#)).

VEI	Clasificación	Descripción	Altura de la columna eruptiva	Volumen de material emitido
0	Erupción hawaiana	no-explosiva	< 100 m	> 1.000 m <sup>3</sup>
1	Erupción stromboliana	ligera	100-1.000 m	> 10.000 m <sup>3</sup>
2	Erupción vulcaniana - stromboliana	explosiva	1-5 km	> 1.000.000 m <sup>3</sup>
3	Erupción Vulcaniana (sub-pliniana)	violenta	5-15 km	> 10.000.000 m <sup>3</sup>
4	Vulcaniana (sub-pliniana) - pliniana	cataclísmica	10-25 km	> 0,1 km <sup>3</sup>
5	Pliniana	paroxística	> 25 km	> 1 km <sup>3</sup>
6	Pliniana/Ultra-Pliniana (krakatoana)	colosal	> 25 km	> 10 km <sup>3</sup>
7	Ultra-Pliniana (krakatoana)	super-colosal	> 25 km	> 100 km <sup>3</sup>
8	Ultra-Pliniana (krakatoana)	mega-colosal	> 25 km	> 1.000 km <sup>3</sup>

Tabla 36. Ejemplos de VEI (modificado de Newhall y Self, 1982).



### 6.3. Modelo de cálculo

El análisis de la peligrosidad volcánica resulta muy complejo debido a la coexistencia de numerosos fenómenos durante un evento eruptivo y a la escasez de datos disponibles (o el costo de su generación, Laín et al., 2007). A día de hoy, tan solo existen datos para la isla de Tenerife, por lo que este estudio se centra exclusivamente allí, sin que por ello signifique que no exista peligro en otras islas. Normalmente, como aproximación a la peligrosidad, los estudios pueden enfocarse como cartografías de susceptibilidad volcánica, basadas en probabilidad espacial de ocurrencia de un determinado proceso volcánico; o como escenarios de peligrosidad. Los mapas de susceptibilidad suelen facilitar información sobre las zonas más probables de que se produzca un nuevo centro de emisión. Los escenarios de peligrosidad se realizan para simular un peligro volcánico único (lavas, piroclastos de proyección balística, dispersión de cenizas, corrientes piroclásticas de densidad). Los escenarios de peligrosidad basados en modelos probabilísticos son los más habituales, principalmente por su menor complejidad y porque se pueden realizar en zonas con escasez de datos.

En el proyecto VOLCANTÉN (Laín et al., 2007), se generaron un conjunto de escenarios de flujos de lava siguiendo la metodología que se explica en los apartados siguientes.

### 6.3.1. Evento volcánico

A los efectos de diseño de los escenarios, resulta necesario definir un “evento” a simular, y existen tres formas de abordarlo. Se puede considerar cada centro de emisión como un evento único; se pueden considerar grupos de centros de emisión como un evento único cuando éstos pertenecen a una misma unidad si la unidad lo permite; o se puede realizar un análisis de probabilidad de nuevos centros eruptivos. Al objeto de evaluar la condición más apropiada, se segregó la BBDD de eventos en varios subconjuntos, donde cada uno representa los siguientes datos:

- La individualización de los centros eruptivos visibles relacionados con el vulcanismo central, donde se identifican dos grandes periodos: los centros asociados con el edificio Cañadas y los centros asociados con la construcción del complejo Teide-Pico Viejo.
- Los centros eruptivos de tipo efusivo, fisural y monogenético entre los que se diferencian los centros asociados con las Series Antiguas; los centros asociados con la formación y desarrollo del edificio de Las Cañadas; los centros Post-Cañadas y previos a Teide-Pico Viejo (subdivididos en dos series en función de sus posiciones estratigráficas) y los centros recientes, incluidos los de erupciones históricas.
- La totalidad de los centros eruptivos, con independencia de la época o el mecanismo eruptivo al que pertenezcan.

Para evaluar la existencia de un patrón en los centros eruptivos, se emplearon dos métodos, el número de vecinos reflexivos y la distancia media al vecino más próximo.

El método del número de vecinos reflexivos (*reflexive nearest neighbours*) es un método de medidas de agrupamiento de poblaciones que se utiliza para examinar las características que tiene cada uno de los puntos respecto al resto de los puntos de la población. Los vecinos reflexivos de primer orden son los pares de puntos que son los más próximos entre sí. Si el número de vecinos reflexivos es mayor al esperado en el caso de la aleatoriedad absoluta, entonces la población está distribuida siguiendo un patrón regular.

El método de la distancia media al vecino más próximo es complementario al anterior y pertenece a las medidas de dispersión, que examinan las características de los puntos respecto al área en que se distribuyen. Se miden las distancias

existentes entre los vecinos más próximos de varios órdenes y se comparan con las que se encontrarían si la aleatoriedad fuera absoluta. Si las distancias son menores los puntos están agrupados y si son superiores el patrón de distribución es regular.

Los resultados obtenidos muestran lo siguiente en relación al volcanismo central:

- Los centros asociados al volcanismo poligenético del edificio Cañadas muestran una distribución agrupada, no obstante, dado que no son una muestra representativa de la fase constructiva de la isla, no se tuvieron en cuenta en el análisis probabilístico.
- Los centros asociados con el volcanismo central Teide-Pico Viejo tienen un patrón agrupado y es un conjunto de datos viable para la realización de un análisis de distribución probabilística especial.

En cuanto al volcanismo fisural/monogenético, se pudo observar que:

- En las Series Antiguas la distribución es próxima a la aleatoria, pero como la muestra no es representativa, no se tuvieron en cuenta.
- Los centros eruptivos asociados al episodio Cañadas presentan un patrón de distribución agrupado sobre todo en vecinos de órdenes superiores a tres, lo que parece indicar que los centros próximos entre si pertenecen a un mismo evento.
- Los centros Post-Cañadas presentan un claro comportamiento agrupado, por lo que los centros próximos también pertenecen a un mismo evento.
- Los centros asociados con la última fase constructiva de Tenerife presentan un comportamiento similar al aleatorio en las medidas de agregación, aunque en las de dispersión presentan un claro agrupamiento. Esto se explica porque aunque existen zonas preferentes su ubicación dentro de estas zonas no sigue un patrón predominante.

Para garantizar que las poblaciones analizadas fueran las adecuadas se realizaron dos ensayos adicionales, uno considerando de forma conjunta los centros asociados al volcanismo fisural y por otro, los episodios posteriores a las series antiguas con independencia de su origen. Los dos grupos se comportan de forma similar al conjunto de centros de los episodios Cañadas y Post-Cañadas por lo que los patrones tienen un significado específico. Todo ello parece indicar que el patrón de distribución de las erupciones es de tipo agrupado, a excepción de las

Series Antiguas, y además los centros eruptivos se distribuyen ocupando áreas preferentes.

Por otra parte, los resultados de los análisis de aleatoriedad espacial completa (CSR, *Complete Spatial Randomness*) indican que en distancias inferiores los patrones de agrupación son casi aleatorios, mientras que en distancias superiores muestran una distribución claramente agrupada. Esto puede deberse a varios factores:

- Para cada unidad los centros siguen una distribución relativamente aleatoria a favor de las fisuras que se abren durante el proceso eruptivo, mientras que la distribución de los grupos en distintas unidades sigue un patrón claramente agrupado. Esto explicaría el comportamiento de los centros emisores recientes.
- En el análisis de los centros se considera a éstos como puntos adimensionales por lo que no se valora el hecho de que muchos casos se generan a favor de fracturas que pueden llegar a varios kilómetros de longitud. Si se tiene en cuenta que las distancias calculadas entre centros para los órdenes inferiores se aproximan a las dimensiones totales que pueden tener los conos, se puede inferir que la dimensión del fenómeno supera a la que se asume con el análisis adimensional.

Para la elaboración del modelo de fuente se consideró como válida la hipótesis de que los centros son asimilables de forma independiente como eventos, incluyendo en el análisis la totalidad de los conjuntos de datos a excepción de las Series Antiguas y el volcanismo poligenético asociado al Edificio Cañadas. Con estos datos de partida se elaboró un modelo de recurrencia del proceso eruptivo (el promedio del tiempo que transcurre entre un evento y el siguiente), asumiendo que la distribución de probabilidad se parece, por comparación con otras regiones volcánicas, a una distribución de Poisson, o a una distribución binomial negativa. Dicha probabilidad de recurrencia hay que asociarla a una fuente eruptiva, por lo que es necesario construir un modelo fuente, para representar la probabilidad de nuevos focos eruptivos. Conocida la probabilidad de que ocurra un proceso eruptivo y la probabilidad espacial de que ocurra en un determinado lugar, queda identificar el modelo de peligros, es decir, los procesos o tipologías eruptivas que tendrán lugar (flujos de lava, proyecciones balísticas, explosiones, emisiones de gas, etc.). Finalmente, se elabora el modelo de eventos o simulación numérica de uno o varios procesos, empleando para ello ecuaciones

constitutivas físicamente basadas. Es decir, que el resultado final representa el comportamiento en particular de un conjunto de hipótesis establecidas previamente, como la longitud de las fracturas y su orientación, la potencia media de la colada o el volumen emitido y su tasa de emisión, duración del proceso, alcance de las coladas o velocidad de las mismas.

### 6.3.2. Probabilidad espacial de nuevos eventos

La cartografía de susceptibilidad volcánica, denominada “modelo fuente” en el proyecto VOLCANTEN, está basada en la localización de los 764 centros de emisión identificados en la isla. El estudio de la probabilidad espacial de apertura de nuevos centros de emisión se ha realizado en base a dos modelos, el proceso de Cox y los estimadores de Gauss.

#### Proceso de Cox

Según este modelo la ubicación de los centros de emisión depende del campo de esfuerzos en profundidad y de la estructura de la isla. Este modelo asume que la probabilidad de que un punto se convierta en el futuro en centro de emisión está determinada exclusivamente por los centros pasados que se encuentren situados a una distancia específica; así cuanto mayor sea la proximidad a los centros ya existentes mayor será la probabilidad de que se convierta en centro emisor. Por lo que la forma más simple de establecer la intensidad de erupción en un punto es realizando la suma ponderada con la distancia del número de erupciones en su entorno local. Por este motivo, se utilizó este método para la estimación de la probabilidad espacial eligiendo la distancia media entre todos los centros seleccionados como distancia de búsqueda (Tabla 37).

Tabla 37. Distancias medias entre centros de emisión por series.

Serie	Distancia media (m)
Serie Cañadas monogenético (D2)	4.500
Serie post-Cañadas I (D3)	2.000
Serie post-Cañadas II (D4)	2.200
Serie recientes e históricas (D5)	2.000
Teide – Pico Viejo (C5)	1.500
Total de volcanismo dorsal (D2-D5)	2.000
Total volcanismo dorsal post-Cañadas (D3-D5)	2.000
Total de volcanismo post-Cañadas (D2-D5 + C5)	1.800

Con ello se genera una superficie de probabilidad en las que áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de erupciones son las que presentan una mayor concentración media de centros. No obstante, se debe incorporar un ponderador que penalice los centros de emisión según su antigüedad, ya que cuanto más antiguo sea un centro, más probable es que se encuentre recubierto. El ponderador se calcula como el porcentaje de recubrimiento de cada unidad frente a la superficie total de unidades que contienen centros visibles, incluyendo además información de la publicación de [Ancochea et al. \(1996\)](#) en la que hacen una estimación de tasas y volúmenes de emisión. Así, el peso de cada serie se estima con la siguiente función (usando la nomenclatura de la Tabla 37):

$$M_{COX} = D3D4 + \frac{D5}{3} + \frac{C5}{2}$$

### Estimadores de densidad Gaussianos

Los estimadores de densidad en ventanas se utilizan para calcular una superficie de probabilidad directamente a partir de la localización y edad de eventos volcánicos discretos ocurridos en el pasado. Los modelos Gaussianos definen una ventana de trabajo  $K_i$  del tipo:

$$K_i = 2\pi e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_i}{h}\right)^2\right]}$$

Donde  $d_i$  es la distancia desde el punto analizado hasta centro de emisión  $i$ ; y  $h$  es el parámetro de suavizado.

La tasa de recurrencia espacial  $\lambda(X)$  de los eventos volcánicos en 1 km<sup>2</sup> alrededor del punto analizado ( $X$ ), dada la ocurrencia de un evento en el sistema, viene dado por:

$$\lambda(X) = \frac{1}{(nh)^2} \sum_{i=1}^n K_i$$

El parámetro de suavizado controla la forma en la que se distribuye la probabilidad en torno a eventos existentes, los cuales se tratan como procesos puntuales. Un factor de suavizado pequeño tiende a incrementar la probabilidad cerca de los volcanes existentes, mientras que un factor grande produce un efecto más distribuido. Aunque los métodos de cálculo del factor de suavizado son muy variados, en general se asume que el estudio de la distribución que analiza la distancia a los vecinos más próximos suele ser útil para obtenerlo (Tabla 38).

Tabla 38. Series y parámetros de intervalo y suavizado utilizados.

Serie	Parámetros		Correspondencia
	Intervalos	Suavizado	
Serie 1	20	5,0	Serie C5
Serie 2	20	10,0	Serie D2
Serie 3	20	5,5	Serie D3
Serie 4	20	6,0	Serie D4
Serie 5	25	5,5	Serie D5
Serie 6	25	6,0	Serie D3D4
Serie 7	20	5,5	Serie D3D4D5
Serie 8	25	4,0	Serie D2D3D4D5
Serie 9	25	4,0	Serie C5D2D3D4D5

Este modelo produce algunas anomalías, especialmente en las Series Antiguas, por lo que se descartó su uso como modelo fuente.

### 6.3.3. Modelo de recurrencia

La función de ajuste más frecuente para el estudio de la recurrencia del volcanismo es la distribución de Poisson, pero además es necesario tener en cuenta la distribución de los periodos de reposo y su variación, lo que permite determinar el grado de error en el número de erupciones esperables, así como el análisis de la dependencia temporal de las secuencias eruptivas identificadas en la isla, y conocer así hasta qué punto es posible que la tasa de erupción haya cambiado con el tiempo.

La distribución de Poisson establece que para un mismo nivel de magnitud eruptiva, el patrón de ocurrencia de los fenómenos eruptivos sigue una distribución de la forma:

$$P(X) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$$

Donde  $\lambda$  es la tasa media de ocurrencia de erupciones por unidad de tiempo, y  $P(X)$  es la probabilidad de que  $x$  erupciones se puedan producir en un intervalo de tiempo dado.

Se ha observado que el ajuste a esta distribución es bueno si se separan las poblaciones en dos, considerando las series de edades inferiores a 3.000 años y las comprendidas entre 3.000 y 35.000 años. Las más antiguas de 35.000 años no

se ajustan a esta distribución probablemente por la escasez de datos. Algo similar ocurre en el estudio de los periodos de reposo, siendo mejor el ajuste para las series más recientes, de las que se dispone de mejor información.

#### **6.3.4. El generador de eventos**

El generador de eventos es la herramienta que permite obtener estadísticamente dónde se podrían producir futuros eventos volcánicos y cuáles van a ser las características de los flujos de lava emitidos. Este generador se basa en el periodo de recurrencia, la tipología de las coladas de lava y la probabilidad espacial. Proporciona así el número de escenarios a modelar para simular la historia volcánica de Tenerife y los datos necesarios para cada uno de los modelos físicos a simular.

Para estudiar las dependencias temporales de las secuencias eruptivas se han clasificado los eventos en función del volcanismo central o el fisural/monogenético, con el fin de determinar las pautas de comportamiento de uno y otro. Se ha valorado la media de episodios y de centros eruptivos presentes para cada uno de los episodios volcánicos principales que se identifican en cada serie de datos. Además se ha determinado para cada episodio la relación existente entre el número de centros eruptivos y los episodios identificados. Para ambos tipos de volcanismo hay una buena correlación entre la media de centros por episodio y la media de eventos ocurridos, si bien la tasa eruptiva del volcanismo central en los últimos 30ka es superior a la del volcanismo de tipo fisural (un 50% superior), por lo que cabe esperar que el comportamiento de la última fase constructiva analizada sea el que previsiblemente se va a producir. Es decir, que en el generador de eventos se debe cumplir que el número de eventos dorsales sea igual al número total de eventos dividido por 2,5, mientras que el número de eventos centrales debe ser 1,5 veces el número de eventos dorsales.

#### **6.4. Simulación de coladas de lava**

Existen tres tipos de modelos para la simulación de coladas de lava: los basados en ecuaciones de movimiento de fluidos, los probabilísticos y los empíricos. Mientras que los métodos basados en la resolución de ecuaciones de movimiento de fluidos son útiles para modelizar flujos a pequeña escala, los probabilísticos reflejan mejor los efectos topográficos. Por su parte, los modelos basados en correlaciones empíricas sólo sirven para el volcán en que se desarrollaron. Todos

los modelos necesitan conocer la ubicación del foco eruptivo y la topografía, y a medida que los modelos son más sofisticados es necesario incorporar más parámetros, como la altura crítica de la colada o la extensión máxima, entre otros.

Las diferencias con los modelos de fluidos en los estudios de inundaciones, son básicamente que en este caso se trata de un fluido no newtoniano y que las condiciones de contorno de la ecuación de la energía son no lineales por pérdidas de calor. Todo ello complica notablemente el proceso de cálculo. [Felpeto \(2002\)](#) identifica como modelos más adecuados a los propuestos por [Ishihara et al. \(1990\)](#) y por [Miyamoto y Sasaki \(1997\)](#). Estos modelos, asumen que la lava es un fluido Bingham, con viscosidad y cizalla umbral dependientes de la temperatura y consideran el área de cálculo dividida en celdas cuadradas en las que la altura de lava en cada iteración temporal se calcula como la suma de la lava emitida y los flujos de masas a través de los lados de la misma. El flujo solo es posible si la altura de la lava en la celda origen es mayor que la altura crítica correspondiente a la pendiente considerada. Además, se asume una temperatura constante en cada perfil vertical, considerándose exclusivamente la pérdida de calor por radiación.

Que el flujo sólo sea posible si la altura de lava es mayor que la altura crítica correspondiente a la pendiente, da lugar a algunas inestabilidades en zonas planas.

Las propiedades reológicas de la lava se suelen obtener a partir de estudios petrológicos (aunque es posible medirlas en volcanes en erupción) conforme a las siguientes ecuaciones:

$$\rho = 2,2 + 0,027 (Fe_2O_3 + FeO + TiO_2)$$

$$T = 2.000 \left( \frac{MgO}{SiO_2} + MgO \right) + 969$$

Donde  $\rho$  es la densidad y  $T$  la temperatura. En estos cálculos, se suelen asumir valores del calor específico y la emisividad de 840 J/(Kg K) y 0,91 respectivamente. Las variables viscosidad, presión y cizalla umbral son aportados por el propio modelo.

En el proyecto VOLCANTEN ([Laín et al., 2007](#)) se modelizaron un total de 63 flujos de lava siguiendo este método y utilizando el modelo de [Miyamoto y Sasaki \(1997\)](#). El punto de partida de cada uno de los flujos de lava se basó en el

estudio estadístico de la localización más probable de centros de emisión futuros calculada previamente.

## **6.5. Selección de escenarios**

Con el fin de estimar los posibles costos asociados a la emisión de coladas durante una hipotética erupción en Tenerife, se han seleccionado un conjunto de escenarios representativos del proyecto VOLCANTÉN (Laín et al., 2007), atendiendo a los siguientes criterios:

- Alta probabilidad de localización del centro de emisión
- Tamaño del área afectada.
- Infraestructuras afectadas.

Todos los escenarios seleccionados tienen en común que el lugar desde el que se emite la lava está localizado en zonas de susceptibilidad media o alta. En relación al tamaño del área afectada y número de infraestructuras afectadas, se han buscado escenarios que reflejen el rango de coste mínimo a máximo. Con estos criterios se han seleccionado 14 escenarios que permiten estimar el rango de pérdidas que podrían asociarse a la emisión de flujos de lavas en Tenerife durante una erupción futura, todos ellos con igual probabilidad de excedencia. Los mapas de estos escenarios se pueden observar entre la Figura 101 y la Figura 114.

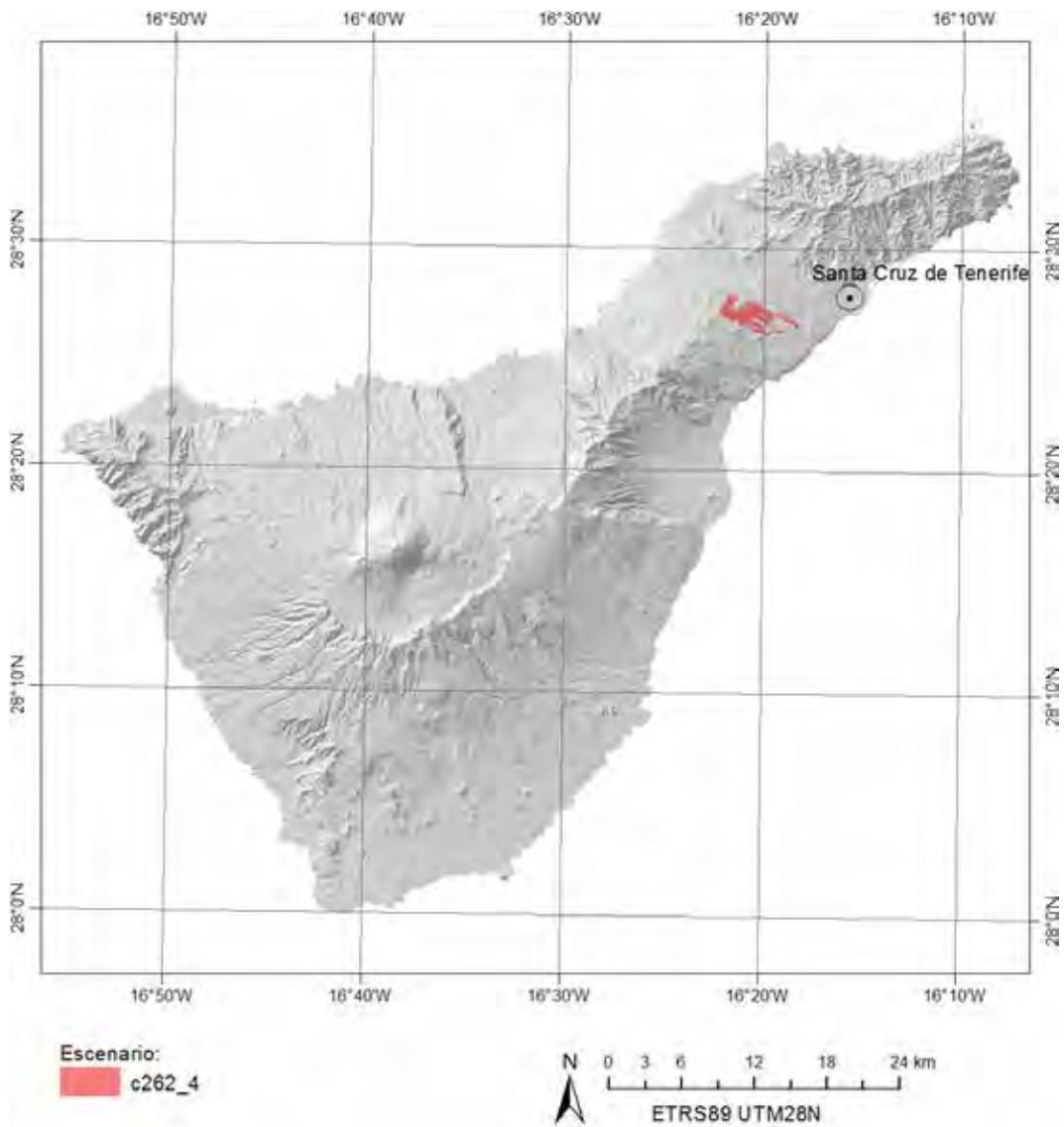


Figura 101. Extensión de lava del escenario 262\_4.

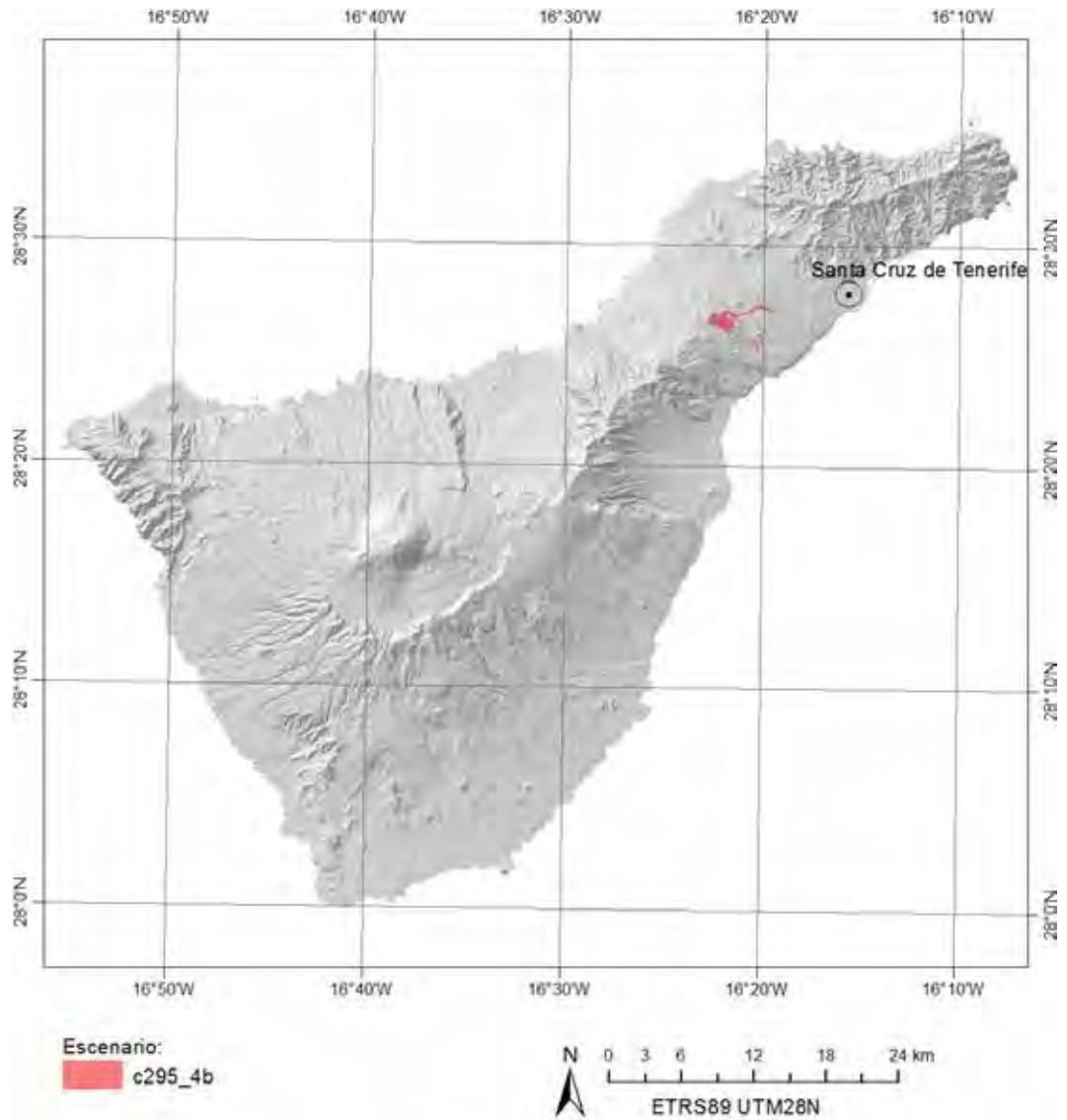


Figura 102. Extensión de lava del escenario 295\_4b.

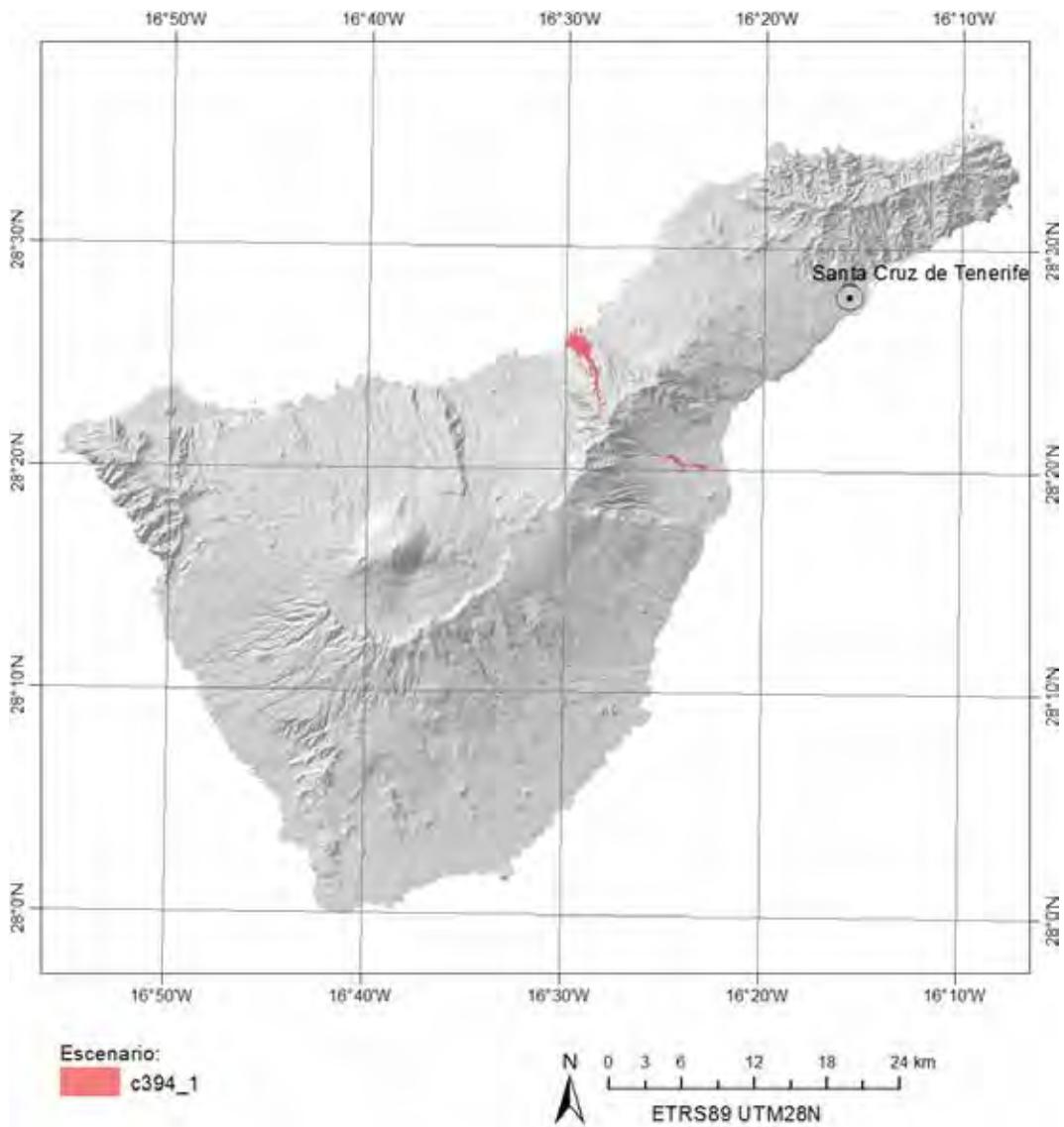


Figura 103. Extensión de lava del escenario 394\_1.

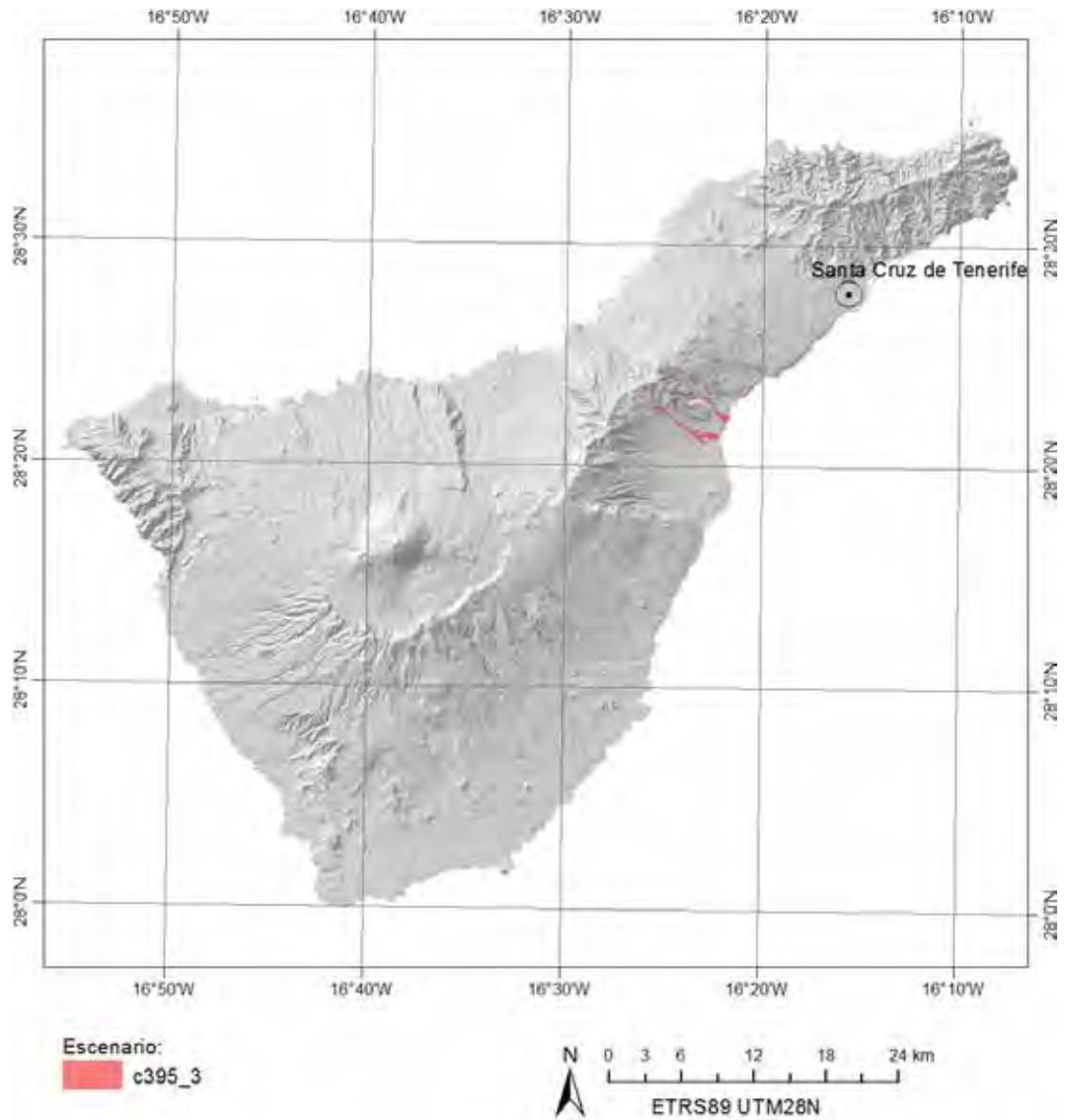


Figura 104. Extensión de lava del escenario 395\_3.

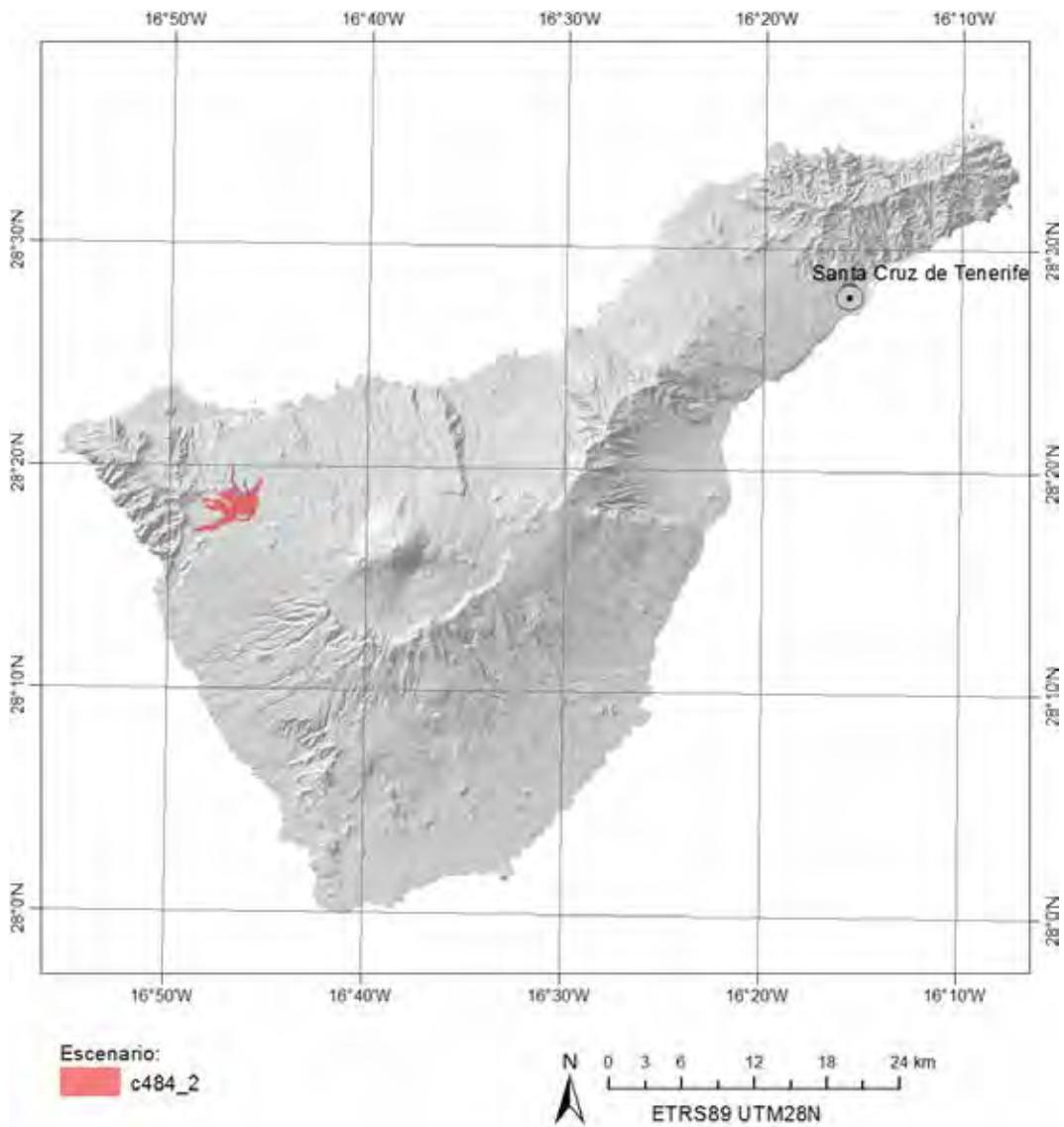


Figura 105. Extensión de lava del escenario 484\_2.

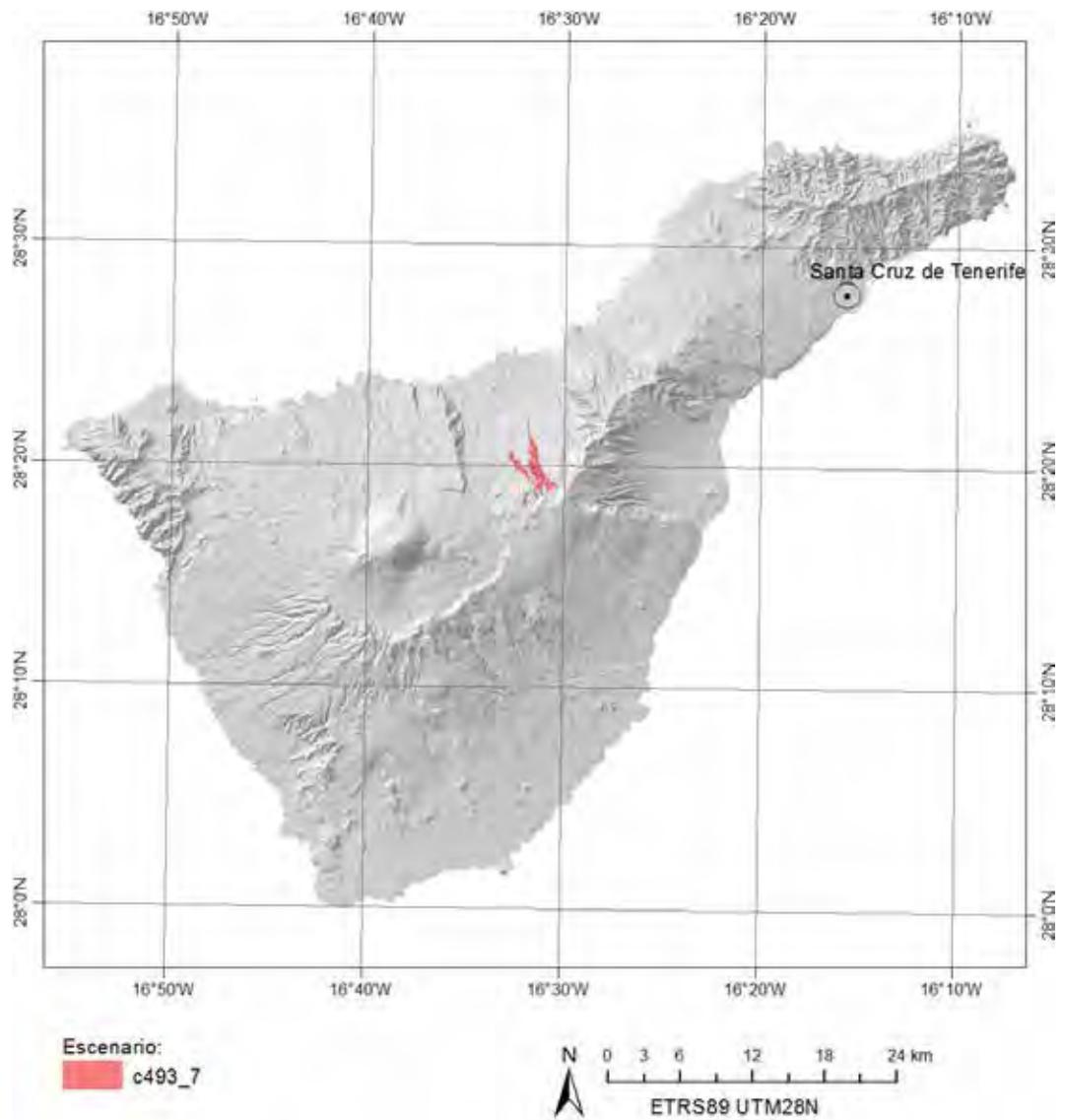


Figura 106. Extensión de lava del escenario 493\_7.

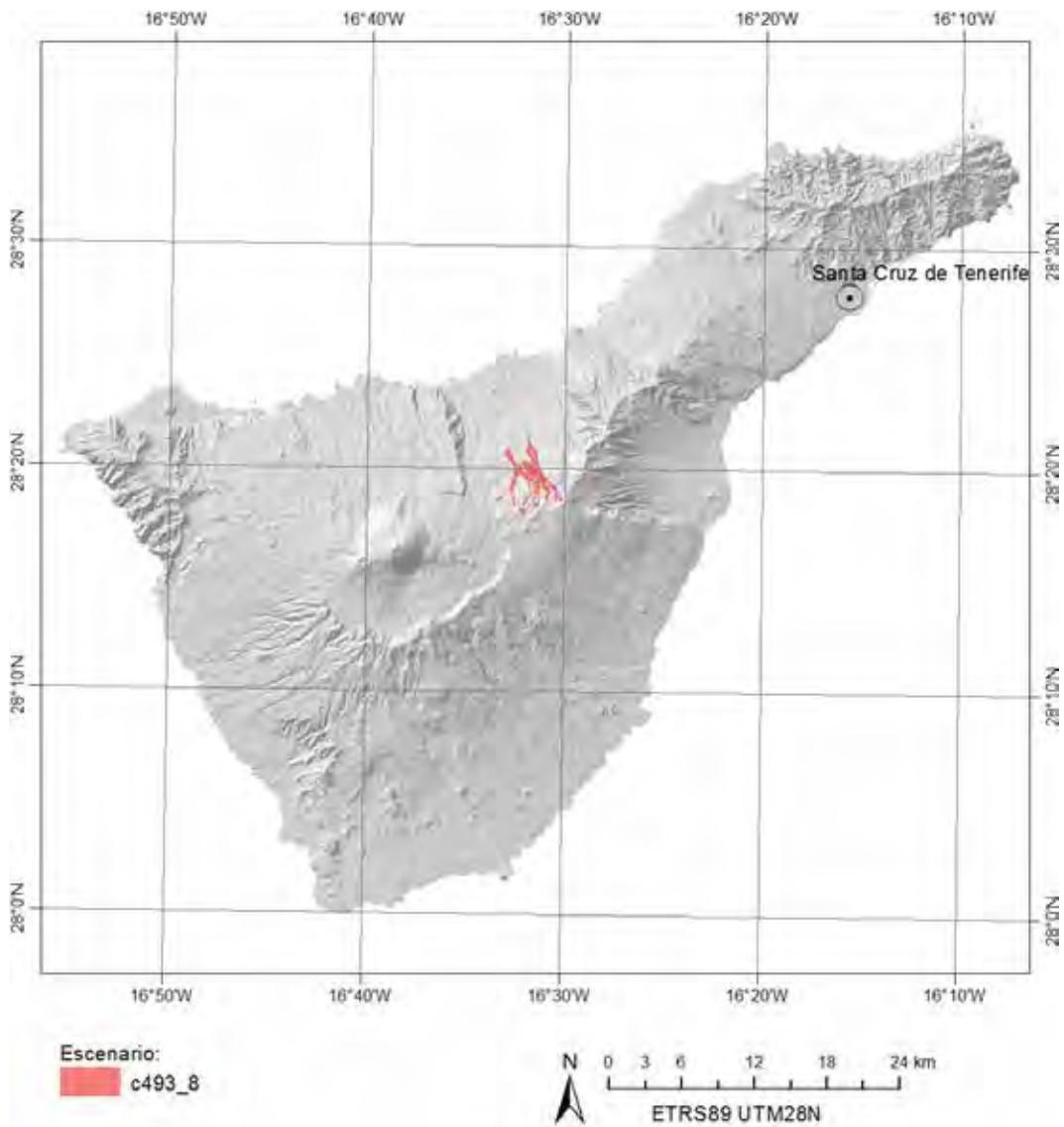


Figura 107. Extensión de lava del escenario 493\_8.

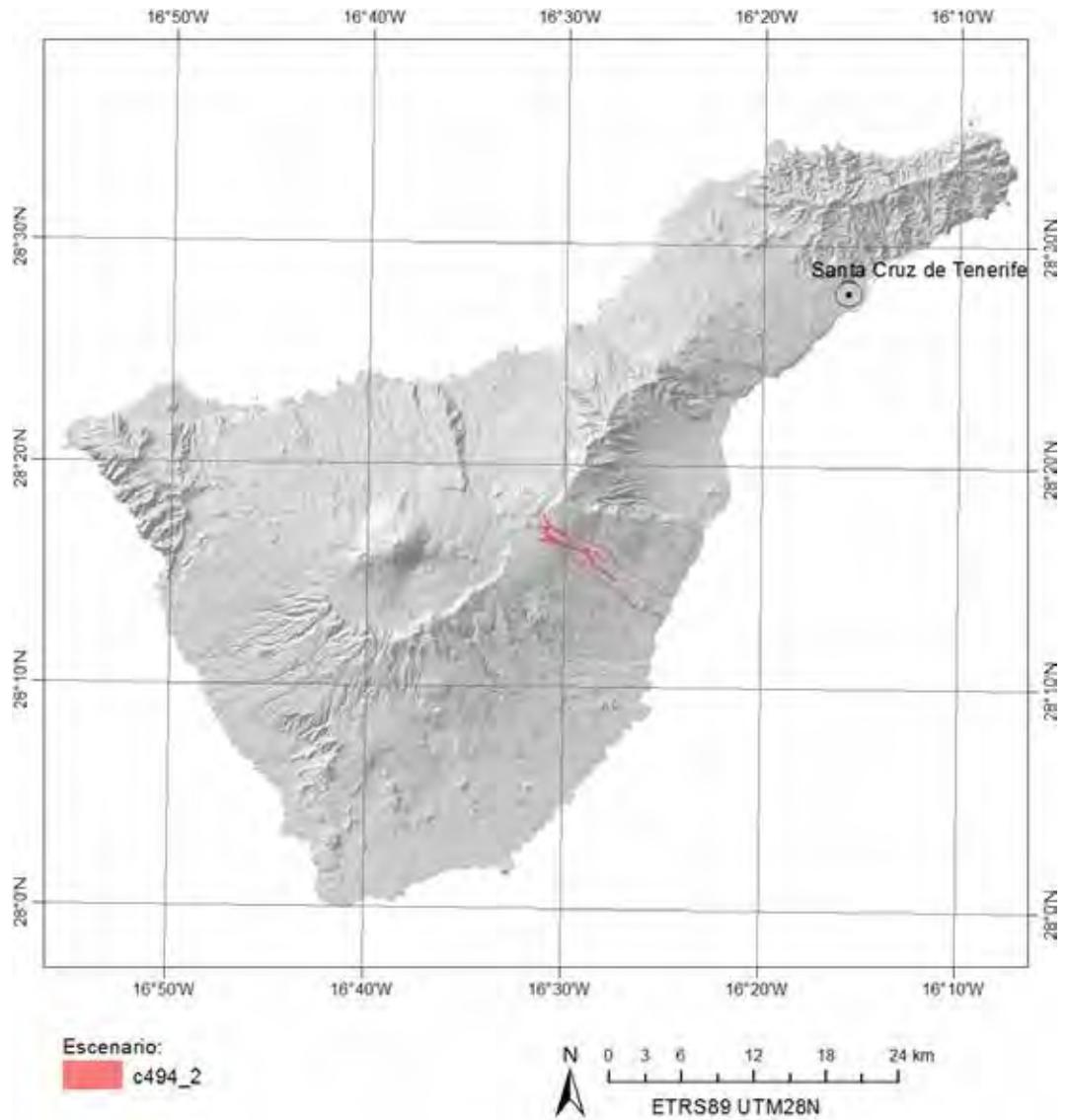


Figura 108. Extensión de lava del escenario 494\_2.

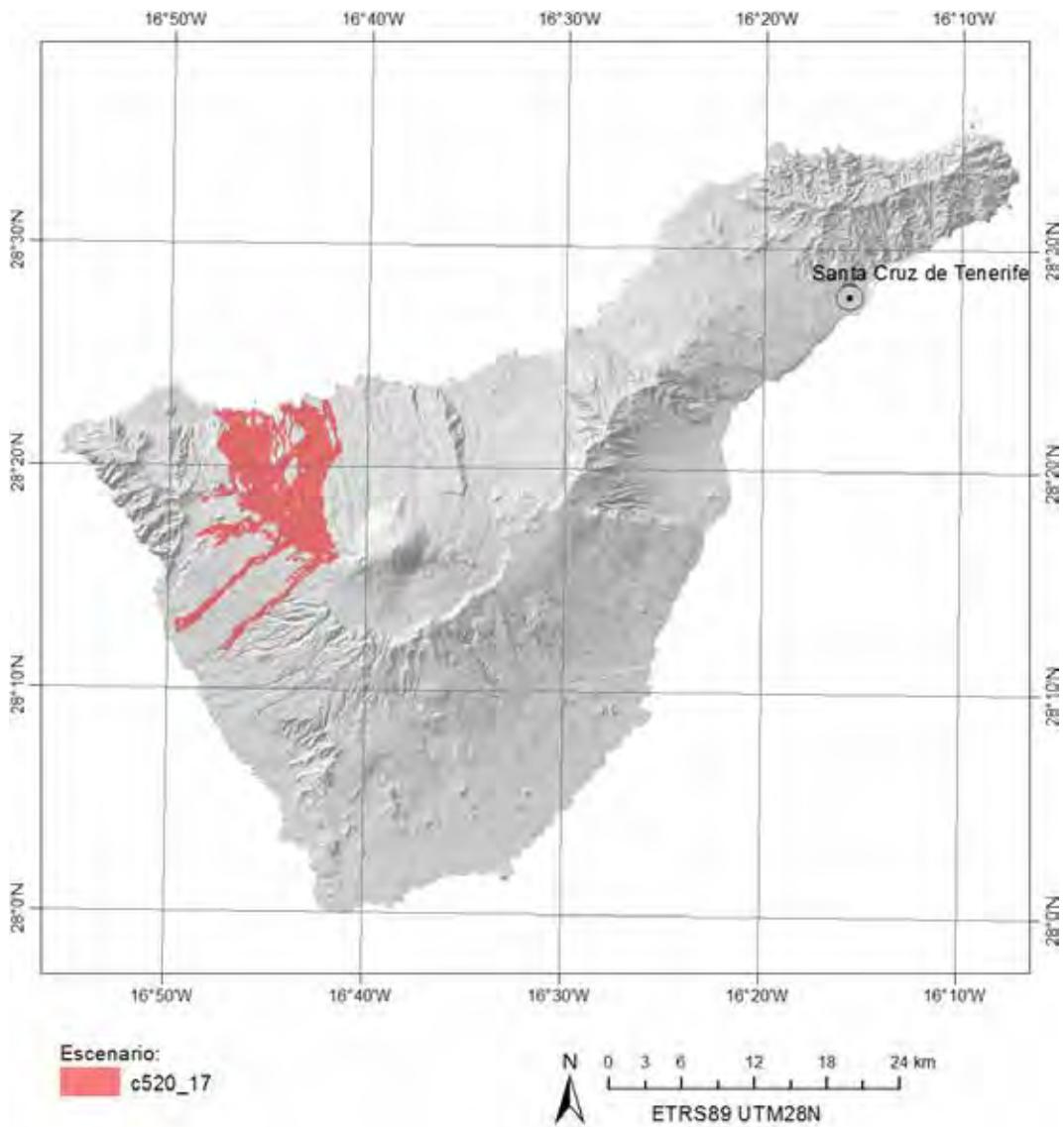


Figura 109. Extensión de lava del escenario 520\_17.

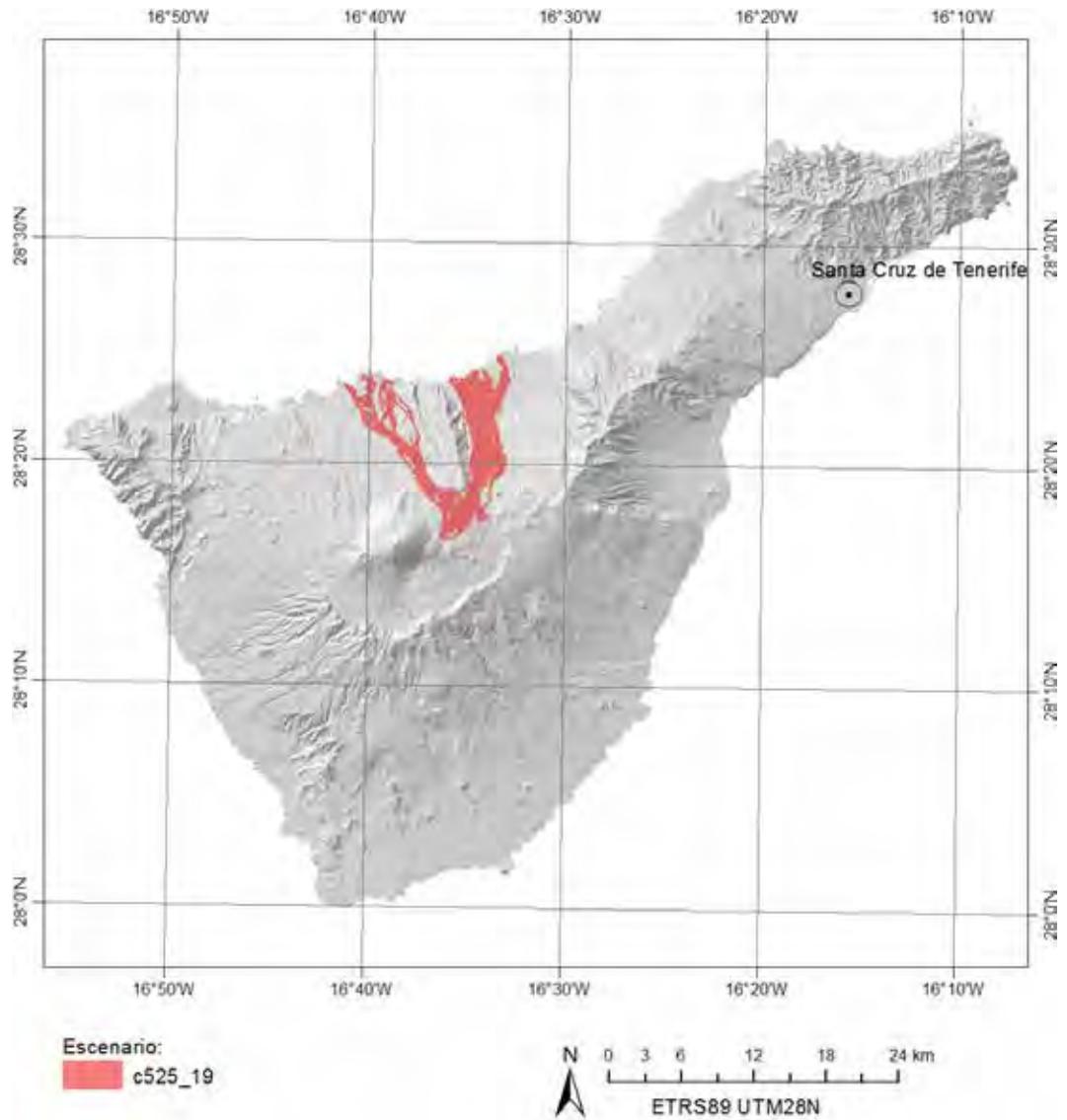


Figura 110. Extensión de lava del escenario 525\_19.

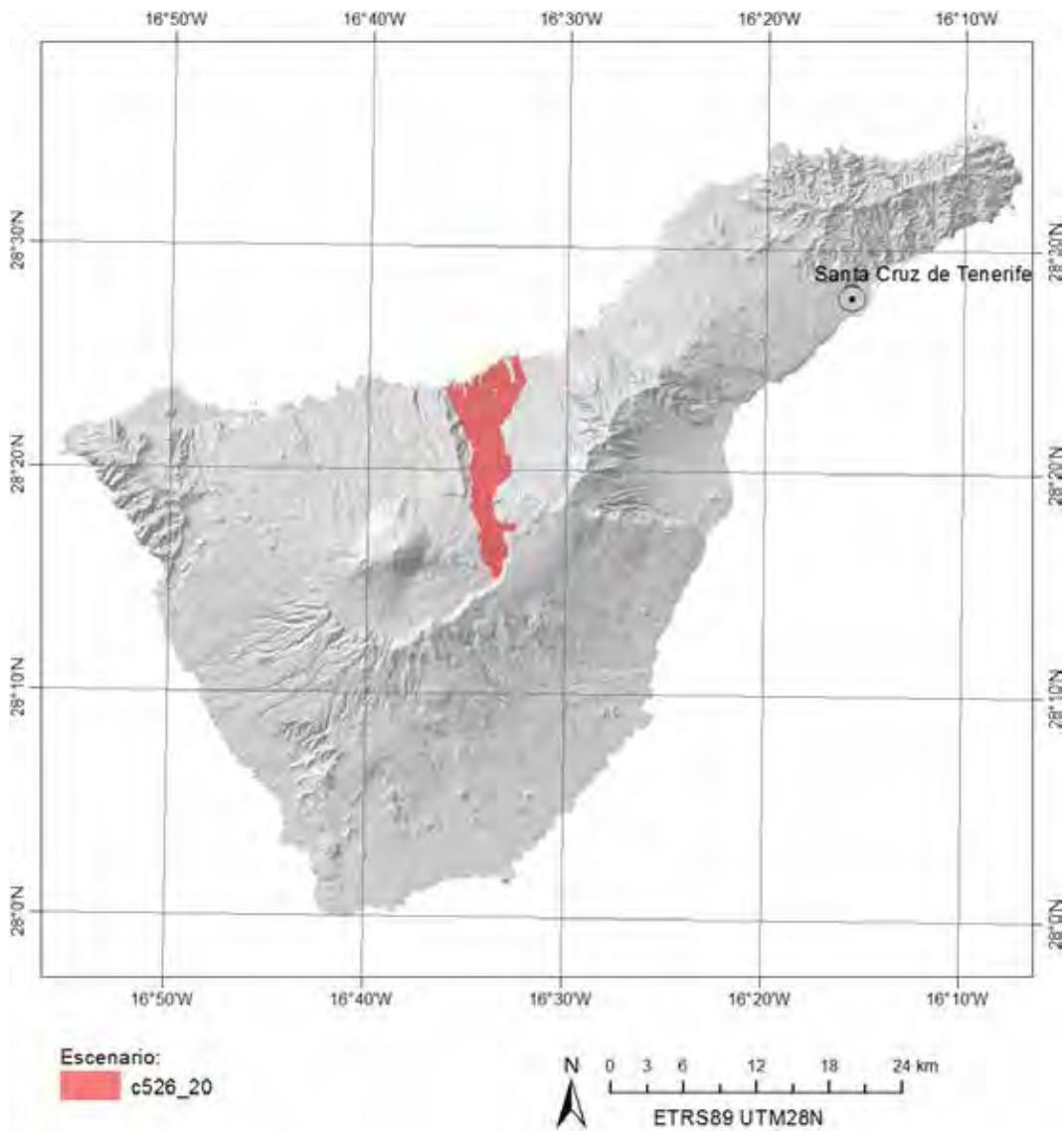


Figura 111. Extensión de lava del escenario 526\_20.

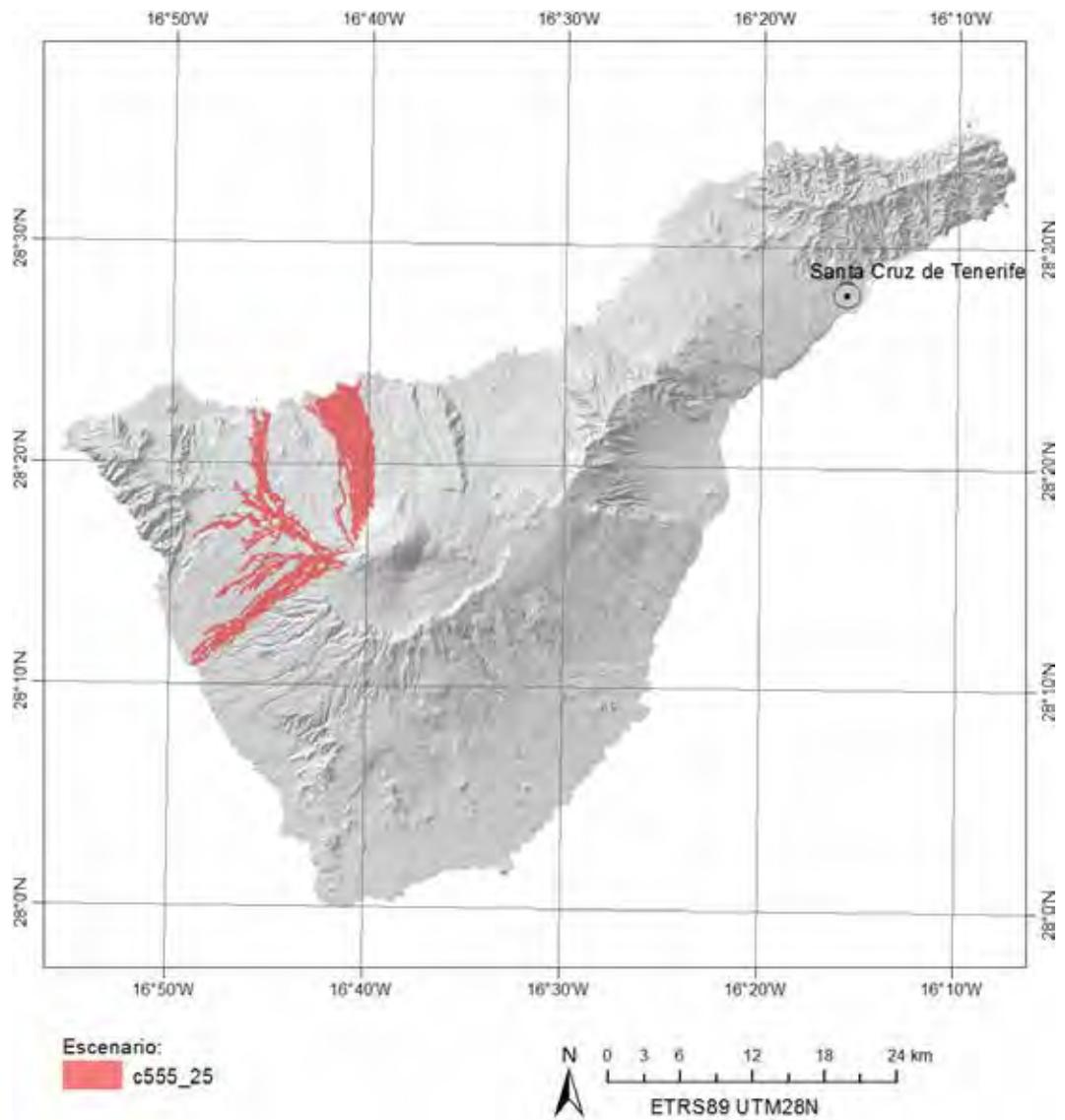


Figura 112. Extensión de lava del escenario 555\_25.

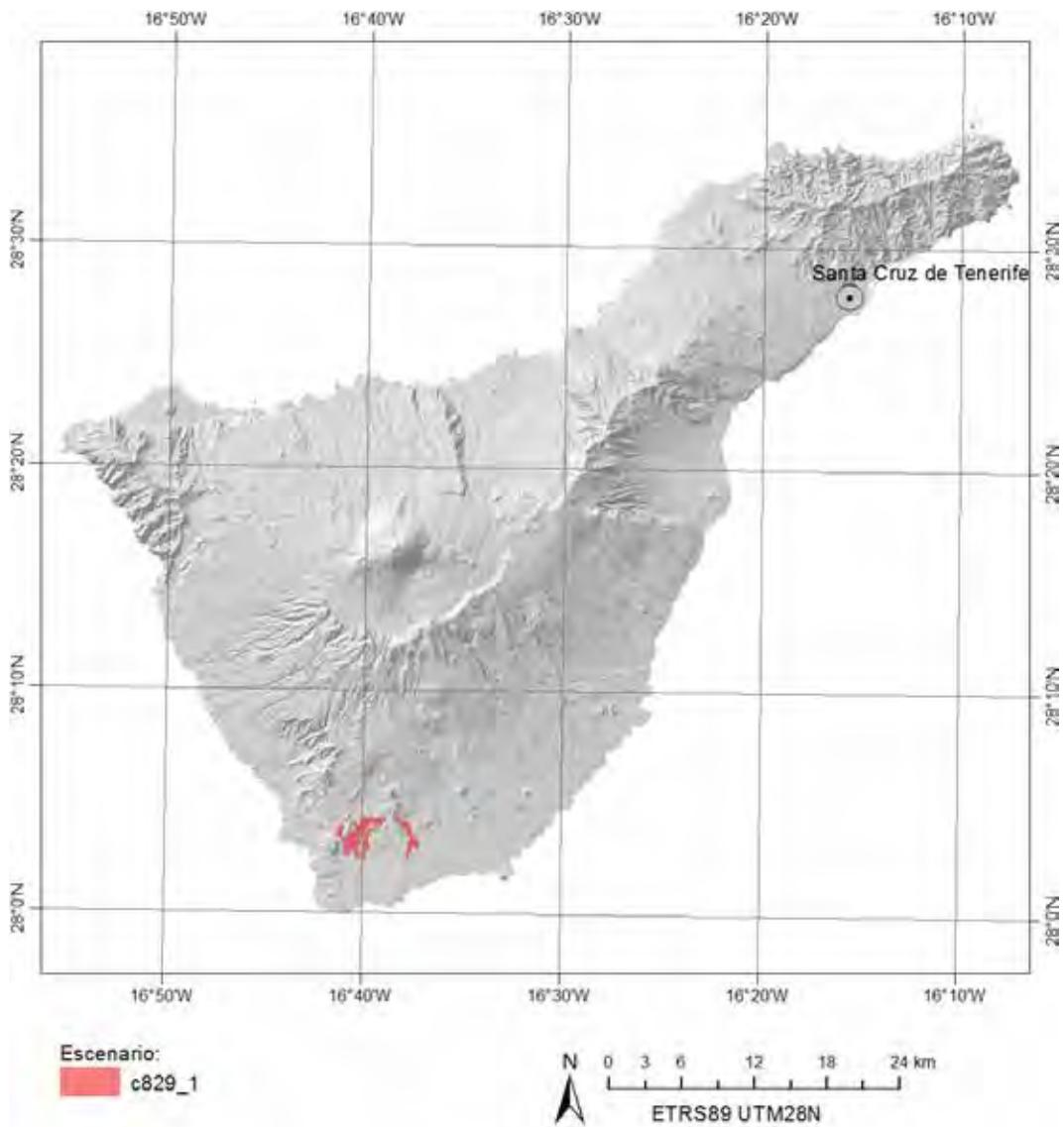


Figura 113. Extensión de lava del escenario 829\_1.

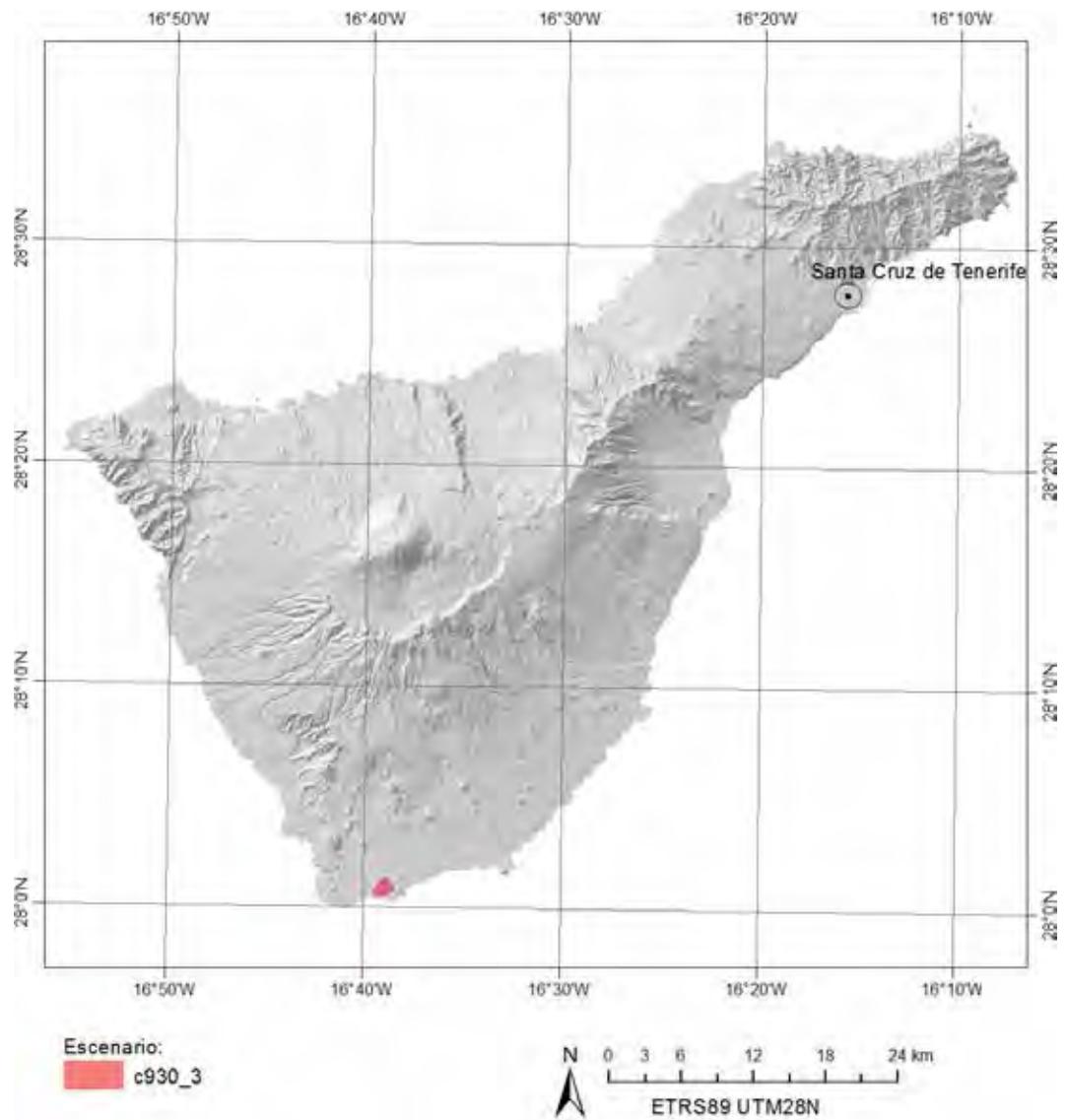


Figura 114. Extensión de lava del escenario930\_3.



## 7. Estudio de bienes expuestos

### 7.1. Introducción

El estudio de bienes expuestos se suele considerar como la intersección entre los elementos de interés en el territorio y las capas de peligrosidad, pero de proceder así faltaría un elemento esencial en la ecuación del riesgo, que es el valor de los objetos considerados. En este capítulo se muestra cómo se ha procedido para la obtención del índice de valor expuesto como valor catastral, una referencia utilizada no sólo como indicador de exposición económica, sino también como elemento para distribuir en el territorio los elementos móviles que intervienen en el análisis, como vehículos y personas. La fuente de información principal ha sido el Catastro Inmobiliario.

El Catastro Inmobiliario es un registro administrativo que depende del Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas. En este registro se describen todos los bienes inmuebles, ya sean rústicos, urbanos o de características especiales y está regulado por el Texto Refundido de la Ley del Catastro Inmobiliario (RDL 1/2004, de 5 de marzo). El propósito original del catastro es de carácter tributario, y por tanto persigue proporcionar toda la información necesaria para la gestión, recaudación y control de las diversas figuras impositivas de las Administraciones Públicas (estatal, autonómica y local). Esta información incluye el censo de bienes inmuebles, su titularidad, y el valor catastral. El valor catastral es un valor administrativo que corresponde a cada inmueble y que permite determinar la capacidad económica de su titular, y por tanto es un índice de referencia para otros muchos usos además del tributario, entre los que se encuentran los estudios de riesgos naturales. Otros usos del catastro son los siguientes:

- Jurídicos. Entre los usos jurídicos destaca la protección del mercado inmobiliario, impidiendo la compra o venta de fincas inexistentes o de características distintas a las reales; y en coordinación con el Registro de la Propiedad, aporta certeza y transparencia al mercado inmobiliario.
- Desarrollo de políticas públicas.
  - o Al ser una fuente de datos confiable y profusa, se pueden utilizar para determinar la capacidad económica de un titular en procesos de concesión de ayudas públicas, como el acceso a vivienda protegida,

- becas de estudios, ayudas de comedores sociales, acceso a residencias para la tercera edad, etc.
- También se emplea en el ámbito de la justicia gratuita, para comprobar la inexistencia de propiedades para poder acceder a ésta.
  - Para identificar geográficamente las parcelas declaradas por el sector agrario y ganadero (en colaboración con el Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación con el desarrollo del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas, SIGPAC).
  - Para la planificación y gestión de infraestructuras. Agiliza los procesos de expropiación de bienes inmuebles por causa de utilidad pública o de interés social, dado que permite conocer de antemano las propiedades de los bienes afectados. También permite un mejor diseño y gestión de redes de abastecimiento eléctrico, de telefonía, etc.
  - Usos medioambientales. Muchos de los datos del catastro son de utilidad en el desarrollo de políticas forestales, e igualmente tienen un tratamiento favorable en el impuesto de bienes inmuebles los montes poblados con especies de crecimiento lento, o cuyo principal aprovechamiento sea madera o corcho. La información gráfica y alfanumérica del catastro también se utiliza en la gestión de parques y otras áreas naturales. Además, el Catastro contribuye con el Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España.
- En el sector privado, por ciudadanos y empresas para usos comerciales, estudios de mercado, proyectos de arquitectura, diseño y gestión de redes de suministro y telecomunicación, gestión de patrimonio, navegación, etc.
  - En investigación y desarrollo. Este proyecto es otro ejemplo de los muchos usos a los que se puede destinar la información catastral, desarrollando metodologías que se apoyan y sustentan en parte con las BBDD gráficas y alfanuméricas del Catastro.

El IGME es usuario de la Sede Electrónica del Catastro con privilegios para la consulta masiva de datos. Para el presente proyecto se ha trabajado con una parte de la BBDD del Catastro para el conjunto del archipiélago canario. De los distintos productos que ofrece el Catastro, se ha trabajado en concreto con la información CAT alfanumérica y la información SHP gráfica.

## 7.2. La BBDD alfanumérica y su preprocesado

La base de datos alfanumérica utilizada contiene casi ocho millones de registros (7.904.244), distribuidos en 176 archivos en formato CAT, uno por cada municipio del archipiélago (88 municipios) en rústico y urbano. De todos estos registros, unos 2,5 millones corresponden a construcciones, “*vuelo*” (Figura 115).

Estos archivos están en formato ASCII con tamaño fijo de registros en una longitud de 1.000 caracteres. La estructura de los registros en cada fichero es la siguiente, según la actualización de 10 de marzo de 2011 (disponible en la web de la Sede Electrónica del Catastro; [DGC, 2011](#)):

- Tipo 01: Registro de cabecera. Existirá uno para todo el fichero independientemente de que el fichero recoja la información correspondiente a un solo municipio o a varios.
- Tipo 11: Registro de Finca. Existirá uno por cada parcela catastral implicada.
- Tipo 13: Registro de Unidad Constructiva. Existirá uno por cada unidad constructiva en cada parcela catastral.
- Tipo 14: Registro de Construcción. Existirá uno por cada construcción de cada unidad constructiva en cada parcela catastral.
- Tipo 15: Registro de Inmueble. Existirá uno por cada bien inmueble en cada parcela catastral.
- Tipo 16: Registro de reparto de elementos comunes. Existirá al menos uno por cada elemento común que se reparte, siempre que sea necesario especificar repartos especiales.
- Tipo 17: Registro de cultivos. Existirá uno por cada subparcela de cultivo existente dentro de la parcela catastral.
- Tipo 90: Registro de cola. Existirá uno para todo el fichero.

Cada tipo de registro tiene a su vez su propia forma de organización de columnas. El tipo de registro utilizado en este proyecto es el 15, de bien inmueble, que se estructura según se puede observar en la Tabla 39. Se han trabajado en total con 2.342.606 registros de tipo 15 (con 46 atributos) lo que suman casi 110 millones de datos entre los urbanos y los rústicos.

Tabla 39. Estructura de los registros tipo 15 en un archivo CAT. En Formato, N indica formato numérico y X formato de texto.

Grupo de datos	Posición inicial	Longitud	Formato	Descripción
Tipo de Registro	1	2	N	Tipo de registro (15)
	3	21	X	Campo intencionadamente en blanco
Identificación del bien inmueble	24	2	N	Código de Delegación del MEH
	26	3	N	Código del Municipio (según DGC)
	29	2	X	Clase del Bien inmueble (UR, RU, BI)
	31	14	X	Parcela catastral.
	45	4	N	N. secuencial del b.i. (N. de Cargo) dentro de la parcela catastral
	49	1	X	Primer carácter de control
	50	1	X	Segundo carácter de control
Identificadores adicionales	51	8	N	Número fijo del Bien Inmueble (asignado por la Gerencia del Catastro)
	59	15	X	Campo para la identificación del Bien Inmueble asignado por el Ayuntamiento
	74	19	X	N. de finca registral, incluyendo reg. de la prop. (Registro de la propiedad 5 dígitos, sección 2 dígitos, n. finca 6 dígitos, subfinca 6 dígitos)
Domicilio Tributario / Localización del bien inmueble	93	2	N	Código de Provincia (INE)
	95	25	X	Nombre Provincia
	120	3	N	Código del Municipio (DGC)
	123	3	N	Código de Municipio (INE). Excluido el último dígito de control
	126	40	X	Nombre del Municipio
	166	30	X	Nombre de la entidad menor, en caso de existir
	196	5	N	Código de vía pública (DGC)
	201	5	X	Tipo de vía o sigla pública
	206	25	X	Nombre de la vía pública
	231	4	N	Primer número de policía
	235	1	X	Primera letra. (Carácter de duplicado)
	236	4	N	Segundo número de policía
	240	1	X	Segunda letra. (Carácter de duplicado)
	241	5	N	Kilómetro (expresado con tres enteros y dos decimales)
	246	4	X	Bloque
	250	2	X	Escalera
	252	3	X	Planta
	255	3	X	Puerta
	258	25	X	Texto de dirección no estructurada
	283	5	N	Código postal
	288	2	N	Distrito municipal, en caso de existir
	290	3	N	Código del municipio origen en caso de agregación (DGC)
	293	2	N	Código de la zona de concentración
	295	3	N	Código de polígono
	298	5	N	Código de parcela
	303	5	N	Código de Paraje (DGC)
	308	30	X	Nombre del paraje
Información Adicional	338	30	X	Campo intencionadamente en blanco
	368	4	X	Número de orden del inmueble en la escritura de división horizontal
	372	4	N	Año de antigüedad del bien inmueble
Datos económicos del bien inmueble	376	52	X	Campo intencionadamente en blanco
	428	1	X	Clave de grupo de los b.i. de caract. especiales, o de uso de los bienes urbanos
	429	13	X	Campo intencionadamente en blanco
	442	10	N	Superficie del elemento o elementos constructivos asociados al inmueble en el caso de fincas construidas (en metros cuadrados)
	452	10	N	Superficie asociada al inmueble, en el caso de solares, fincas construidas sin división horizontal o parcelas rústicas (en metros cuadrados)

Grupo de datos	Posición inicial	Longitud	Formato	Descripción
	462	9	N	Coefficiente de propiedad respecto a la finca, en caso de división horizontal, expresado con tres enteros y seis decimales

## 1. El valor catastral

El catastro realiza una valoración de los bienes inmuebles de acuerdo a lo especificado en el artículo 23 del RDL 1/2004, siendo los criterios generales los siguientes:

- a) La localización del inmueble, las circunstancias urbanísticas que afecten al suelo y su aptitud para la producción.
- b) El coste de ejecución material de las construcciones, los beneficios de la contrata, honorarios profesionales y tributos que gravan la construcción, el uso, la calidad y la antigüedad edificatoria, así como el carácter histórico-artístico u otras condiciones de las edificaciones.
- c) Los gastos de producción y beneficios de la actividad empresarial de promoción, o los factores que correspondan en los supuestos de inexistencia de la citada promoción.
- d) Las circunstancias y valores del mercado.
- e) Cualquier otro factor relevante que reglamentariamente se determine.

El apartado 3 del Art. 23 establece que *“reglamentariamente, se establecerán las normas técnicas comprensivas de los conceptos, reglas y restantes factores que, de acuerdo con los criterios anteriormente expuestos y en función de las características intrínsecas y extrínsecas que afecten a los bienes inmuebles, permitan determinar su valor catastral”*.

Las normativas principales son:

- R.D. 417/2006 por el que se desarrolla el texto refundido de la Ley del Catastro Inmobiliario.
- R.D. 1020/1993 por el que se aprueban las normas técnicas de valoración y el cuadro marco de valores.
- R.D. 1464/2007 por el que se aprueban las normas técnicas de valoración catastral de los Bienes Inmuebles de Características Especiales (BICES).
- Orden EHA/1213/2005 por el que se aprueba el módulo de valor M para la determinación de los valores de suelo y construcción de los bienes inmuebles de naturaleza urbana en las valoraciones catastrales.

El valor catastral viene dado por el valor del suelo y el de las construcciones, teniendo en cuenta en su cálculo las condiciones urbanístico-edificatorias, su carácter histórico artístico, su uso o destino, la calidad y antigüedad y cualquier otro factor relevante. Para el cálculo de este valor, se lleva a cabo un procedimiento de valoración colectiva, así como uno de valoración individualizada.

El procedimiento de valoración colectiva, puede ser de carácter general (afecta a la totalidad de los inmuebles de un municipio) o de carácter parcial (afectando a conjuntos dentro de un municipio) o de carácter simplificado, que no requiere la aprobación de una ponencia de valores y se inicia cuando por causa de una modificación del planeamiento urbanístico se varíe el aprovechamiento (la edificabilidad), el uso o la naturaleza del suelo.

El Procedimiento de valoración individualizada se determina teniendo en cuenta las características del bien inmueble, mediante la aplicación de la ponencia de valores, o mediante los módulos aprobados por la OEHA3188/2006. La expresión que sirve como base es la siguiente:

$$Vv = 1,40 \cdot Fl \cdot (Vr + Vc)$$

Donde,  $Vv$  es el valor en venta del producto inmobiliario en €/m<sup>2</sup>,  $Vr$  el valor de repercusión del suelo en €/m<sup>2</sup>,  $Vc$  es el valor de la construcción en €/m<sup>2</sup>, y  $Fl$  es el factor de localización que evalúa las diferencias de valor de productos inmobiliarios análogos por su ubicación, características constructivas y circunstancias socio- económicas de carácter local que afecten a la producción inmobiliaria.

El proceso de valoración catastral sigue una secuencia de tareas, que son: la coordinación de valores, el establecimiento de los criterios marco de coordinación nacional y la identificación de las zonas de valor.

La coordinación de valores se subdivide en los módulos básicos de repercusión de suelo ( $MBR_s$ ) y módulos básicos de la construcción ( $MBC_s$ ) basados en un módulo ( $M$ ), cuyo valor lo fija la OEHA1213/2005, y que alcanza el valor de 1.000 €/m<sup>2</sup>. Según las distintas áreas homogéneas, los módulos básicos se calculan multiplicando el módulo  $M$  por factores de diversificación de los componentes de suelo ( $F_{si}$ ) y construcción ( $F_{ci}$ ) del módulo ( $M$ ), conforme a unas secuencias.

Los Criterios Marco de Coordinación nacional que delimitan Áreas económicas homogéneas, asignan módulos de suelo y de construcción, realizan el catálogo de edificios y construcciones de carácter urbano y establecen los criterios de aplicación del factor *Fl*. Las Juntas Técnicas Territoriales de Coordinación Inmobiliaria (JTCI) son las encargadas de realizar la delimitación de áreas económicas homogéneas teniendo en cuenta los estudios previos encargados a las Gerencias Territoriales (GT), unos estudios que contienen datos identificativos de las zonas y plano de ubicación de estas; costes de la construcción de las tipologías más características; precio de venta medio de las zonas; estimación de valores de suelo y datos económicos que incidan en la actividad económica. Las JTCI redactan unas Propuestas Coordinadas de Valores, incluyendo la asignación de los MBR y Zonas de valor para el suelo y los MBC para la construcción que se elevan a la Comisión Superior de Coordinación Inmobiliaria (CSCI), que es quien establece los criterios a nivel nacional y asigna definitivamente los módulos MBR, zonas de valor y MBC a los municipios correspondientes. Las GTs elaboran el Catálogo de Edificios y Construcciones de carácter urbano correspondiente a su ámbito territorial, coordinado con la JTCI y en concordancia con las tipologías establecidas en el cuadro de coeficientes de valor de las construcciones. Los catálogos se realizarán de acuerdo a las instrucciones de la Dirección General del Catastro, previo estudio de la CSCI. A cada municipio se le asigna un *Fl* en función de su MBR.

En cuanto a las zonas de valor, los órganos encargados de su establecimiento son: La Comisión Superior de Coordinación Inmobiliaria (CSCI), las Juntas Técnicas de Coordinación Inmobiliaria (JTCI) y los Ponentes de las JTCI. Éstas se dividen en tres tipos: valor de municipio, de polígono y de zona o calle.

Finalmente, se aplican diferentes coeficientes correctores dependiendo de si se trata de suelo o de construcción.

Los coeficientes correctores del valor del suelo son:

Coeficiente A) Parcelas con varias fachadas a vía pública: A-1: Dos fachadas, 1,10 A-2: Tres o más fachadas, 1,15

Coeficiente B) Longitud de fachada. Cuando sea inferior a la mínima establecida por el planeamiento, se aplicará  $L/LM$ , siendo  $L$  la longitud de la fachada y  $LM$  la longitud mínima, nunca será inferior a 0,60.

Coeficiente C) Forma irregular. La geometría de la parcela impide o dificulte la obtención del rendimiento previsto en el planeamiento.

Coeficiente D) Fondo excesivo. Se aplicará el coeficiente reductor  $1/n+1$  siendo n el número de plantas de edificación permitidas en la calle.

Coeficiente E) Superficie distinta a la mínima (SM) se aplicarán los coeficientes:  $S/SM < 1 \rightarrow 0,80$  (aplicable a toda la superficie);  $1 \leq S/SM \leq 2 \rightarrow 1,00$ ;  $2 \leq S/SM \rightarrow 0,70$  (aplicable a la superficie que exceda 2 SM)

Coeficiente F) Inedificabilidad temporal. A la parte afectada coeficiente reductor de 0,60.

Coeficiente G) Afección a suelos destinados a construcción de viviendas sometidas a regímenes de protección pública. Coeficiente corrector de 0,70.

Todos los coeficientes se aplican en el caso de suelo valorado por unitario y los A) y B) en caso de repercusión.

Los coeficientes correctores del valor de la construcción por su parte, se calculan como valor unitario de la construcción. El valor unitario de la construcción se fija utilizando el coste de reposición, calculando su coste actual, teniendo en cuenta su uso, calidad y carácter histórico-artístico y depreciándolo en su caso, en función de la antigüedad, estado de conservación y demás circunstancias aplicables para su adecuación al mercado. El valor de construcción de un bien inmueble, es el resultado de multiplicar la superficie construida del mismo, incluida la parte proporcional de elementos comunes que le corresponda, por el valor unitario de construcción y por los coeficientes correctores del valor de las construcciones que le sean de aplicación.

Coeficiente H) Antigüedad de la construcción. Se considera además del año de la finalización de las obras, el uso predominante a que está destinada la edificación y su categoría o calidad constructiva.

Coeficiente I) Estado de conservación. Si a pesar de la edad no necesita reparaciones importantes, = 1,00; si presenta defectos permanentes, pero sin comprometer la habitabilidad y estabilidad = 0,85; si necesita reparaciones de relativa importancia comprometiendo la habitabilidad y

estabilidad = 0,5; y si la construcción resulta inhabitable o está declarada legalmente en ruinas = 0.

Coeficiente J) Depreciación funcional o inadecuación. Se aplicará 0,80

Coeficiente K) Viviendas y locales interiores. Cuando todos sus huecos de luces den a patio de parcela se aplicará 0,75.

Coeficiente L) Fincas afectadas por cargas singulares. Si están en Planes Especiales de Protección. Si hay intervención de conservación, se permiten obras de reparación, restauración o mantenimiento = 0,70 ; si hay intervención de cambio de uso o redistribución = 0,80; si hay intervención de renovación por vaciado o sustitución interior = 0,90.

Coeficiente M) Fincas afectadas por situaciones especiales de carácter extrínseco. Futuros viales, expropiación, compensación o fuera de ordenación por uso, se aplicará el coeficiente 0,80.

Coeficiente N) Apreciación o depreciación económica. Para adecuar los resultados anteriores a la realidad del mercado inmobiliario: Situaciones de apreciación:  $1,80 \geq N > 1,00$  Situaciones de depreciación:  $1,00 > N \geq 0,50$   
Situaciones de depreciación:  $1,00 > N \geq 0,50$

Así, la fórmula para calcular el valor catastral queda como:

$$\text{Valor Catastral} = 1,40 \cdot Fl \cdot (Vs \cdot CCs + Vc \cdot CCC) \cdot CCC \cdot RM$$

Donde *FL* es el factor de Localización; *Vs* es el valor del suelo de la Ponencia de valores, repercusión o unitario, *CCs* son los coeficientes correctores del suelo que le sean de aplicación, *Vc* es el valor de construcción de la Ponencia de valores, *CCC* los coeficientes correctores de la construcción que le sean de aplicación, *CCC* son los coeficientes correctores conjuntos (suelo más construcción) que le sean de aplicación y *RM* es el Coeficiente de relación al mercado.

Para este estudio, el valor catastral de cada elemento individual se ha obtenido por dos procedimientos, de una parte la distribución del valor catastral total de los estadísticos ofrecidos por el catastro, por tipología (Tabla 40) y superficie, de los bienes inmuebles. Y por otra, accediendo directamente a datos protegidos del catastro con la valoración actualizada.

Para el primer ensayo, dado que el valor por uso se expresa en €/m<sup>2</sup>, la distribución a cada bien inmueble se hace conforme a la superficie de la BBDD alfanumérica ( $S_{Bi}$ ), y en la agregación de referencias catastrales se realiza el sumatorio de los valores. Así, una parcela catastral puede tener mayor o menor superficie cartográfica que la superficie que computa a efectos de su valoración catastral (Figura 115). En relación a los usos, a cada parcela se le asigna el uso mayoritario por superficie a efectos de control. Si bien esto puede conducir a un conteo infravalorado de locales comerciales para edificios de varias plantas con uso residencial mayoritario, no debe influir en lo que se refiere a su valoración catastral, que es asignada previamente a la obtención del mayoritario del uso. Una vez conocido el valor total de la parcela catastral, se distribuye por área de la parcela, lo que permite operar en términos cartográficos con el resto de capas y recalcular el valor del polígono afectado (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). No obstante, la práctica siguiendo este procedimiento ha demostrado ser más difícil de implementar debido a la escasez de datos para aplicar adecuadamente la actualización de los valores catastrales incluso siguiendo métodos de comprobación del valor catastral (Aberturas, 2012). El segundo ensayo, trabajando con datos protegidos, evita incertidumbres relacionadas con el proceso de actualización de los datos y con la asignación de valoraciones medias a tipologías mayoritarias, pero requiere un procesado y pretratamiento de los datos algo diferente.

## 2. El valor asegurado

La valoración real de los bienes contenida en las parcelas de peligrosidad conforma la totalidad de la exposición; sin embargo, en el ámbito asegurador sólo está expuesta aquella parte de la totalidad que se encuentra cubierta por un seguro. Por este motivo hay que añadir a la estimación del valor expuesto un coeficiente que refleje la proporción de elementos asegurados. Este coeficiente según UNESPA 2012 es próximo al 70% (68,5 para viviendas y 69,7 para empresas –oficinas, comercios, etc.), es decir, en promedio y con carácter general, se puede suponer que un 31% (aprox) del total es una pérdida no imputable al sistema de seguros.

Tabla 40. Tipos de usos con valoración catastral contenido en los estadísticos del Catastro.

Nombre del atributo	Descripción
V_SUELO	Valor catastral suelo
V_CONSTRUCCION	Valor catastral construcción
V_CATASTRAL	Valor catastral total
V_CAT_RES	Valor catastral uso Residencial
V_CAT_ALMACEN	Valor catastral uso Almacén
V_CAT_COMERCIAL	Valor catastral uso Comercial
V_CAT_CULTURAL	Valor catastral uso Cultural
V_CAT_HOSTELERIA	Valor catastral uso Ocio, Host.
V_CAT_INDUSTRIAL	Valor catastral uso Industrial
V_CAT_DEPORTIVO	Valor catastral uso Deportivo
V_CAT_SOLAR	Valor catastral uso Suelo vacante
V_CAT_OFICINAS	Valor catastral uso Oficinas
V_CAT_SINGULAR	Valor catastral uso Edif. singular
V_CAT_RELIGIOSO	Valor catastral uso Religioso
V_CAT_ESPECTACULOS	Valor catastral uso Espectáculos
V_CAT_SANIDAD	Valor catastral uso Sanidad, Benefic

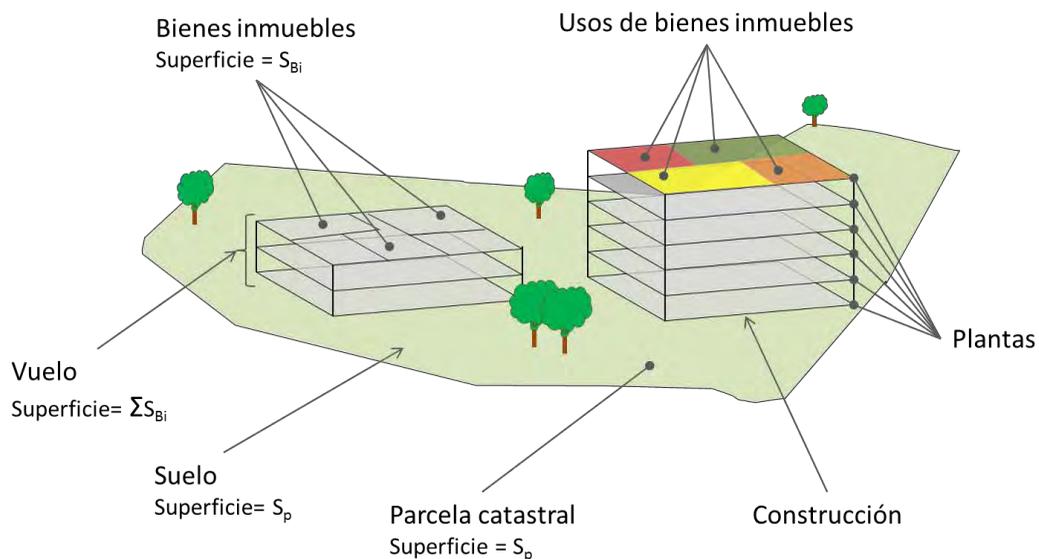


Figura 115. Esquema conceptual de los elementos que pueden intervenir en una parcela: de cero a varias construcciones, con uno o más bienes inmuebles, con uno o varios usos.

### 7.3. La BBDD gráfica y su preprocesado

Los datos gráficos están disponibles en distintos formatos. Para el presente proyecto se trabajó con el formato shapefile de la compañía ESRI, un estándar “de facto” en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica. En la descarga electrónica de los archivos se pueden encontrar las siguientes tablas asociadas a información geométrica (en urbano):

*ALTIPUN*. Puntos de altimetría con cota y puntos de las redes geodésicas y topográficas.

*BLOQUEO*. Zonas bloqueadas para edición

*EJES*. Ejes de elementos lineales (calles, carreteras)

*ELEMLIN*. Elementos cartográficos lineales

*ELEMPUN*. Elementos cartográficos puntuales

*ELEMTEX*. Rótulos del mapa

*HOJAS*. Hojas de división de la cartografía urbana.

*LIMITES*. Límites administrativos (de municipio, de suelo de naturaleza urbana, etc.)

*MAPA*. Identificación de cada una de las zonas con cartografía diferente. Normalmente en cada municipio hay un mapa de urbana y otro mapa de rústica. Dentro de un mismo mapa hay coherencia cartográfica pero entre mapas puede haber pequeñas inconsistencias.

*MASA*. Agrupaciones de parcelas (manzanas de urbana y polígonos de rústica)

*PARCELA*. Parcelas catastrales. Las parcelas que tiene el campo. *PARCELA* = '09000' no existen en realidad y son un artificio necesario dentro del sistema de información geográfica catastral

para conseguir la continuidad de la cartografía rústica. Deben ser ignoradas.

*SUBPARCE.* Subparcelas de cultivo (zonas de igual cultivo o aprovechamiento dentro de una parcela). Las que tienen el campo PARCELA='09000' deben ser ignoradas.

*CONSTRU.* Subparcelas urbanas que representan los volúmenes edificados dentro de una parcela.

En rústico están además: RUCULTIVO y RUSUBPARCELA.

Se puede encontrar más información en la propia web del catastro y en concreto en el documento titulado "Cartografía catastral en formato shapefile versión 1.0", de 25 de marzo de 2011, disponible en la web del Catastro.

El interés para este estudio de los distintos shapefiles que ofrece el catastro, se limita al uso de las parcelas Catastrales, a las que se vincula la información alfanumérica con la referencia catastral. La referencia catastral de un inmueble tiene 20 caracteres, de los cuales, los 14 primeros indican en qué parcela cartográfica o polígono se ubica en el territorio, y los otros 6 identifican el inmueble dentro de la parcela (4 caracteres). Los últimos dos dígitos son dígitos de control. Por ejemplo en el caso de un edificio de apartamentos, las referencias catastrales de todos ellos tendrán en común los 14 primeros caracteres y diferentes los 6 últimos. Por este motivo, el campo REFCAT que aparece en la tabla PARCELA (y también en SUBPARCE, CONSTRU y RUSUBPARCELA) tiene solo 14 caracteres.

El campo REFCAT es en realidad un dato codificado y obtenido de la siguiente manera:

- Para las parcelas cuyo atributo "TIPO" es igual a "R" o "X", la referencia se compone del campo DELEGACIO (con 2 dígitos y rellenando con ceros; por ejemplo 02 para la delegación 02), el campo MUNICIPIO (tres dígitos), y los campos HOJA (1 dígito), MASA (3 dígitos) y PARCELA (5 dígitos).
- Para las parcelas cuyo atributo "TIPO" es igual a "D", la referencia se compone del campo MASA (4 dígitos), PARCELA (3 dígitos) y HOJA (7 dígitos).

- Para las parcelas cuyo atributo "TIPO" es igual a "U", la referencia se compone del campo MASA (5 dígitos), PARCELA (2 dígitos) y HOJA (7 dígitos).

Esta forma de trabajar permite utilizar las parcelas catastrales teniendo información de todos los bienes inmuebles que contiene, evitando el uso de las subparcelas y construcciones y garantizando la privacidad de cada titularidad.

El número de objetos gráficos con los que se ha trabajado está compuesto por 704 archivos (176 shapefiles, uno por cada municipio en rústico y urbano), del total de más de 4.400 archivos en urbano y 4.752 en rústico.

### **Incertidumbres en la cartografía catastral**

Durante este proyecto se han identificado algunos elementos de topología en sentido SIG que han dificultado el procesado de los datos, como por ejemplo: parcelas duplicadas (seguramente procedentes de datos históricos); posibles discrepancias en la actualización de datos entre la BBDD gráfica y la alfanumérica; no asociación completa entre la BBDD gráfica y la alfanumérica o asociaciones incorrectas (referencias catastrales mal asignadas o ausencia de registro catastral); huecos y solapes y otros errores topológicos inespecíficos (polígonos no cerrados, intersecciones implícitas, y otros). Si bien estos aspectos conducen a un error de valoración relativamente pequeño, se han tenido que corregir parcialmente (aplicando operaciones sistemáticas no supervisadas) para permitir tan sólo el uso de las BBDD y reducir los tiempos de cálculo. En concreto, el error es inferior al 0,64% en superficie total indexada, que representa una infravaloración inferior al 2% en número de objetos y en términos económicos una desviación teórica del 7%. Otra fuente de error adicional viene dada por la no correspondencia entre los límites costeros de las diferentes coberturas con las que se trabaja, lo que repercute en un error del orden del 0,4% en términos económicos.

## **7.4. Vehículos y personas**

Una vez obtenido el valor catastral, se puede considerar que, en promedio, la presencia de personas y vehículos pueda estar ligada a los bienes inmuebles en proporción al valor de los mismos. Es evidente que esta aproximación no tiene en cuenta el factor horario de eventos y la concentración de vehículos y personas por usos de parcelas. Es decir, si un evento tiene lugar en horario laboral, cabe

esperar que la concentración de vehículos y personas se incremente en los usos comerciales y de oficinas en detrimento de los usos residenciales; y al contrario, en caso de que un evento tenga lugar en horario de descanso, es más probable que la concentración de vehículos y personas se distribuya de preferencia por los usos residenciales o de ocio. A esta aproximación habría que añadirle la relación de ocupación de parkings por días y horas, suponiendo que la afección a los vehículos en movimiento sería inferior a los vehículos estacionados, o incluyendo otros aspectos de distribución.

Considerar que el valor catastral de cada parcela se relaciona con el número de vehículos para el caso de inundaciones equivale a considerar que todos los vehículos se encuentran a nivel del suelo. Para las personas afectadas, sin embargo, la afección se relaciona con el valor expuesto, que no es el valor total de la parcela, es decir, esta hipótesis plantea que sólo se consideran afectadas las personas habitando las plantas bajas.

## **7.5. Exposición a inundaciones**

Para este estudio se considera que las avenidas torrenciales extraordinarias acarrearán gran cantidad de material sólido, y que el agua circula a alta velocidad tal y como se recoge en los Estudios Preliminares del Riesgo de Inundación de los distintos Consejos Insulares de Aguas de Canarias ([CIAEH 2013](#), [CIAFV 2013](#), [CIAGC 2013](#), [CIAGO 2013](#), [CIALP 2013](#), [CIALZ 2013](#), [CIATF 2013](#)). Esta consideración hace pensar que la capacidad para ocasionar daños a infraestructuras y edificaciones es muy grande (no diseñados para soportar cargas horizontales), si bien no tanto como para destruir de manera generalizada las edificaciones y obras afectadas en todo el ámbito de la mancha inundable, con velocidades y calados muy variables, a pesar de que en algunos lugares con procesos similares se pueda hablar prácticamente de destrucción generalizada o de daños irreversibles (Figura 118, Figura 119 y Figura 120).

Para este proyecto se ha buscado una relación entre el valor de la propiedad y el de su contenido, acudiendo a las encuestas realizadas por el Instituto Canario de Estadística (ISTAC) y en particular a la Encuesta de Ingresos y Condiciones de Vida de los Hogares Canarios (EICV-HC), donde se recogen algunos datos como "equipamientos de consumo de la vivienda" (lavavajillas, microondas, ordenador, televisor, automóvil, etc.). Esta encuesta se realizó en los años 2001, 2004 y 2007, y se encuentra pendiente de publicación la encuesta de 2013. La

encuesta más completa es la de 2007, pero no es suficiente para realizar la estimación buscada, motivo por el que se acude a la experiencia del CCS, según la cual, la relación entre contenido y continente podría ser del orden del 30%. Ahora bien, esta relación vendría a indicar el total de valor de contenido, una referencia de valor máximo que se distribuye de manera muy heterogénea, concentrándose el 75% del daño en unos 20 cm por encima de la altura equivalente de una mesa (unos 75 a 80 cm; Mora y Díez, 2008; Figura 116). En cuanto al daño estructural, se podría esperar para las secciones con calados superiores a 2 m (Martín Vide, 2006; Figura 117).

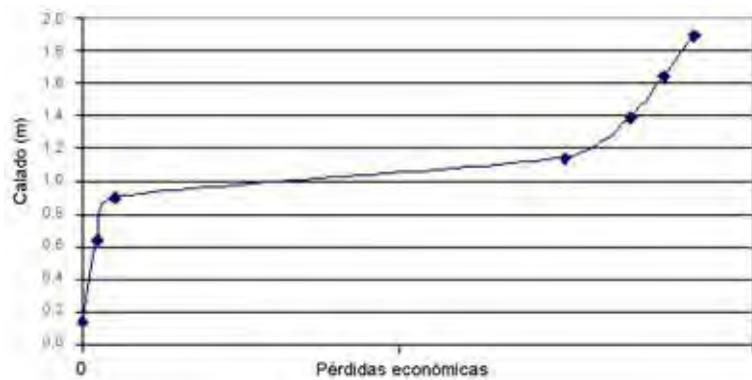


Figura 116. Geometría de una curva de calado-daños. Modificado de Mora y Díez (2008).

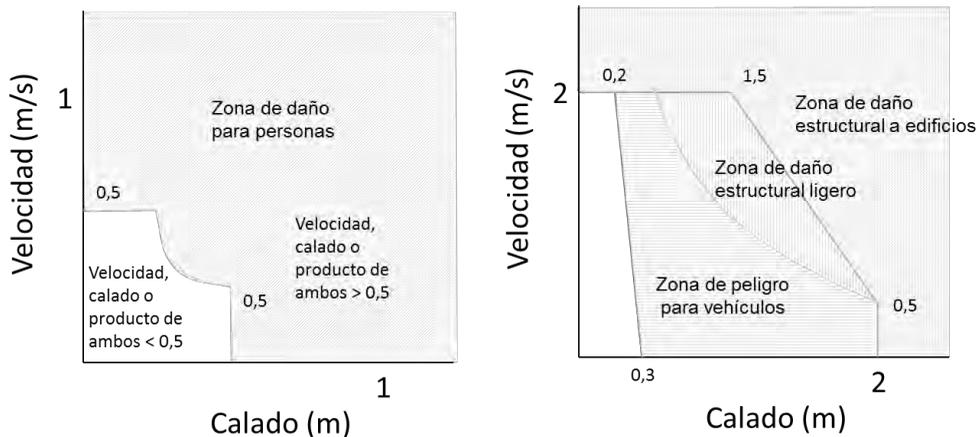


Figura 117. Umbrales de daños para vehículos y edificios (Martín Vide, 2006).



*Figura 118. Avance del lóbulo del abanico de La Fuga de Gorreta en El Hierro, tras la tormenta tropical Delta en 2007, sepultando El Lagartario. (Imagen tomada con apoyo del Gobierno de Canarias).*



*Figura 119. Estado del delta de la Rambla de Albuñol tras las inundaciones de 1973 (tomado del proyecto "Recuperación del patrimonio cultural de Adra" en <http://www.adracultural.es/>).*



Figura 120. Edificio en pie en la zona del delta de la Rambla de Albuñol (tomado del proyecto “Recuperación del patrimonio cultural de Adra” en <http://www.adracultural.es/>).

## 7.6. Exposición sísmica

La exposición al efecto sísmico comprende en este estudio al conjunto total de parcelas para las que el catálogo del catastro contempla edificaciones. Es lógico que a medida que se produce un desarrollo en el territorio, esta BBDD se modifica, lo que resulta en variaciones en cuanto al valor total expuesto y su localización, y por tanto la revisión del catálogo de elementos constructivos por parcela debería realizarse cada cierto tiempo, pero especialmente cuando se produzcan cambios significativos en los modelos de análisis de peligrosidad (PGA, intensidad), cambios en los modelos o en la regulación constructiva o para alimentar el modelo con datos de mayor precisión (a escala de edificios y no de parcelas). Por otro lado, el concepto de exposición sísmica debe integrar un considerando de vulnerabilidad, pues en sentido estricto, todo el capital de edificaciones (todo el parque inmobiliario) está sometido a algún grado de vibración, pero no todo es susceptible de sufrir daños. Por este motivo, la exposición sísmica se presenta en el ámbito del cálculo de valor catastral para cada tipología constructiva. Dado que es un territorio extenso, y que no es objeto

de este estudio un trabajo pormenorizado, se han ensayado las distintas clasificaciones de tipología de vulnerabilidad en función de la edad mayoritaria de los elementos constructivos contenidos en una parcela.

## 7.7. Exposición a volcanismo

En el apartado 6. *Estudio del volcanismo* ya se ha hablado de las limitaciones por motivos prácticos de los considerandos referidos al proceso volcánico. Siguiendo esa misma línea argumental, se considera expuesto todo el territorio bajo la “mancha cartográfica” de las coladas de lava de cada escenario considerado. Los efectos de la colada se consideran totalmente destructivos para los elementos constructivos, por lo que la exposición para el caso del volcanismo viene reflejada por el valor total contenido en dichos polígonos (Figura 121).



Figura 121. Restos del edificio principal del Parque Natural del Volcán Fogo (Cabo Verde, 2014).  
Imagen de <http://www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Fogo/Fogo.html>.



## 8. Resultados

### 8.1. Riesgo por inundaciones

El capital comprometido en la zona inundable (plantas a ras de suelo) representa el 58,84% del valor total de las parcelas construidas en zona inundable, una relación un 5,45% inferior a la ratio de los totales, es decir, el 64,29% del valor total se acumula en las plantas bajas y subterráneas. Por otra parte, el capital expuesto a inundaciones del conjunto de todos los escenarios de T500 representa el 27,92% del capital total, es decir, hay un 72,08% del capital fuera de zonas inundables (en términos de parcelas catastrales construidas).

Estas estadísticas se obtienen del cruce de las capas resultantes de peligrosidad y del catastro. Su interpretación a escalas de detalle, como ya se ha comentado en apartados anteriores, no resulta conveniente, y su generalización a escalas menores integrando los considerandos del estudio de peligrosidad no son inmediatas. Para aplicar las hipótesis del generador de escenarios más desfavorables hay que asignar el sumatorio de los elementos expuestos (su valor) a un polígono que los agrupe, y realizar las operaciones oportunas basándose en el criterio más desfavorable de probabilidad aproximadamente T500.

Para la estimación de capitales en riesgo, tal y como se adelantaba en el apartado 7.5 *Exposición a inundaciones*, se han establecido tres intervalos conforme al calado para representar la sigmoide de daños. En primer lugar se ha asignado el valor de cota de los MDE al centroide del fragmento de polígono de parcela contenido en la mancha inundada. En segundo lugar se ha asignado a dicho centroide el conjunto de atributos del punto de cauce más próximo (distancia euclídea). La comparación entre la cota inundada en dicho punto y el centroide de la parcela se considera como el calado de referencia de cada parcela. Ahora bien, existen problemas en la asignación derivados en primer lugar de un MDE no totalmente depurado, por conservación o eliminación de elementos constructivos y otros errores de asignación relacionados con el origen geomorfológico del elemento inundado. De ahí que algunos centroides se encuentren muy alejados del punto más próximo de un cauce o que la diferencia de cota sea muy grande (tanto por exceso como por defecto). Aun así, el histograma de calados es extremadamente afilado en la proximidad del valor cero, acumulándose el 60% de las parcelas entre  $\pm 5$  m (Figura 122). Más aún, la mayor parte del valor estimado se encuentra asociado al intervalo de calados pequeños y positivos (valor normalizado entre

50 y 60 %), aportando poco valor los datos contenidos en los extremos (menos del 10% para los calados negativos y menos del 10% para calados extremos).

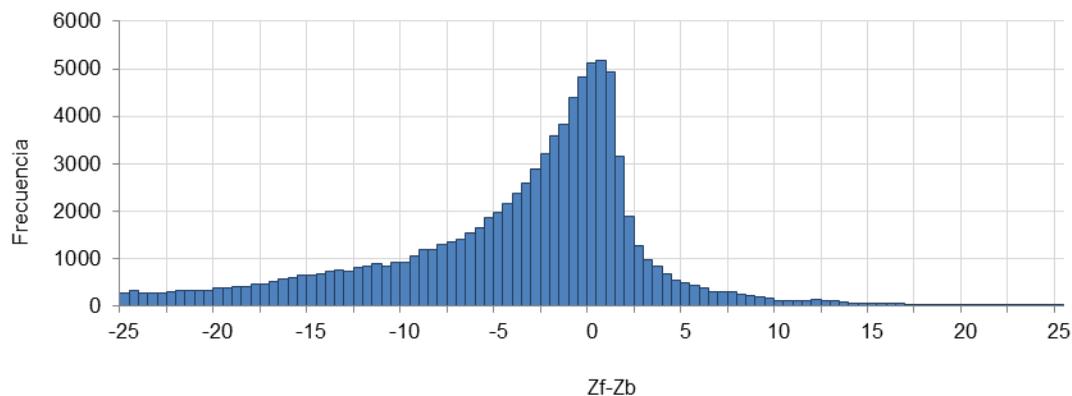


Figura 122. Histograma de variación de cota de inundación respecto a la cota del centroide de las parcelas localizadas en zona inundable según modelo hh, geomorfología y daños históricos.

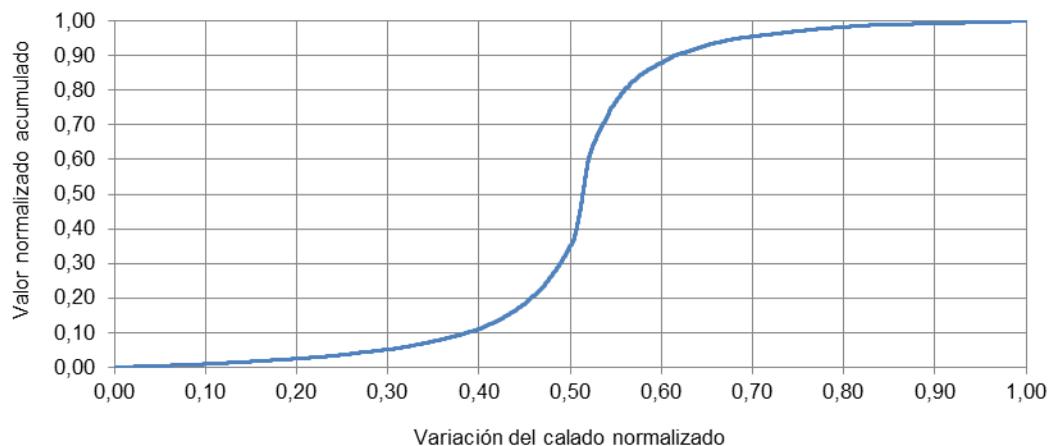


Figura 123. Valor acumulado estimado (pérdidas probables) respecto al calado normalizado en el intervalo considerado para el estudio.

No obstante, dado que no se han eliminado completamente todos los elementos estructurales del territorio y que en algunos casos pueden existir zonas profundas en las proximidades de los cauces, se ha considerado como umbral de cálculo los valores  $\pm 25\text{m}$ , es decir, los centroides con valores inferiores a  $-25\text{m}$  o

superiores a +25m se consideran excluidos del cálculo; con ello se incluyen el 90% de los centroides. Se ha comprobado que este cálculo es muy estable, pues reducir el intervalo a  $\pm 5$ m produce una variación en la estimación de capitales en riesgo inferior al 20%; o dicho de otro modo, la concentración del 80% del capital se encuentra entre  $\pm 5$ m. Además, se incluye un factor de confianza en función de la distancia del centroide al punto del cauce más próximo y al ancho de la lámina libre, de modo que se integra en el cálculo todo aquello que esté alejado incluso un 30% respecto al ancho de la zona inundable, y el resto de valores se reducen en la parte proporcional de la distancia excedente. Así, puntos muy distantes de un cauce, son penalizados cuanto más alejados están. El análisis de sensibilidad también muestra que este parámetro resulta muy estable. Finalmente, el valor de la pérdida se indiza para reducir el efecto de ruido de asignación de coeficientes por categorías. Para diferencias de calado inferiores o superiores a  $\pm 25$ m, se desestima el valor asociado a dicho centroide. Para diferencias de calado positivas e inferiores a 1 m se considera como techo el 10% del contenido, hasta 2m el 75% y más de 2m se considera la rehabilitación del continente y el contenido completos. La rehabilitación de continente se representa por un coeficiente que puede ser desde 0,3 (para rehabilitación total de acabados), 0,65 (para rehabilitación total de instalaciones y acabados) o hasta 1,10 para una rehabilitación total (CIEC 2012; CAM 2013). En este caso se ha empleado un coeficiente de 0,65. La ecuación final se expresa del siguiente modo:

$$R(y, d) = \sum_{i=0}^n ((Vc_i * C(y)_i * Crh) + (Vc_i * K * Cc_i * Cv_i * I(y)_i)) * Ce(y)_i * Ca$$

Siendo  $R$  el riesgo de inundación (en euros al 0,2% de probabilidad anual de inundación);  $y$  el calado (en metros);  $d$  la distancia mínima al punto más cercano con estimación de caudal y que adquiere los valores  $d^{-1}$  si  $d > 1,3$  veces la mitad del ancho de la lámina inundable ó 1 en caso contrario;  $Vc_i$  el valor catastral (en euros);  $C(y)_i$  es un coeficiente que adquiere valor 0 cuando  $y < 2$ , en caso contrario, adquiere valor 1 para expresar si hay o no daños a infraestructuras por calado;  $Crh$  el coeficiente de rehabilitación;  $K$  es un coeficiente de relación de continente a contenido (estimado en 0,3);  $Cc_i$  el coeficiente de confianza, que depende de la distancia del objeto  $i$  a la sección inundada;  $I(y)$  es la indización del calado;  $Ce(y)$  es un coeficiente que adquiere valor 0 para  $+25 < y < -25$  y valor 1 en caso contrario; y  $Ca$  es el coeficiente de aseguramiento.

Los resultados se generalizan agrupándolos en entidades mayores para su interpretación. Una agrupación por términos municipales o códigos postales no es la más adecuada porque entra en conflicto con la concepción del origen de la zona inundable: un código postal o un municipio pueden contener una o más cuencas vertientes. La individualización de zonas inundables no siempre es posible debido a las frecuentes coalescencias (y a la complejidad de la BBDD). Una agrupación por cuencas vertientes plantea el inconveniente de que la mancha inundable casi siempre supera el límite de la cuenca en las zonas costeras: por un lado, la mancha inundable no puede ser inferior a un píxel y suele ser mayor (en su dimensión de lámina inundable en sección transversal al flujo) a medida que se aproxima al mar; por otro lado en el punto de desagüe, la cuenca vertiente sí puede tener el tamaño de un píxel (la unidad a partir de la cual se calculan las cuencas vertientes). Una solución aproximada consiste en asignar el centroide interno al polígono del elemento expuesto a la cuenca vertiente más próxima. Este procedimiento muestra que la distancia media de los centroides a su cuenca más próxima es menor que 30 m y que el 86,00% de los centroides cae dentro de alguna cuenca vertiente. Del 14,00% restante, la distancia media es 211 metros, pero se ha podido comprobar gráficamente que los errores de asignación a cuenca vertiente no son representativos. En términos de capital, el 80,85% se asigna sin posible confusión a su cuenca vertiente, y del restante se comprueba que sólo en algunos casos excepcionales, puede estar erróneamente asignado un 7%. Por tanto, éste método asigna correctamente entre el 98 y el 99% del capital. Ese 1 a 2% (en realidad el 85,20% del valor de los datos no asociados directamente a las cuencas vertientes) se asocia a elementos delineados con criterios geomorfológicos que el modelo de escorrentía no es capaz de detectar.

El compendio de todos los escenarios posibles por cuenca vertiente se muestra desde la Figura 124 hasta la Figura 130. Ninguna de estas figuras debe interpretarse como un escenario, sino tan sólo como la expresión del máximo riesgo imputable a cada cuenca vertiente si en ellas ocurriera el evento de T500.

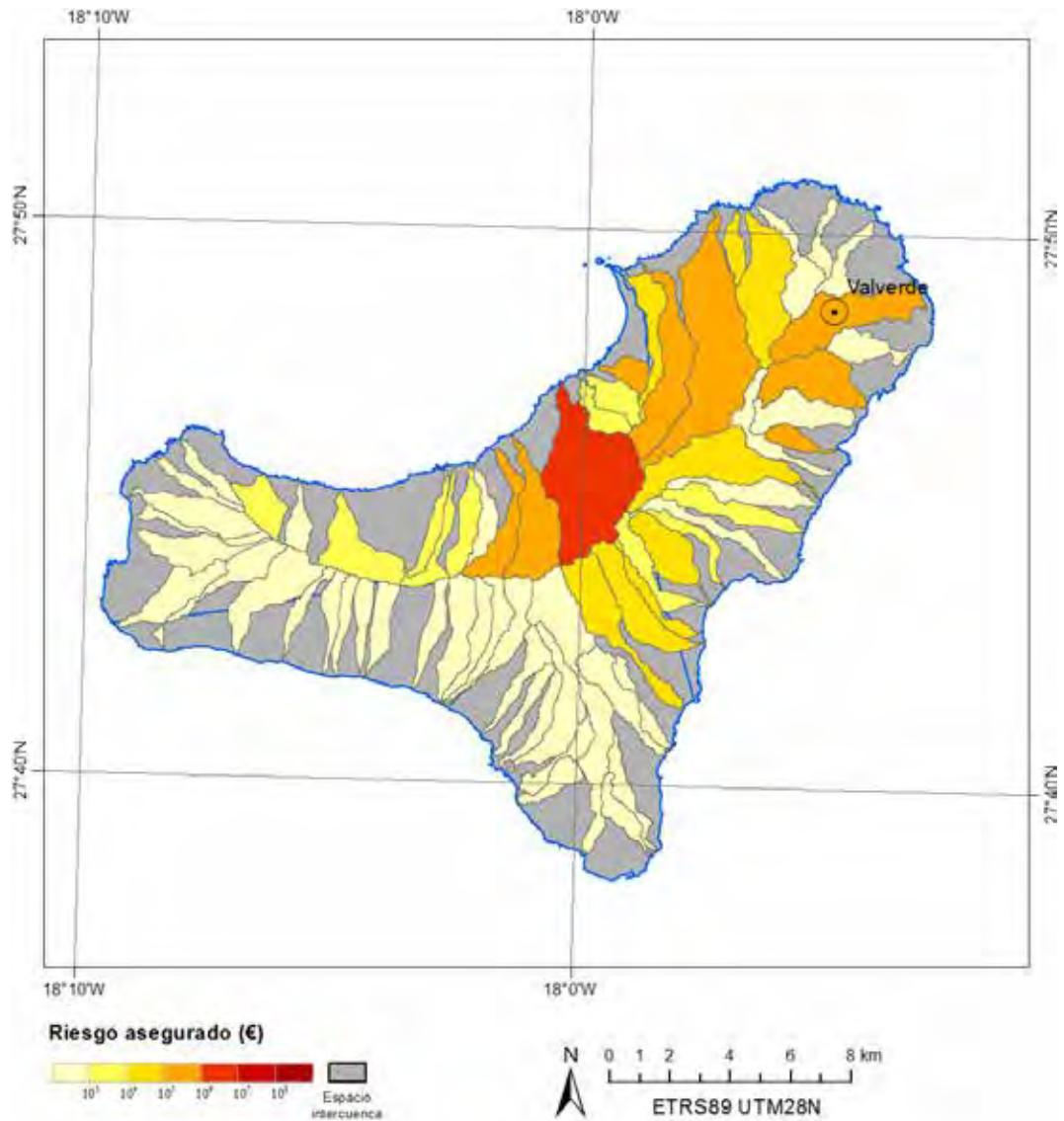


Figura 124. Riesgo por inundaciones en El Hierro (en euros) por cuencas vertientes mayores de 1 km<sup>2</sup>. En gris aparecen representados los espacios intercuencia, sin asignación de valor económico, aunque no por ello son espacios exentos de riesgo.

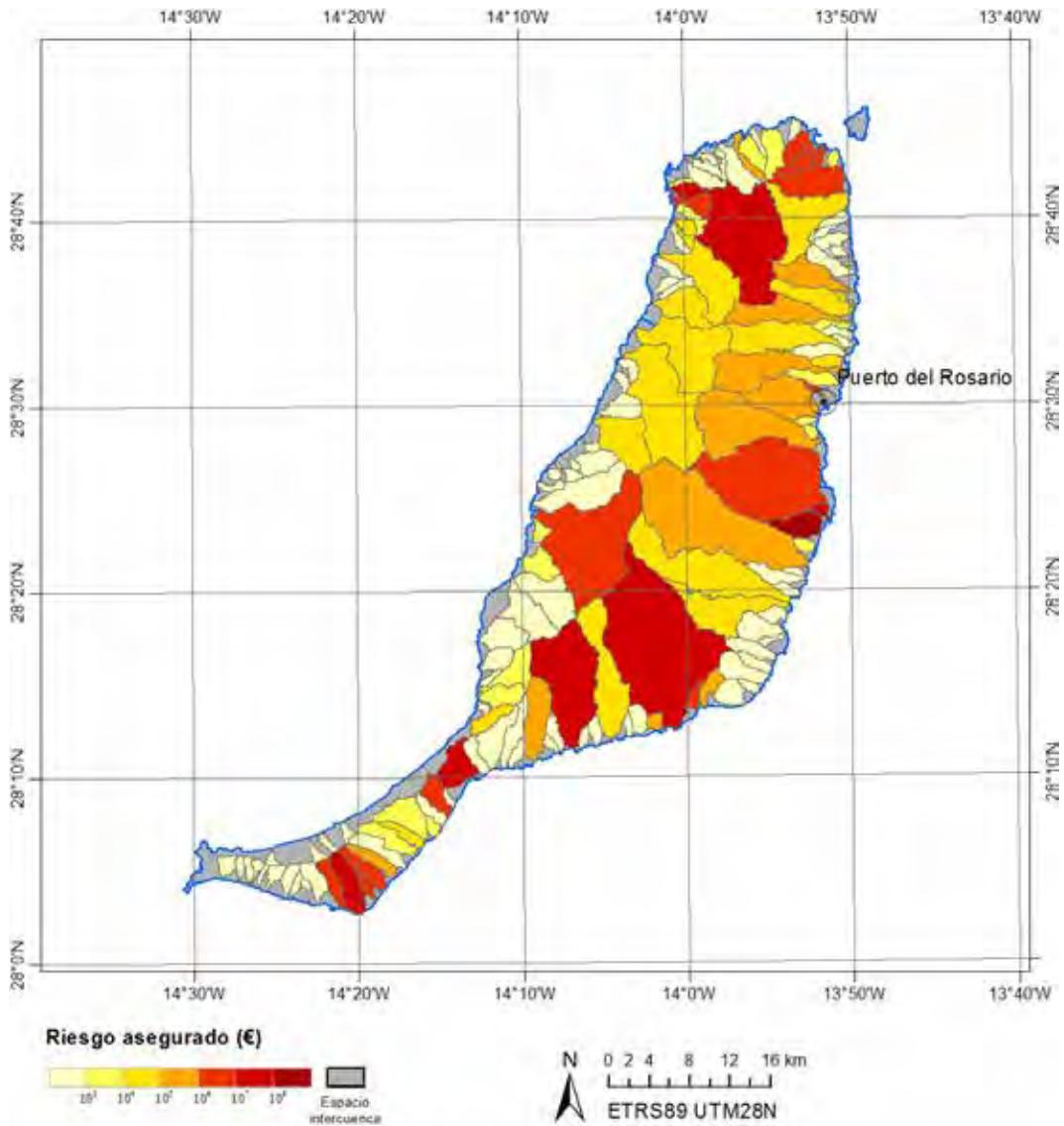


Figura 125. Riesgo por inundaciones en Fuerteventura (en euros) por cuencas vertientes mayores de 1 km<sup>2</sup>. En gris aparecen representados los espacios intercuencia, sin asignación de valor económico, aunque no por ello son espacios exentos de riesgo.

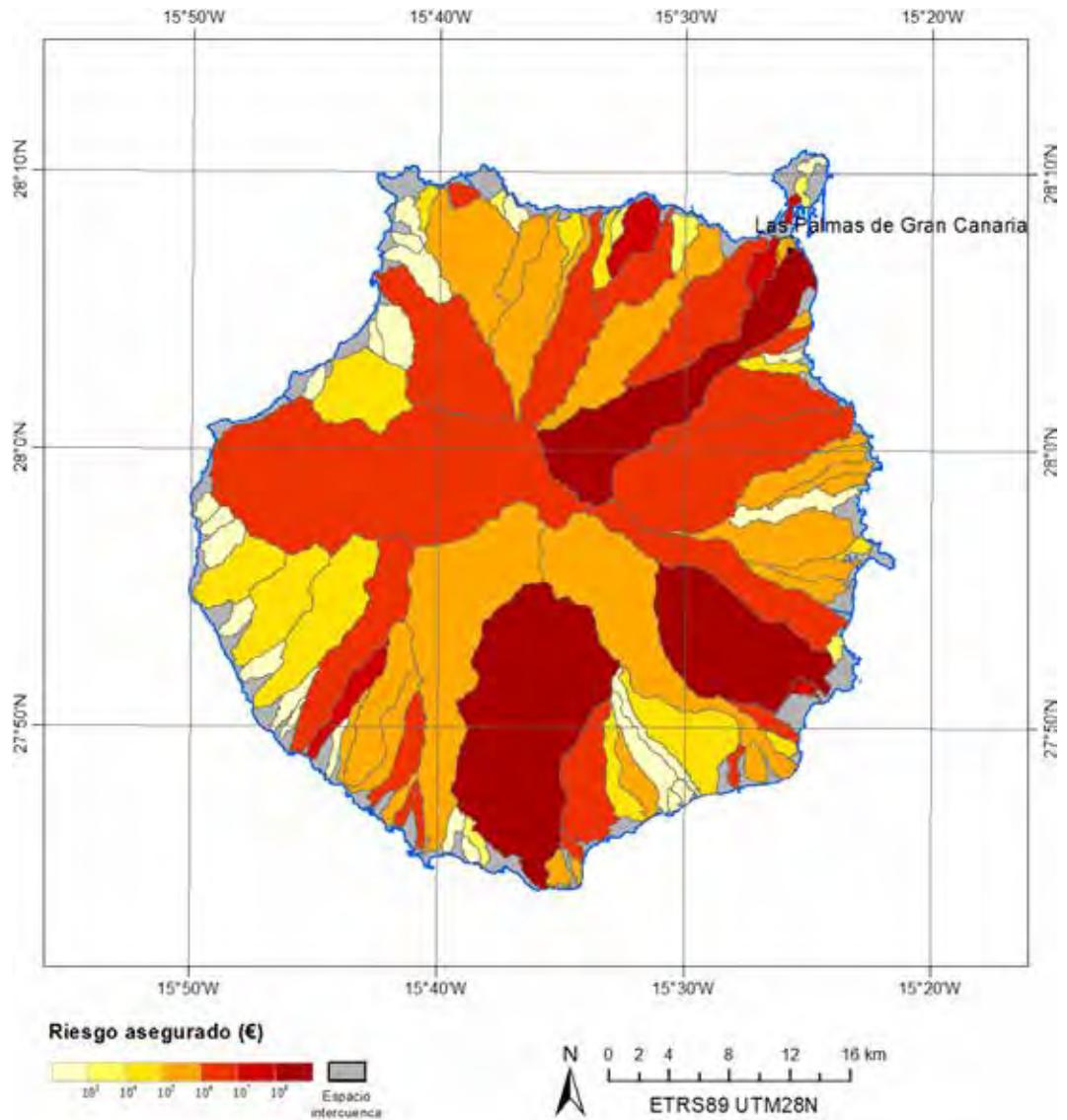


Figura 126. Riesgo por inundaciones en Gran Canaria (en euros) por cuencas vertientes mayores de 1 km<sup>2</sup>. En gris aparecen representados los espacios intercuencia, sin asignación de valor económico, aunque no por ello son espacios exentos de riesgo.

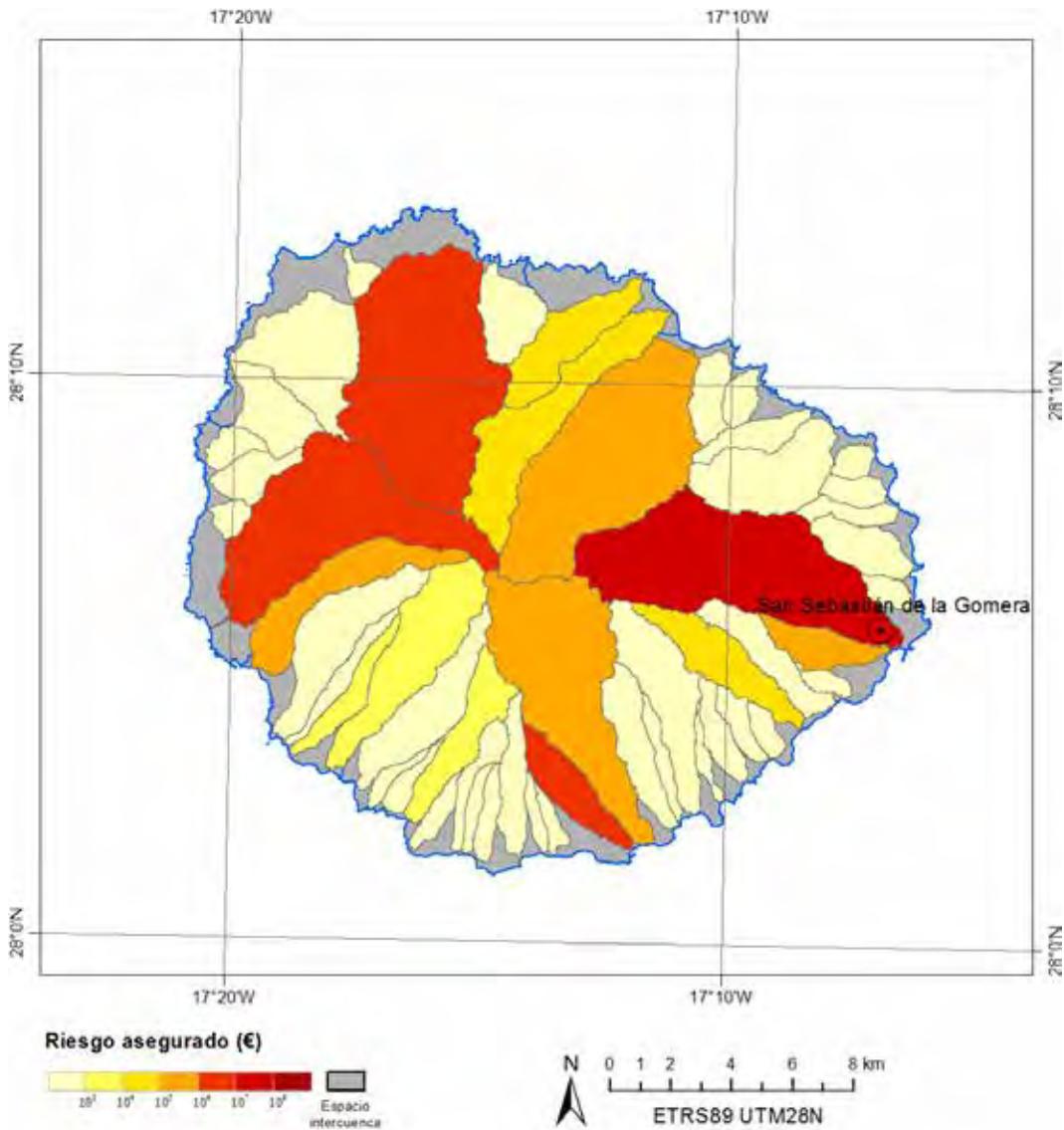


Figura 127. Riesgo por inundaciones en La Gomera (en euros) por cuencas vertientes mayores de 1 km<sup>2</sup>. En gris aparecen representados los espacios intercuenca, sin asignación de valor económico, aunque no por ello son espacios exentos de riesgo.

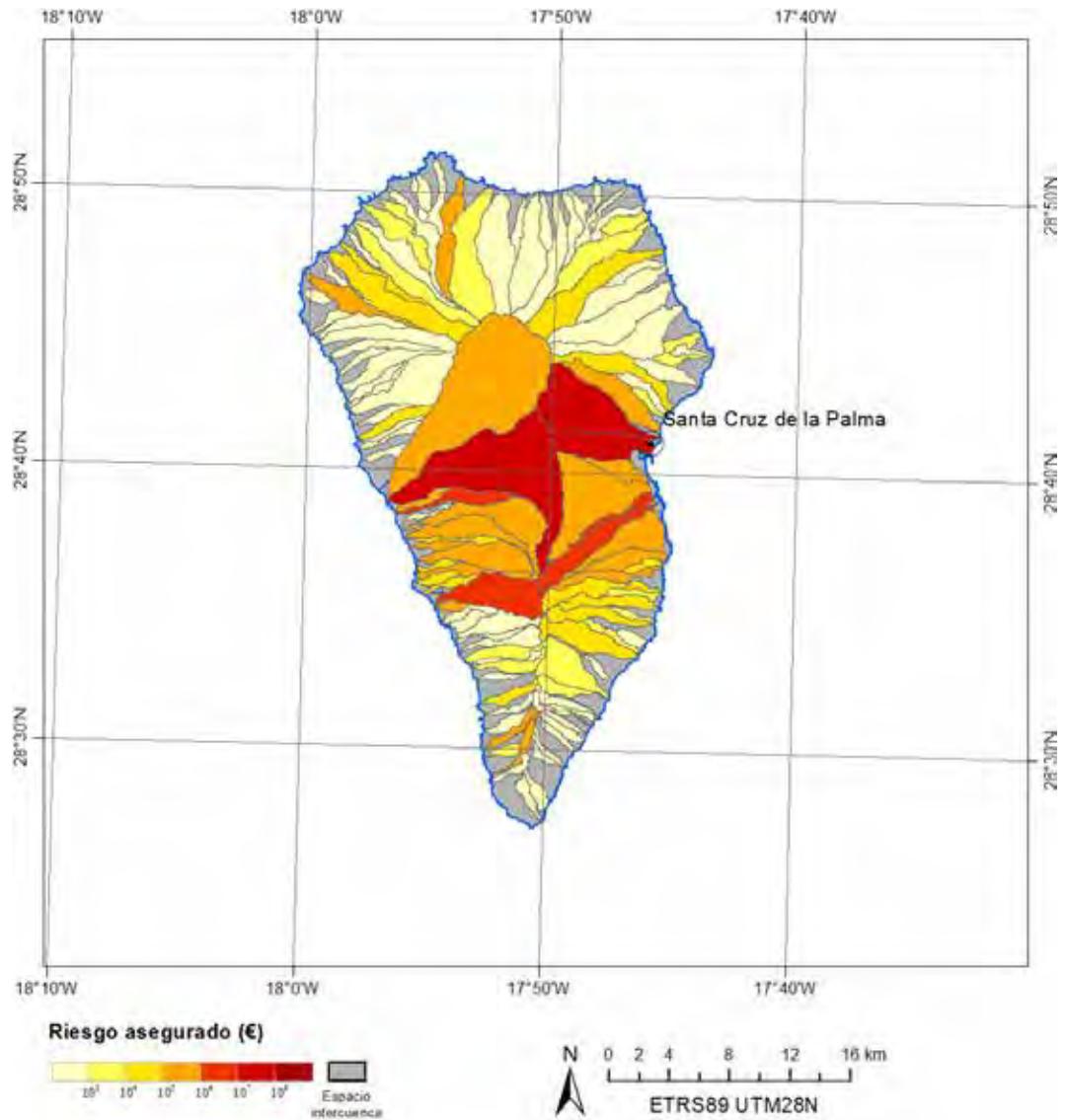


Figura 128. Riesgo por inundaciones en La Palma (en euros) por cuencas vertientes mayores de 1 km<sup>2</sup>. En gris aparecen representados los espacios intercuencia, sin asignación de valor económico, aunque no por ello son espacios exentos de riesgo.

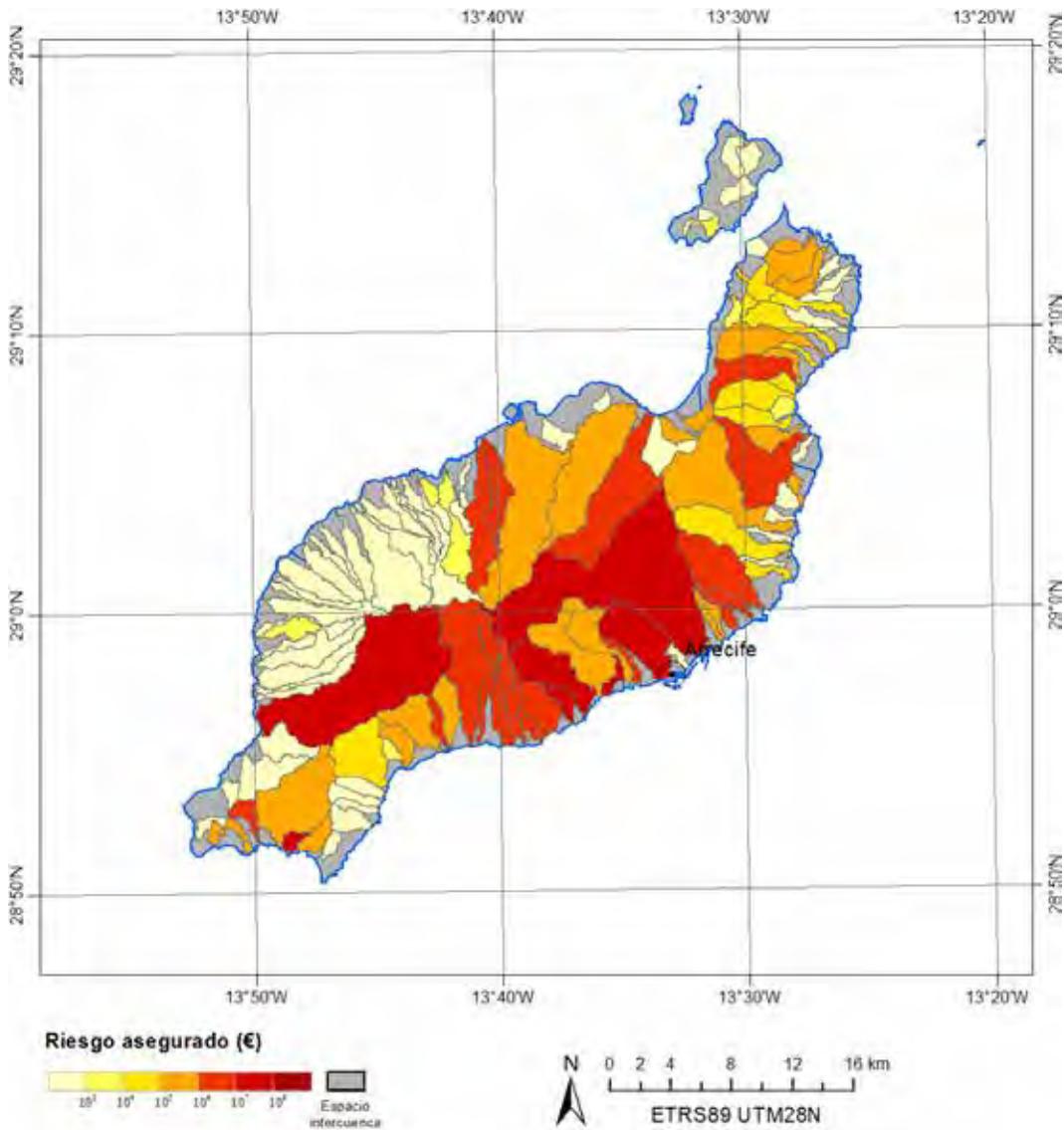


Figura 129. Riesgo por inundaciones en Lanzarote (en euros) por cuencas vertientes mayores de 1 km<sup>2</sup>. En gris aparecen representados los espacios intercuenca, sin asignación de valor económico, aunque no por ello son espacios exentos de riesgo

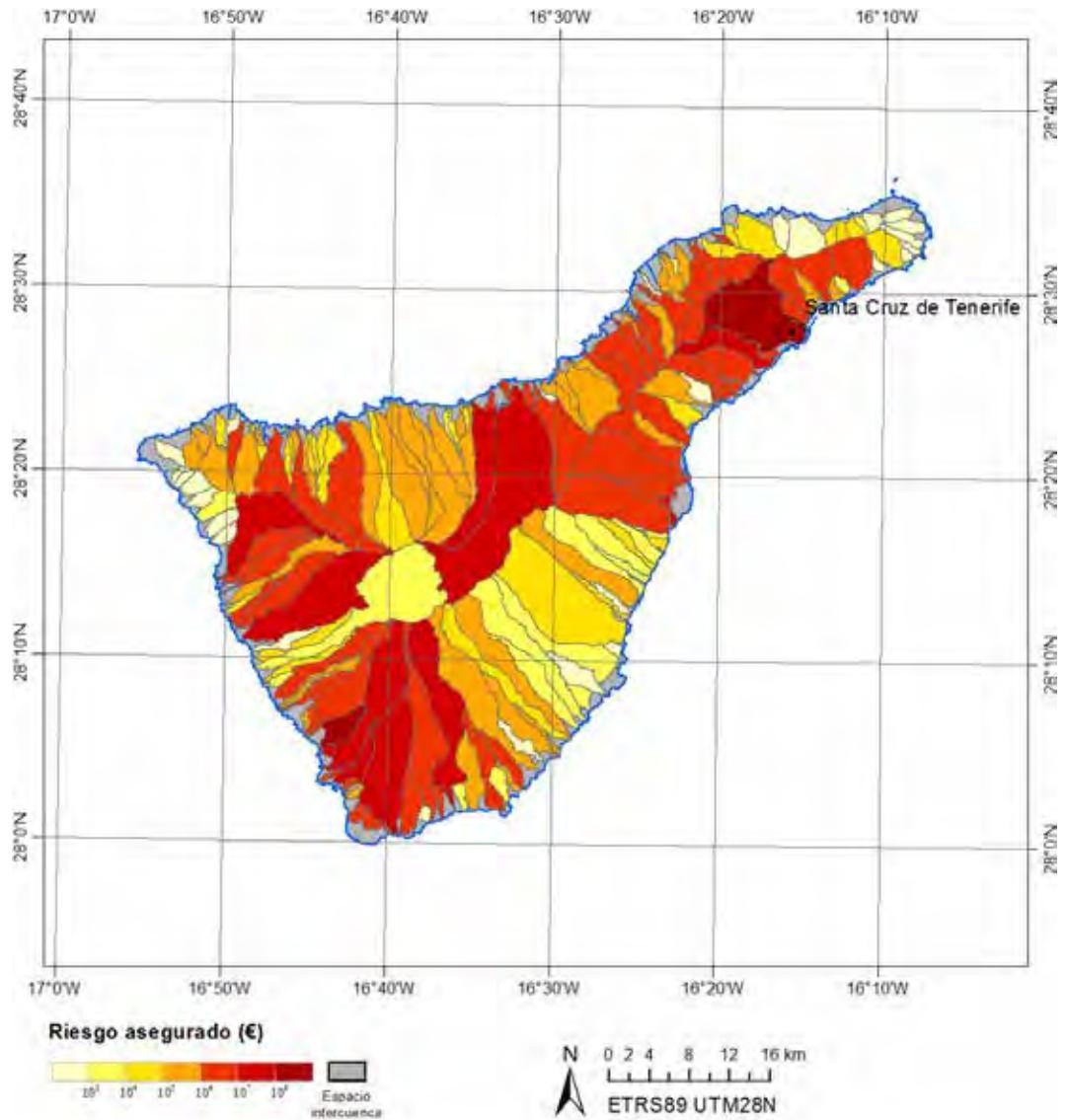


Figura 130. Riesgo por inundaciones en Tenerife (en euros) por cuencas vertientes mayores de 1 km<sup>2</sup>. En gris aparecen representados los espacios intercuencia, sin asignación de valor económico, aunque no por ello son espacios exentos de riesgo.

### 8.1.1. El peor escenario por cuenca vertiente e isla

El peor escenario de T500 por cuenca de todo el archipiélago afectaría a la cuenca tinerfeña TF039, con **596,25 millones de euros imputables al sistema de seguros en continente y contenido**. Este escenario afectaría principalmente a los municipios de San Cristóbal de la Laguna y a Santa Cruz de Tenerife. En el resto de las islas, los daños más altos en una sola cuenca serían los recogidos en la Tabla 41.

Tabla 41. Peor escenario por isla y cuenca, y valor medio por cuenca e isla.

Isla	Cuenca	N. parcelas	Riesgo x10 <sup>6</sup> €	Promedios 10 <sup>6</sup> €
El Hierro	EH014	240	2,35	0,08
Fuerteventura	FV070	320	262,02	3,02
Gran Canaria	GC091	636	235,17	7,28
Lanzarote	LZ082	2.500	73,86	1,91
La Gomera	GO022	539	21,03	0,55
La Palma	LP063	1.096	23,45	0,63
Tenerife	TF039	19.098	<b>596,25</b>	7,66

### 8.1.2. El peor escenario de T500 por isla

Atendiendo a los resultados obtenidos del modelo de peligrosidad, se pueden establecer escenarios que incluyan más de una cuenca vertiente. Existen dos criterios para generar escenarios sin apoyo de un simulador aleatorio: distancia típica de afección (diámetro de 20km) y área típica de influencia (7%, 10% y 20%). A estos dos criterios se puede fijar la posición espacial atendiendo al peor escenario posible por cuenca y a la extensión desde ésta, sumando cuencas contiguas en la misma vertiente (excepto que la vertiente sea muy estrecha, como es el caso de Tenerife), lo que da lugar a un conjunto de “peores escenarios posibles por isla” en T500, cuyos resultados se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42. Escenarios por distancia y por área por isla.

Isla	10km de radio <sup>(1)</sup>		7% de área <sup>(2)</sup>		10% de área <sup>(2)</sup>		20% de área <sup>(2)</sup>	
	N.P.	Ri 10 <sup>6</sup> €	N.P.	Ri 10 <sup>6</sup> €	N.P.	Ri 10 <sup>6</sup> €	N.P.	Ri 10 <sup>6</sup> €
EH	995	5,09	240	2,35	339	3,20	540	4,07
FV	1.049	291,48	578	290,62	792	291,09	901	291,22
GC	3.306	258,19	636	235,17	776	241,43	2.129	256,32
GO	1.579	28,29	539	21,03	584	21,30	596	21,32
LP	3.730	73,90	1.006	35,86	1.194	36,35	1.566	39,98
LZ	7.181	171,66	4.081	118,25	4.336	142,51	6.209	157,06
TF	28.202	666,09	23.163	643,84	24.798	685,62	29.577	<b>716,02</b>

(1) Se obtiene por la selección de cuencas que intersectan un área de influencia de 10km de radio tomando el centroide de la cuenca que más Ri acumula para cada isla.

(2) El área se considera aproximada, y se consigue sumando las áreas de las cuencas adyacentes en la misma vertiente que la cuenca que más Ri acumula.

N.P. es el número de parcelas catastrales afectadas.

### 8.1.3. El peor escenario del archipiélago en T500

Como bien se ha explicitado a lo largo de este trabajo, y especialmente en el apartado de estudio de la peligrosidad por inundaciones, son muchos los factores que hay que considerar para identificar un escenario de probabilidad T500 (o parecida) y que además resulte ser el peor posible (en promedio) y evaluable con un rango de incertidumbre más o menos conocido. En ese sentido, y teniendo presente los condicionantes e incertidumbres de estudio, ya se han presentado los peores escenarios posibles de 0,2% de probabilidad anual si éste evento afectara a una isla; pero en el caso de que el escenario afectara a las siete islas, el recuento del peor escenario posible plantea demasiadas incertidumbres. Por ese motivo, se da como referencia el sumatorio resultante de: el peor escenario posible en una sola cuenca más el promedio de los escenarios por cuenca de cada isla (Tabla 41). De ahí se deriva una cifra en el orden de **los 617,38 millones de euros**. Otro estimador que es conveniente poner de relieve resultaría del sumatorio de los promedios: 21,13 millones, cifra que podría ser la referencia más abstracta y con la que se pone de relieve el importante rango de incertidumbre asociado a los estudios de tan baja probabilidad aquí planteados.

## 8.2. Riesgo sísmico

El riesgo sísmico para este proyecto considera únicamente efectos directos, es decir daños a las estructuras constructivas como consecuencia de una vibración

del terreno. Los daños por consecuencias indirectas, como los desprendimientos de rocas que han tenido lugar en la isla de El Hierro durante las crisis sismovolcánicas recientes (Figura 131), no han sido considerados. En este sentido, el método que se ha seguido para calcular el riesgo es la implementación de un algoritmo distribuido indexado (lineal), tomando como referencia la Tabla 26 de tipologías constructivas, la Tabla 27 a Tabla 29 de tipos de daños a estructuras y la correlación de intensidades del apartado 5.5, generando los grados de daño y definición de cantidades tomando como valor la referencia central del rango. De este modo, los coeficientes de vulnerabilidad varían desde 0 para grado de daño 0, a 1 para grado de daño 5; y tomando como referencia el valor medio más probable de porcentaje de elementos afectados. Así, la matriz de riesgo queda representada según la Tabla 43, que se implementa siguiendo una distribución lineal de los coeficientes de daño por porcentaje de elementos afectados, y el sumatorio de las circunstancias presentes.



Figura 131. Desprendimientos de roca en la isla de El Hierro derivados de la actividad sismovolcánica en El Hierro en 2013.

Tabla 43. Matriz de coeficientes de vulnerabilidad para el cálculo del riesgo.

Intensidad	Algunos (10%)				Muchos (35%)			
	Grupo de vulnerabilidad				Grupo de vulnerabilidad			
	Coeficiente de vulnerabilidad				Coeficiente de vulnerabilidad			
	A	B	C	D	A	B	C	D
V	20%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
VI	40%	40%	20%	0%	20%	20%	0%	0%
VII	80%	60%	40%	20%	60%	40%	0%	0%

La forma numérica de implementar la matriz de la Tabla 43 es la sumatoria para cada clase con la indización de las intensidades de la siguiente manera:

$$R = \sum_G \left( P * \left( \left[ \frac{M_I - I_{min}}{(I_{max} - I_{min})} * (V_{max}^G - V_{min}^G) \right] + V_{min}^G \right) * Cn * M_G \right) * k$$

Donde  $R$  es el riesgo en valor económico;  $M_I$  es la matriz de intensidades calculadas para este proyecto;  $I_{min}$  es el escalar inicial de la secuencia a indizar;  $I_{max}$  es el escalar final de la secuencia a indizar;  $V^G$  es el escalar (mínimo o máximo) del coeficiente de vulnerabilidad para un grupo de vulnerabilidad dado ( $G$ );  $Cn$  es el coeficiente de cantidad para cada tipología de vulnerabilidad;  $M_G$  es la matriz de valor catastral de cada grupo de vulnerabilidad; y  $k$  el coeficiente de aseguramiento. El factor  $P$  sirve para reflejar que un mismo elemento constructivo no puede sufrir dos grados de daño al mismo tiempo, por ejemplo, si algunos (10%) sufren un 40% de daño y muchos (35%) sufren un 20%; parte del 10% sufre en realidad un 40% de daño. Se ha podido comprobar que, el uso de la probabilidad condicionada, respecto a considerar únicamente el tipo de daño más alto, supone una diferencia del orden del 0,5%, sin embargo, la diferencia entre considerar el sumatorio sin el efecto de  $P$ , incrementa la previsión de daño un 7%.

Esta ecuación no entra en conflicto con la ecuación general de Riesgo de este proyecto, sino que supone un desarrollo específico en el que el término de peligrosidad viene construido por la indización del término de intensidades, la exposición viene determinada por la matriz  $M_G$ , y la vulnerabilidad por su correspondiente indización en forma de ecuación dependiente de la peligrosidad; y el coeficiente  $k$  integra elementos relacionados con las distintas aproximaciones ensayadas y los coeficientes de rehabilitación y factor de aseguramiento. De una

parte se ha ensayado la viabilidad de cálculo con datos de acceso libre y por otra se han evaluado los datos con acceso restringido. Los datos de acceso público presentan dos dificultades principales: su actualización y la adecuada distribución de sus valores en términos promedio. Se ha comprobado que, con el procedimiento ensayado con los datos públicos, se llega a una estimación del valor catastral un 34% menor que la valoración catastral de construcciones tomada directamente de los datos protegidos. De otra parte, el coste de producción del bien inmueble (asimilado al valor catastral de la construcción), no es el que corresponde a la parte aseguradora, puesto que no todo está asegurado (coeficiente de aseguramiento; tomado a partir de los datos de [UNESPA 2012](#)); y finalmente, la rehabilitación de un bien representa un coste diferente al coste de producción, en un orden de coeficiente que puede ser desde 0,3 (para rehabilitación total de acabados), 0,65 (para rehabilitación total de instalaciones y acabados) o hasta 1,10 para una rehabilitación total ([CIEC 2012](#); [CAM 2013](#)).

Al implementar de este modo la ecuación de riesgo y la distribución de tipos de vulnerabilidad se deslocaliza la eventualidad concreta, distribuyendo los resultados de un modo estadístico sobre el territorio, por lo que su resultado se debe generalizar a códigos postales o términos municipales, no siendo válidos los resultados intermedios para otro objeto diferente a su generalización final.

Para los casos donde sólo existen una o dos clases de intensidades, se ha optado por comenzar directamente la indización como dos clases, lo que exige un paso intermedio por una matriz binaria que elimine del cómputo intensidades para las que no son esperables daños a determinados grupos de vulnerabilidad.

Para la evaluación de la capacidad predictiva del modelo, se han ensayado las diferentes asignaciones de clases de vulnerabilidad según [González et al. \(2001\)](#), [DGPCE \(2002\)](#), [Región de Murcia \(2006\)](#), y [Cabañas Rodríguez, et al. \(2011\)](#). Se ha comprobado que utilizando las matrices de asignación de clases progresivas (Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33), se produce una sobreestimación por más de tres veces en el cálculo del riesgo que si la asignación de clases se hace corresponder a la Tabla 30 ([Cabañas Rodríguez, et al., 2011](#)). Esto se debe a que la asignación progresiva de clases penaliza las parcelas de gran tamaño en las que se han agrupado centenares de inmuebles de igual año y tipología constructiva. Por este motivo se han asignado clases conforme a [Cabañas Rodríguez, et al. \(2011\)](#).

Siguiendo este método, se observa que la mayor parte del valor económico reside en tipologías constructivas asignadas al grupo C y D, quedando las tipologías A

y B relegadas a un plano muy inferior con porcentajes por debajo del 20% (Figura 132 y Figura 133) y por tanto el riesgo sísmico estimado recae mayoritariamente en las pérdidas asociadas a la tipología C. Como se pone de relieve de la Figura 134 a la Figura 140 (figuras de mapas de riesgo sísmico), los municipios más afectados serían Las Palmas de Gran Canaria (con unos 100 mil millones de euros), seguida de Adeje (330 mil millones de euros). No obstante, a diferencia del caso del riesgo por inundaciones, la interpretación de las cuantías aquí expresadas sí se debe considerar como el sumatorio de cada entidad. Esta cantidad asciende a **353,37 millones de euros** en costes de reconstrucción por daño directo a edificios. No se ha considerado daño a contenido.

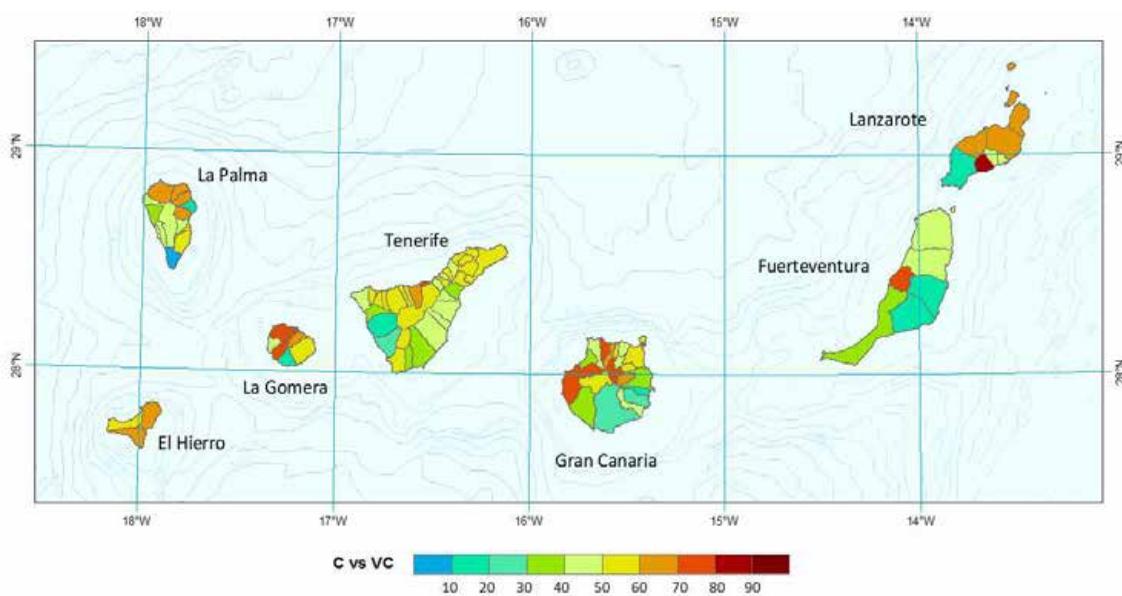


Figura 132. Porcentaje de valor en tipología constructiva C respecto al valor total del municipio.

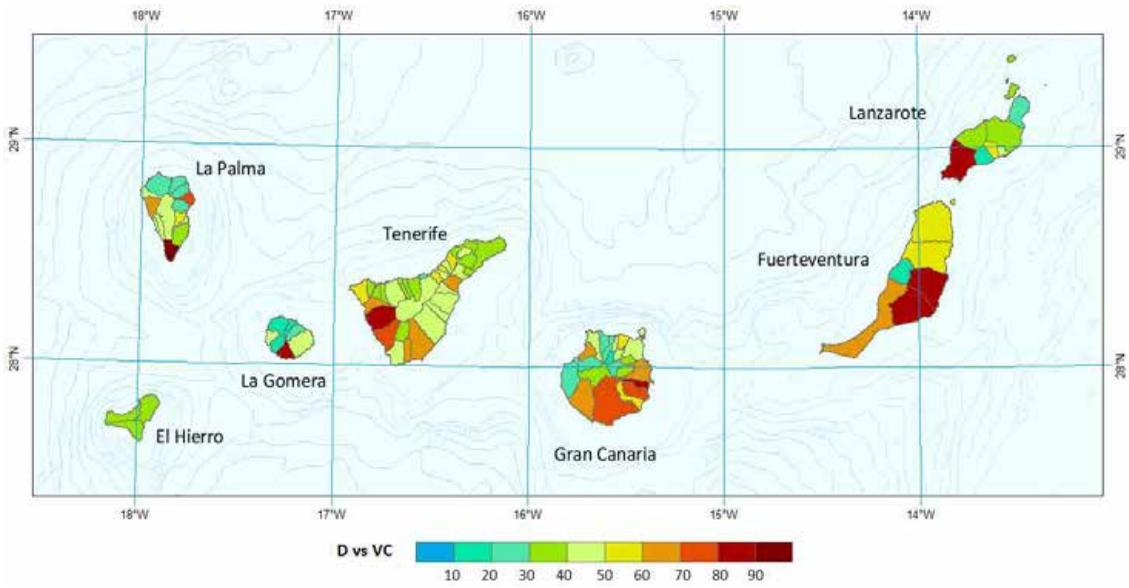


Figura 133. Porcentaje de valor en tipología constructiva D respecto al valor total del municipio.

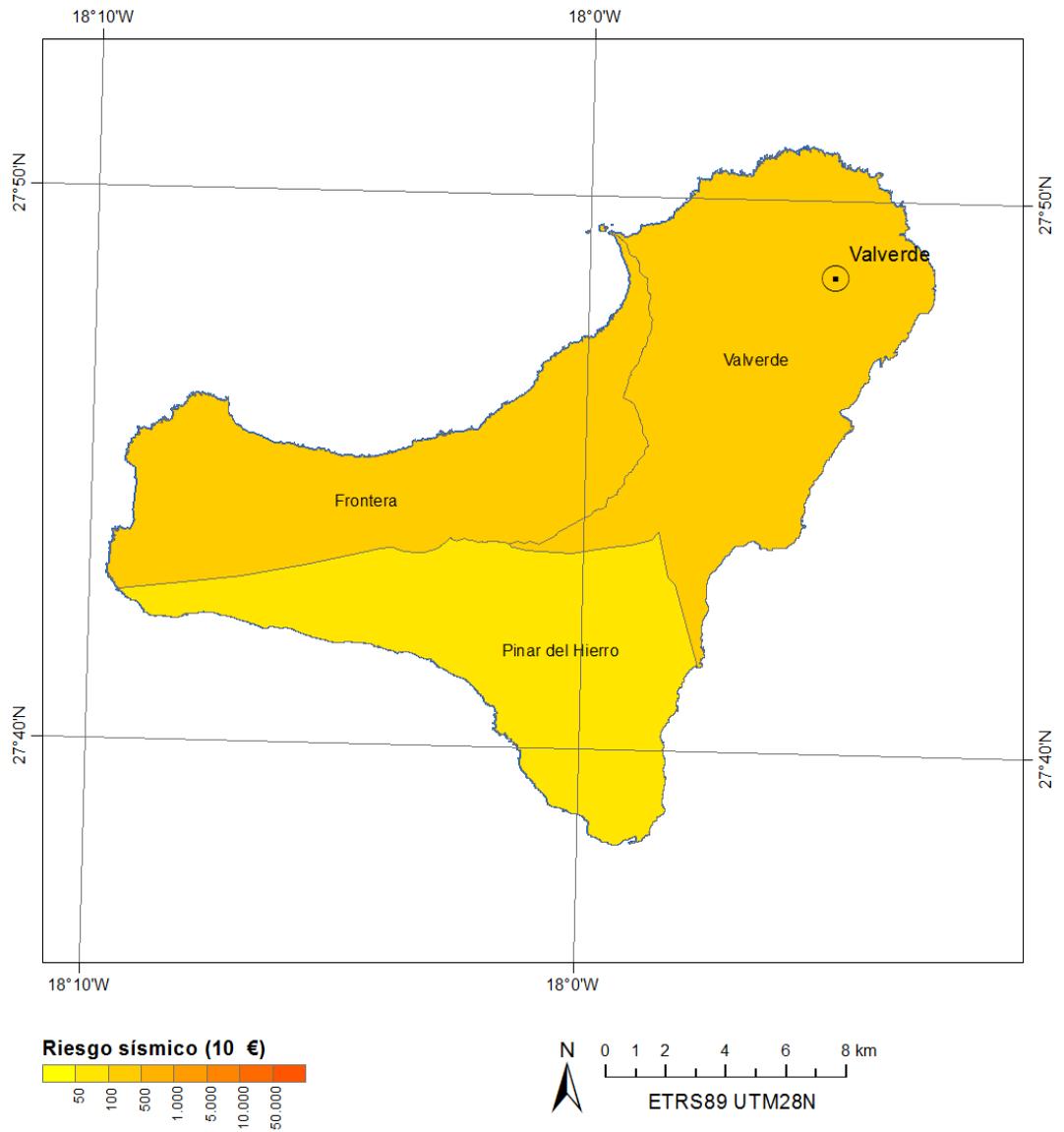


Figura 134. Riesgo sísmico para la isla de El Hierro.

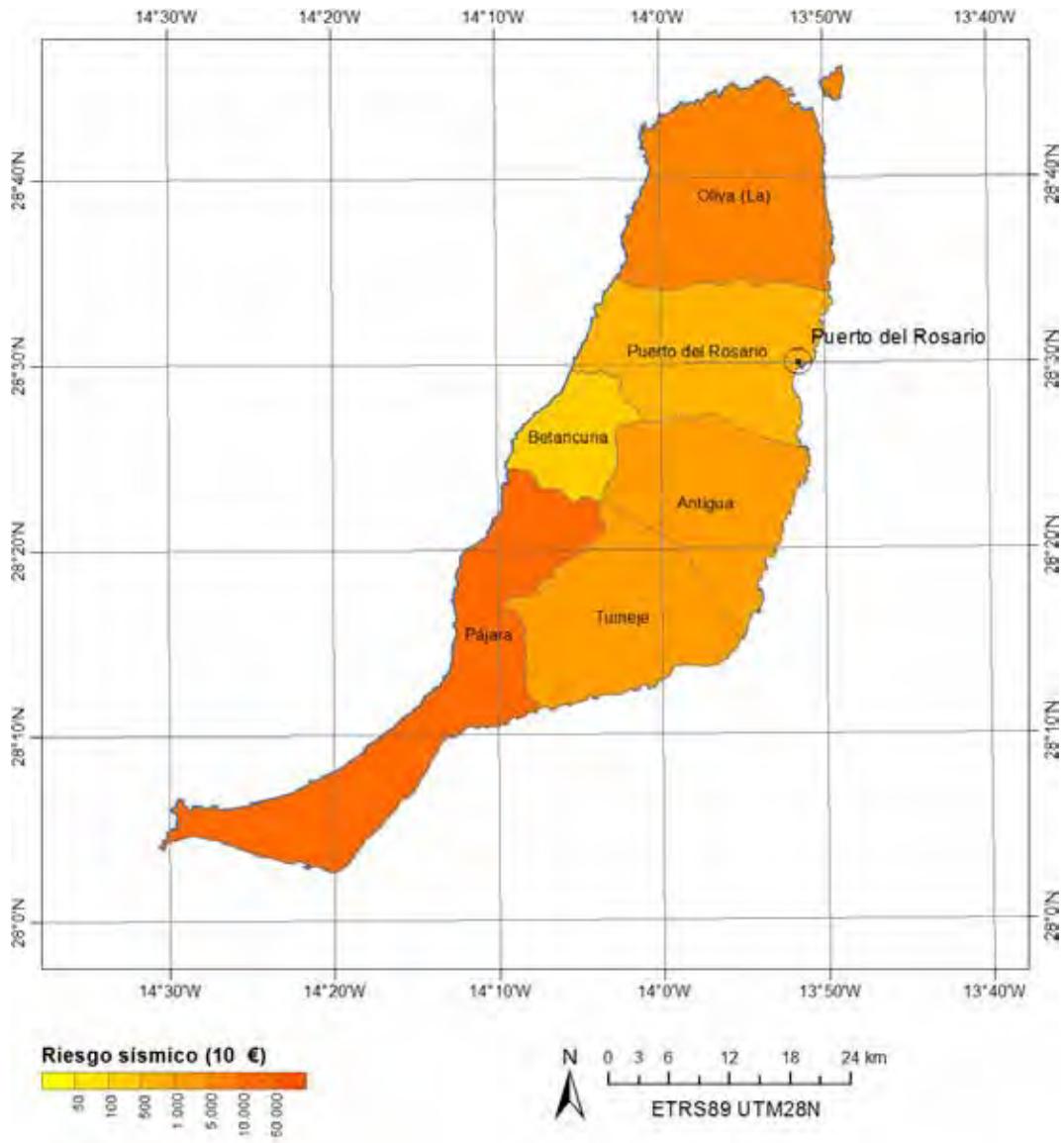


Figura 135. Riesgo sísmico para la isla de Fuerteventura.

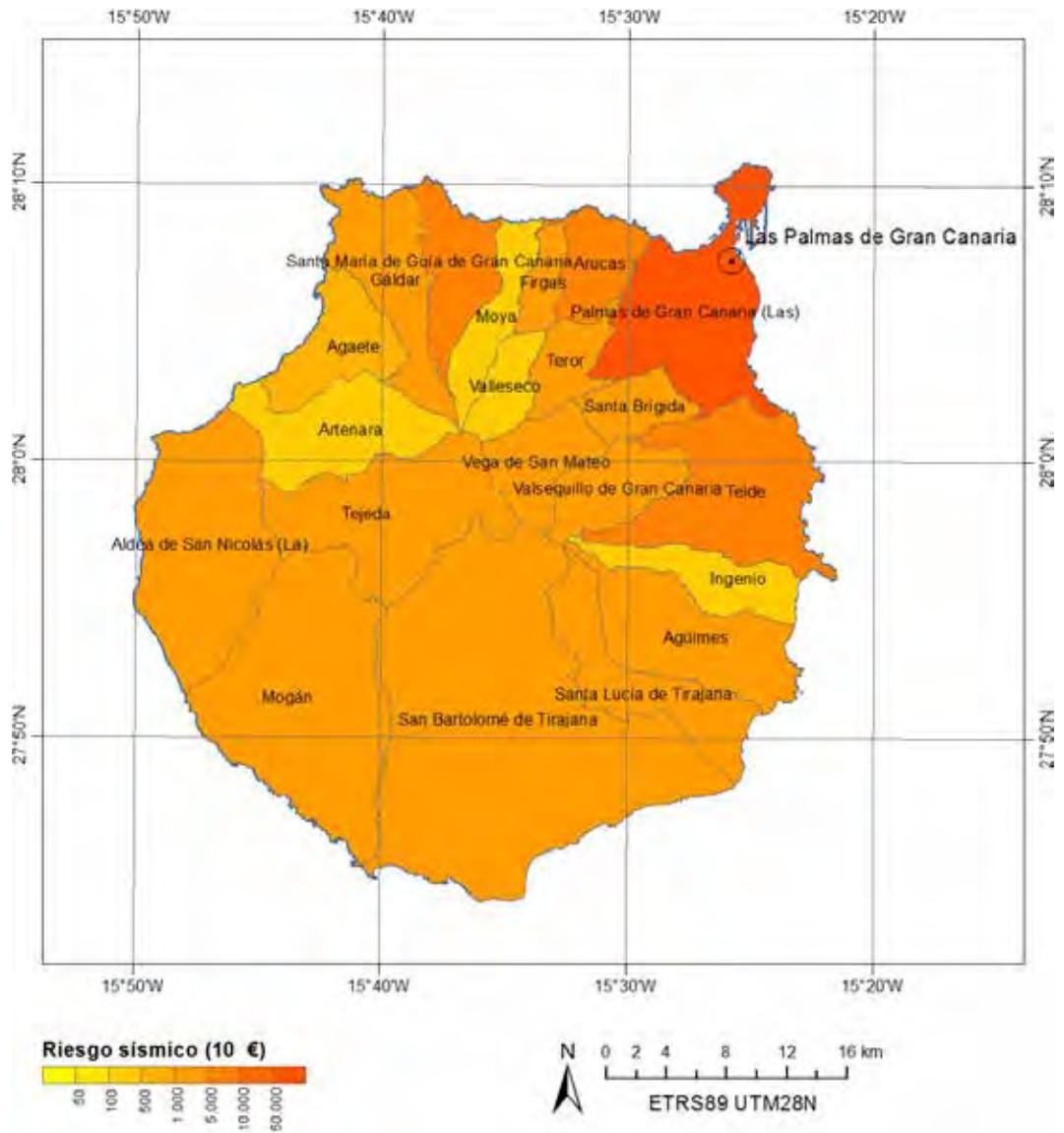


Figura 136. Riesgo sísmico para la isla de Gran Canaria.

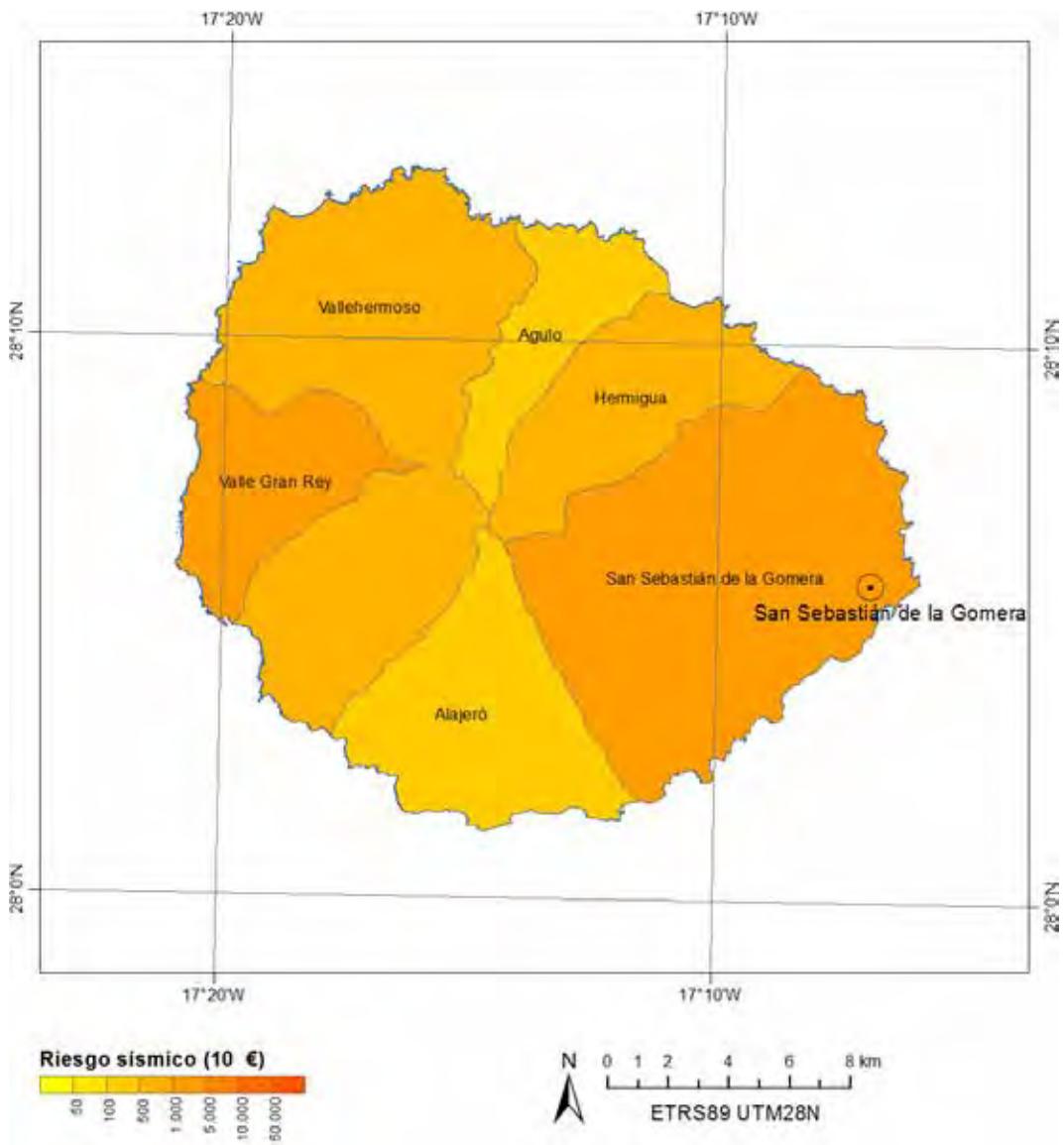


Figura 137. Riesgo sísmico para la isla de La Gomera.

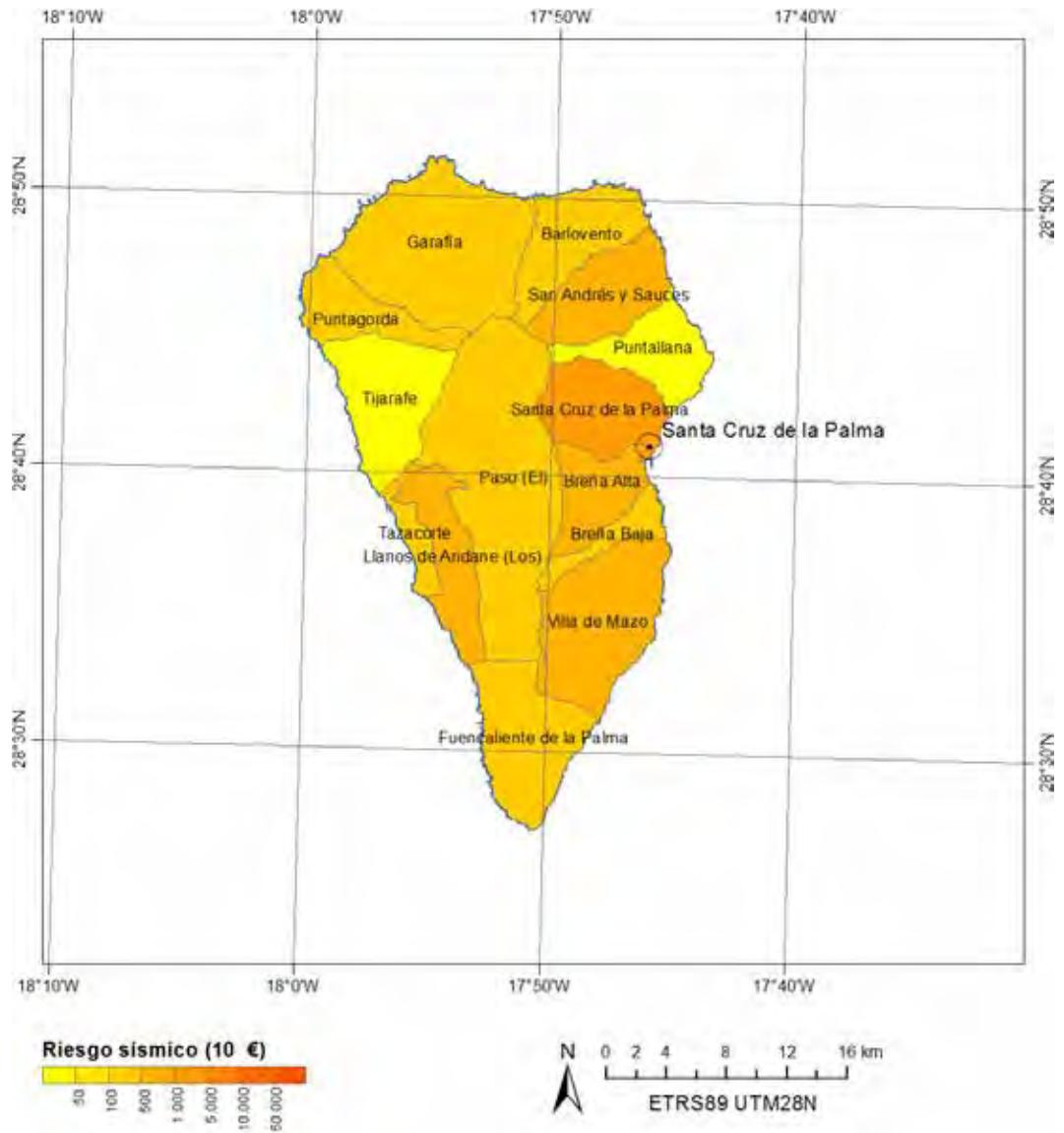


Figura 138. Riesgo sísmico para la isla de La Palma.

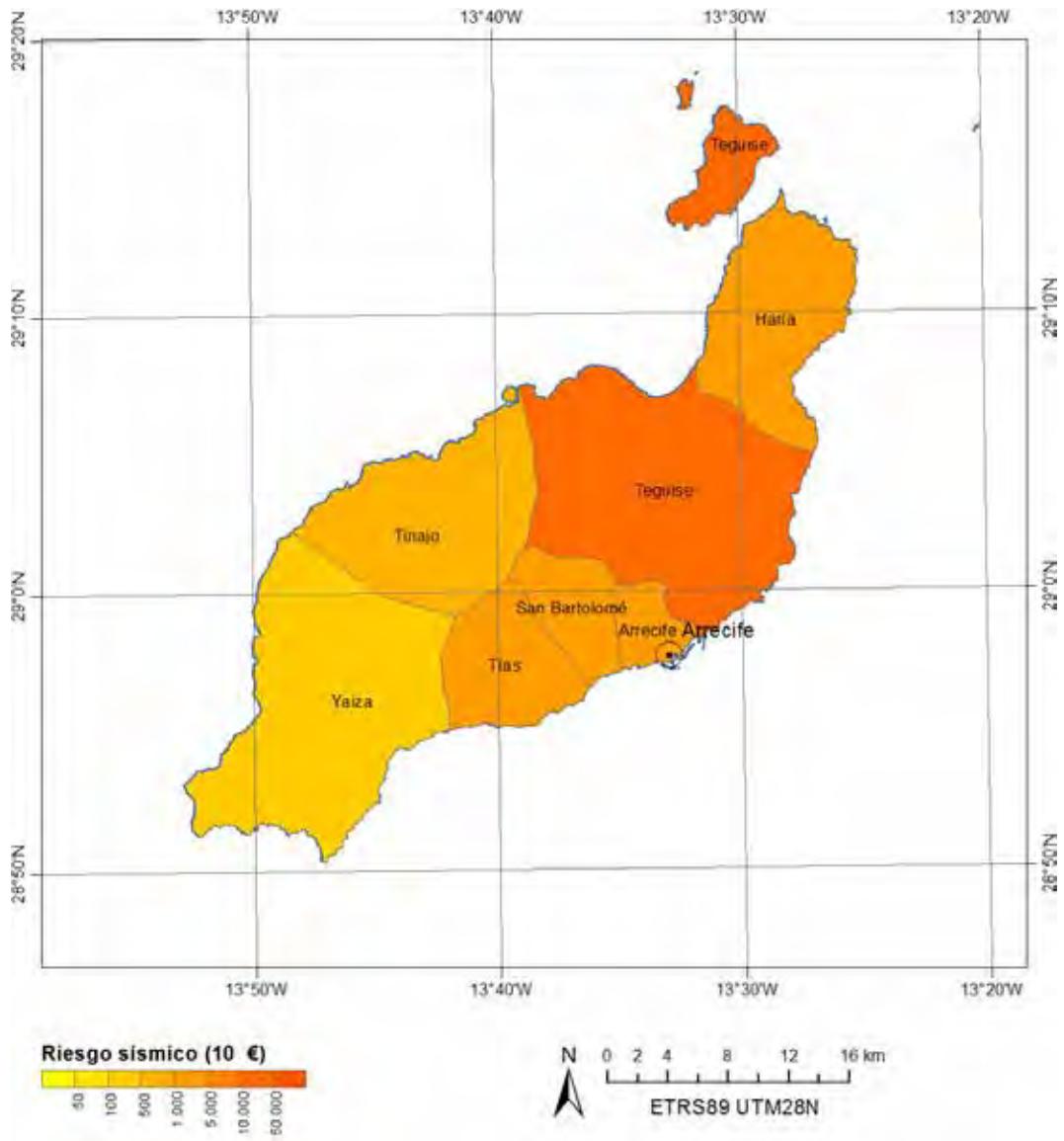


Figura 139. Riesgo sísmico para la isla de Lanzarote.

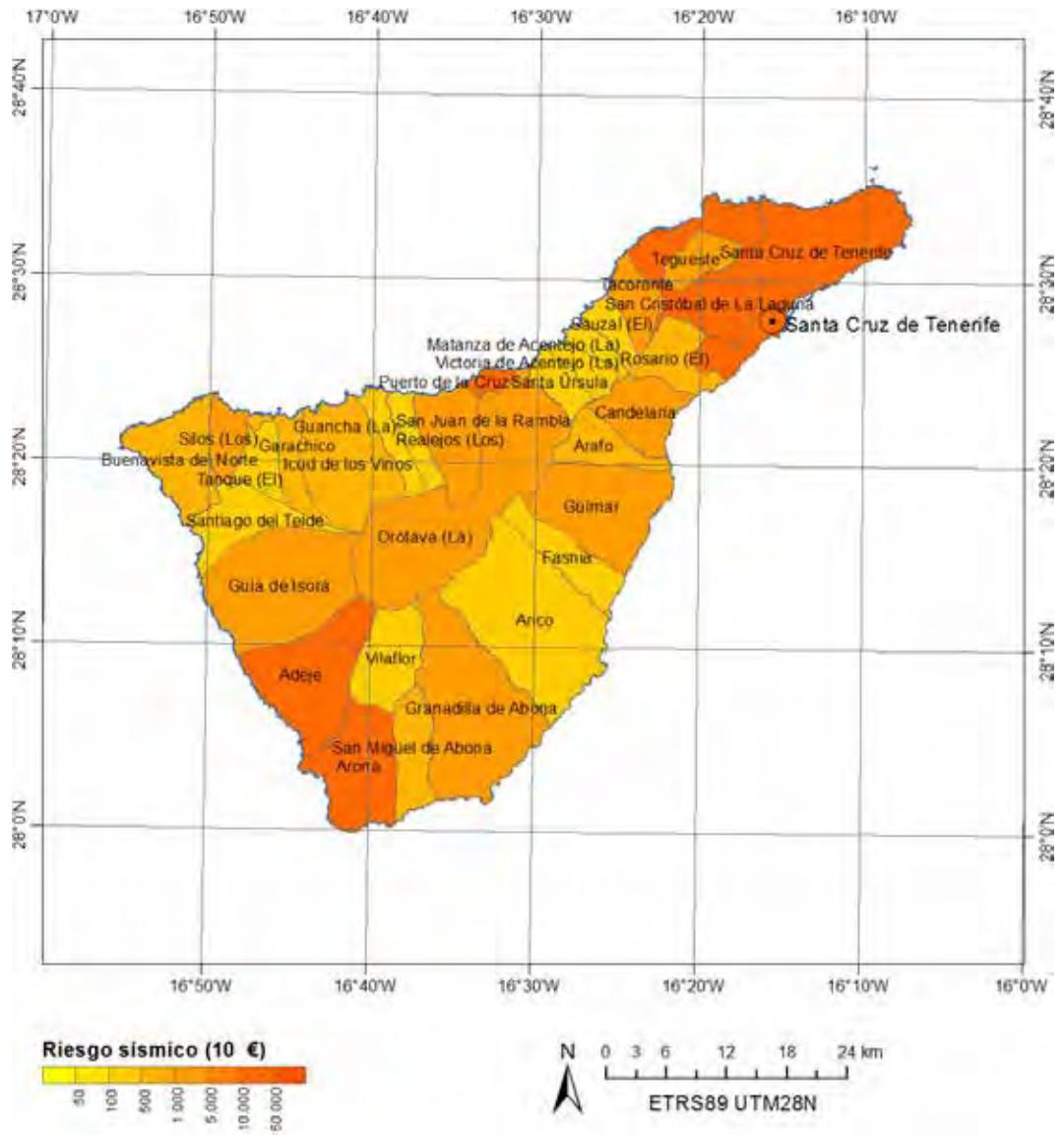


Figura 140. Riesgo sísmico para la isla de Tenerife.

### 8.3. Riesgo volcánico

Para el caso del riesgo volcánico no se ha aplicado el coeficiente de reconstrucción o rehabilitación, pues se considera que el daño es íntegro y el coste es el equivalente al valor catastral y su contenido. **El peor escenario de los considerados es el C526-20, con 5.504,43 millones de euros en pérdida de contenido y continente (Tabla 44), seguido por el escenario C525-19 con 3.612,02 millones de euros.** En cuanto a municipios, el peor escenario recae sobre Los Realejos, seguido de Puerto de la Cruz (escenario c526-20). Los mapas correspondientes a los primeros 11 escenarios de la Tabla 44 se pueden observar desde la Figura 141 hasta la Figura 151.

Tabla 44. Capital en riesgo en parcelas construidas por escenario volcánico.

Escenario	N. parcelas	VC2014 x10 <sup>6</sup> €	VC+30% * 10 <sup>6</sup> €	parte asegurada 10 <sup>6</sup> €
c526_20	12.052	6.127,60	7.965,88	<b>5.504,43</b>
c525_19	11.215	4.020,96	5.227,24	<b>3.612,02</b>
c520_17	7.501	1.395,88	1.814,65	1.253,92
c555_25	4.896	873,34	1.135,34	784,52
c829_1	838	581,74	756,26	522,58
c394_1	1.330	562,61	731,39	505,39
c395_3	665	452,90	588,77	406,84
c262_4	1.467	357,41	464,64	321,06
c930_3	294	211,10	274,43	189,63
c295_4b	769	91,93	119,51	82,58
c484_2	50	4,70	6,11	4,22
c494_2	2	0,04	0,05	0,04
c493_8	0	0	0,00	0,00
c493_7	0	0	0,00	0,00

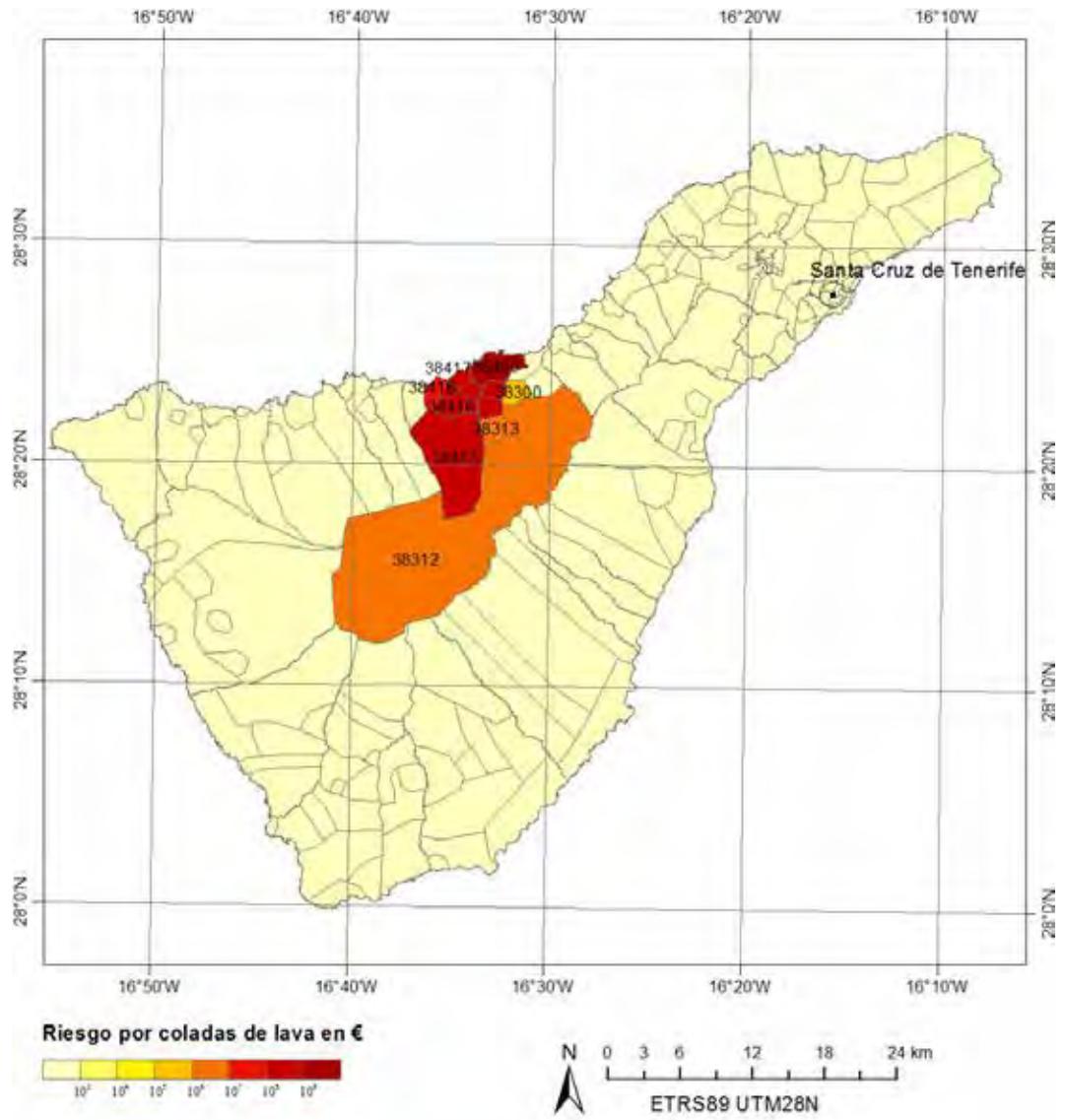


Figura 141. Escenario 526\_20.

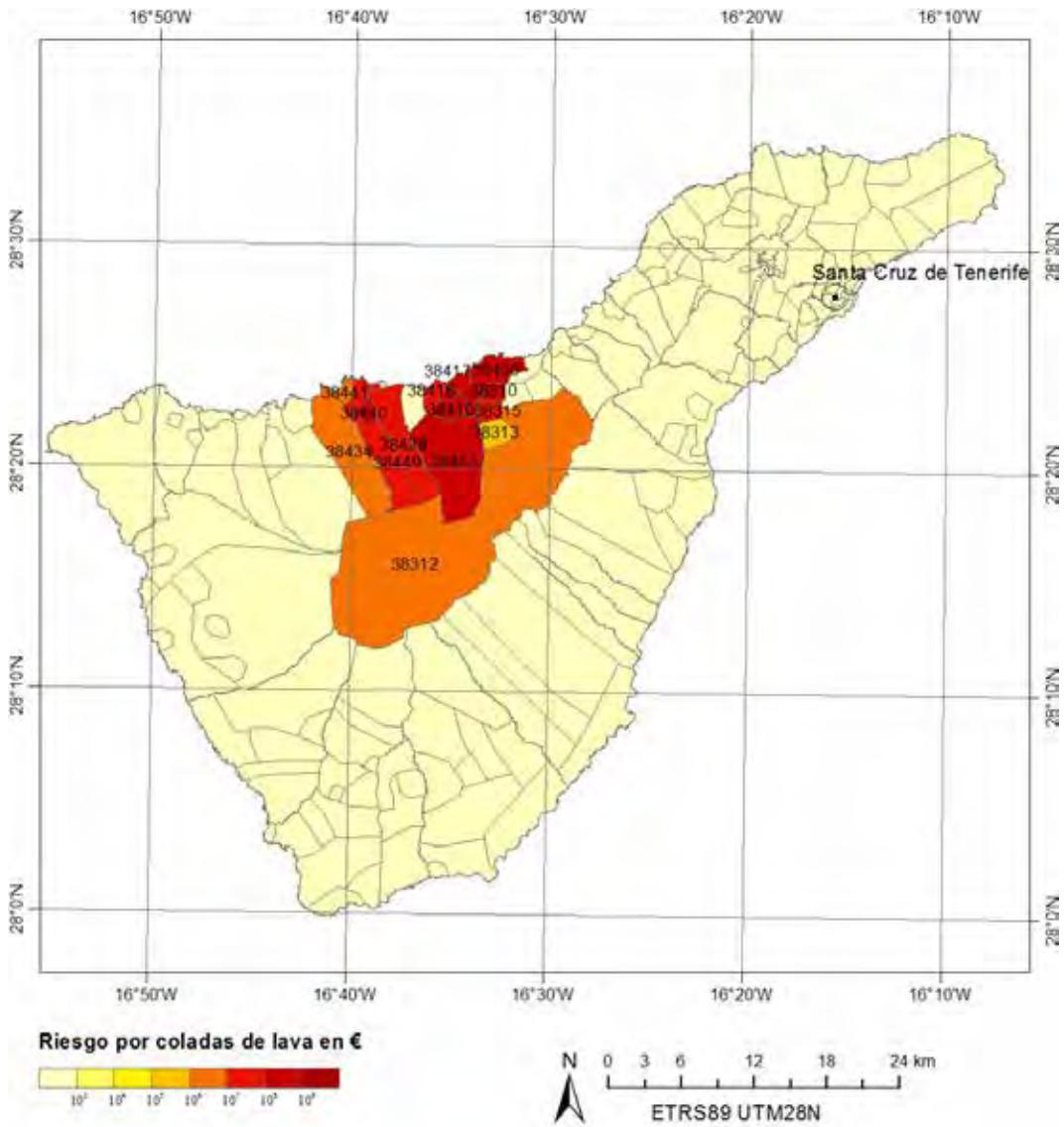


Figura 142. Escenario 525\_19.

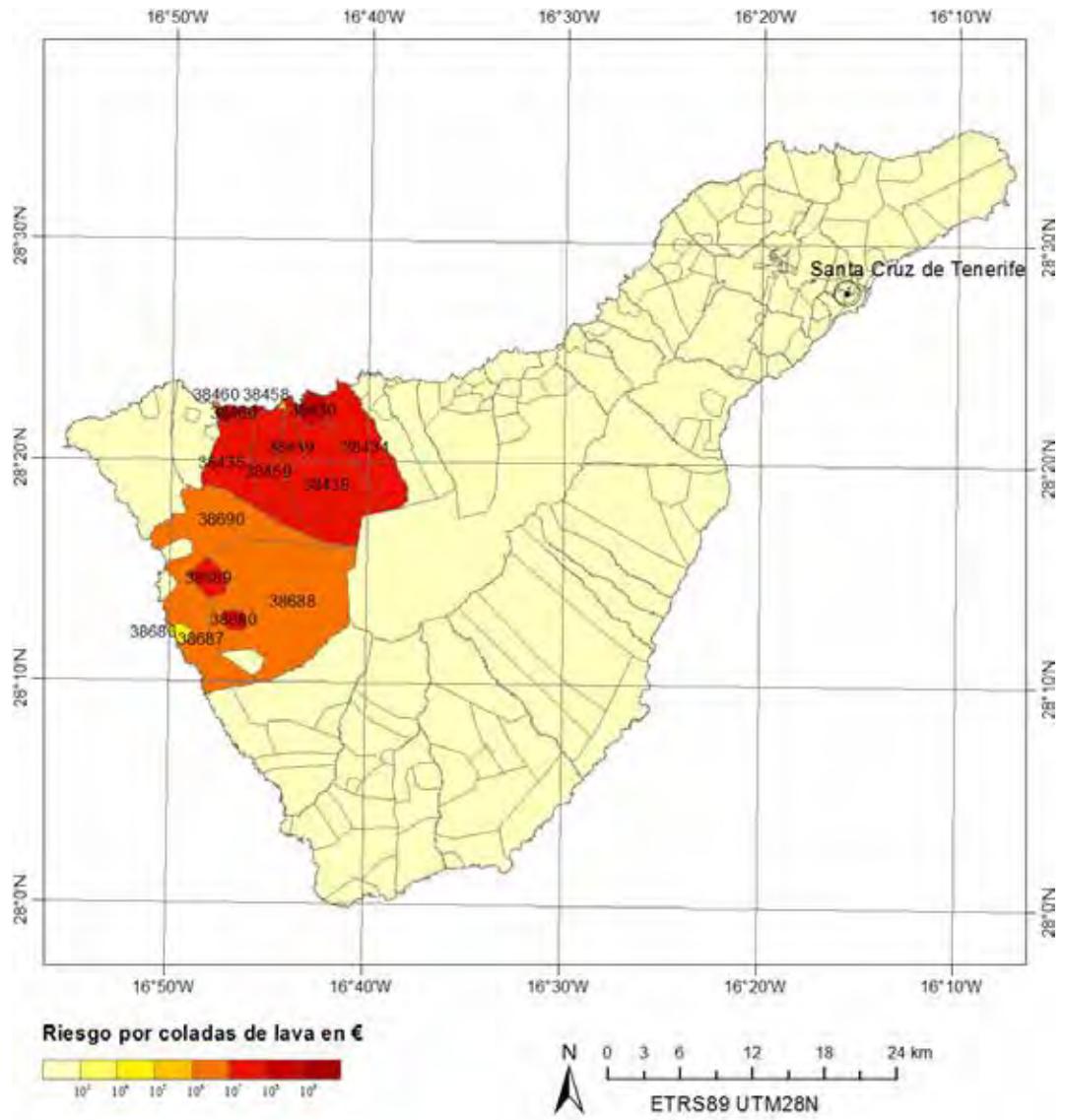


Figura 143. Escenario 520\_17.

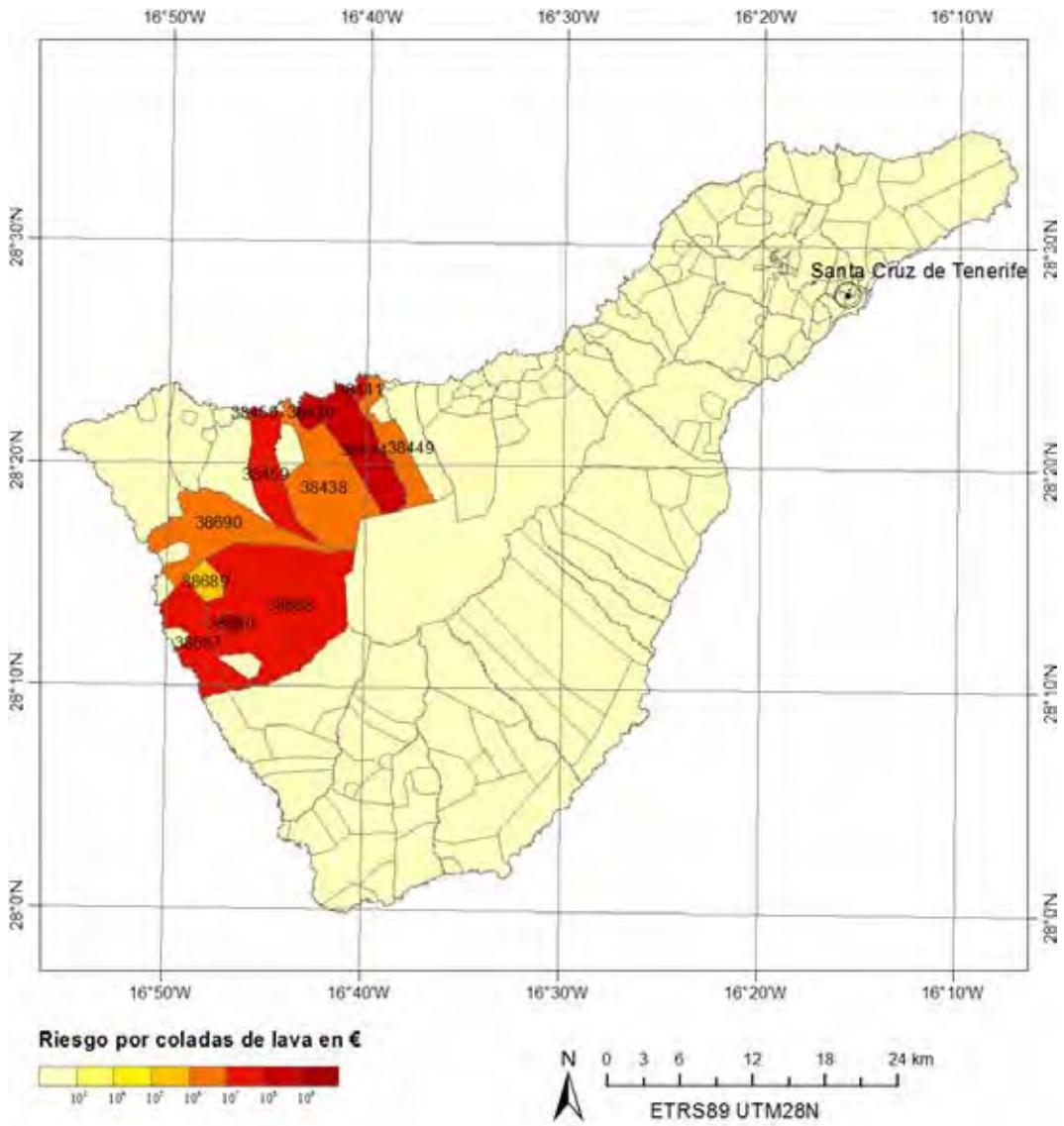


Figura 144. Escenario 555\_25.

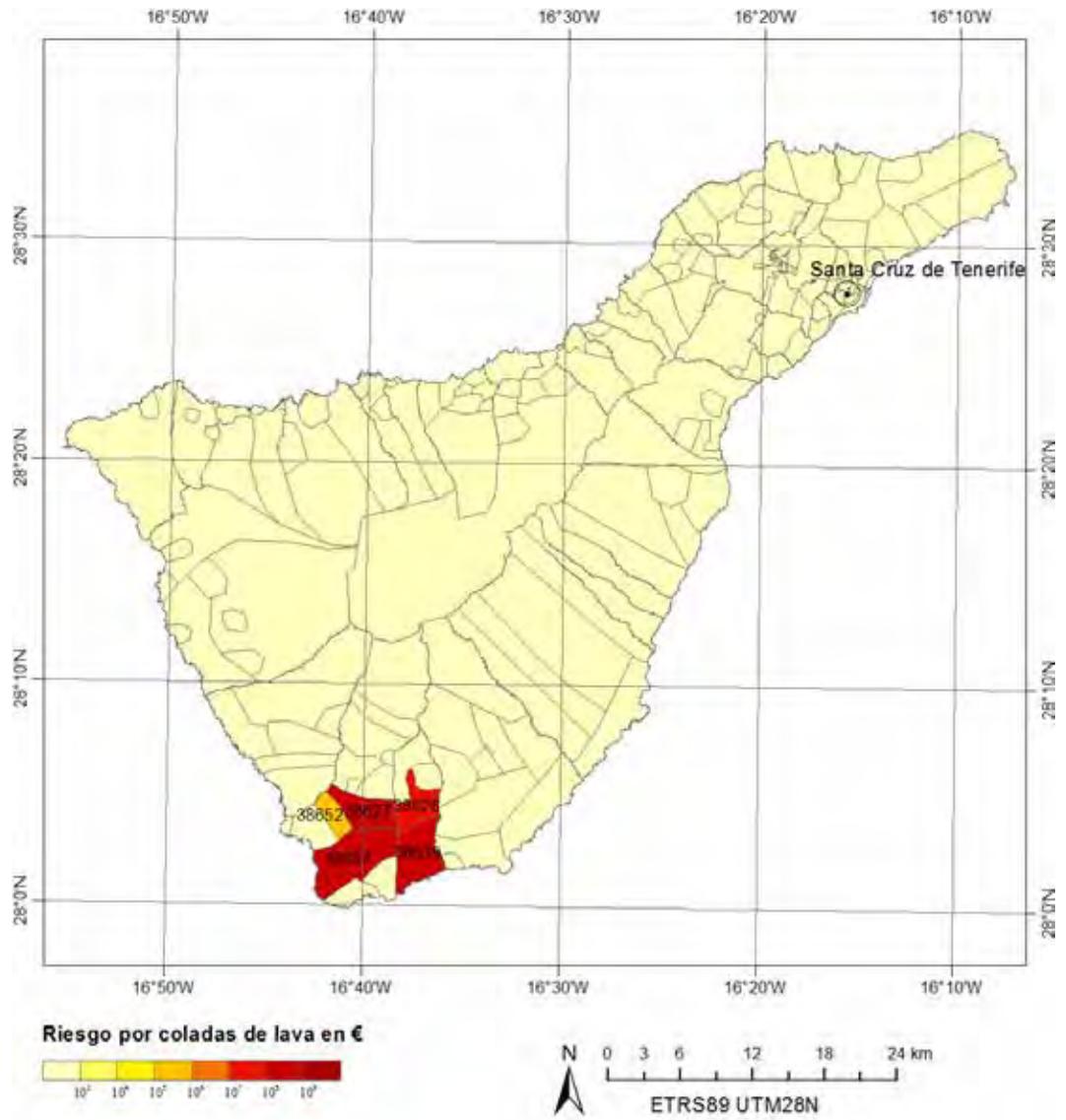


Figura 145. Escenario 829\_1.

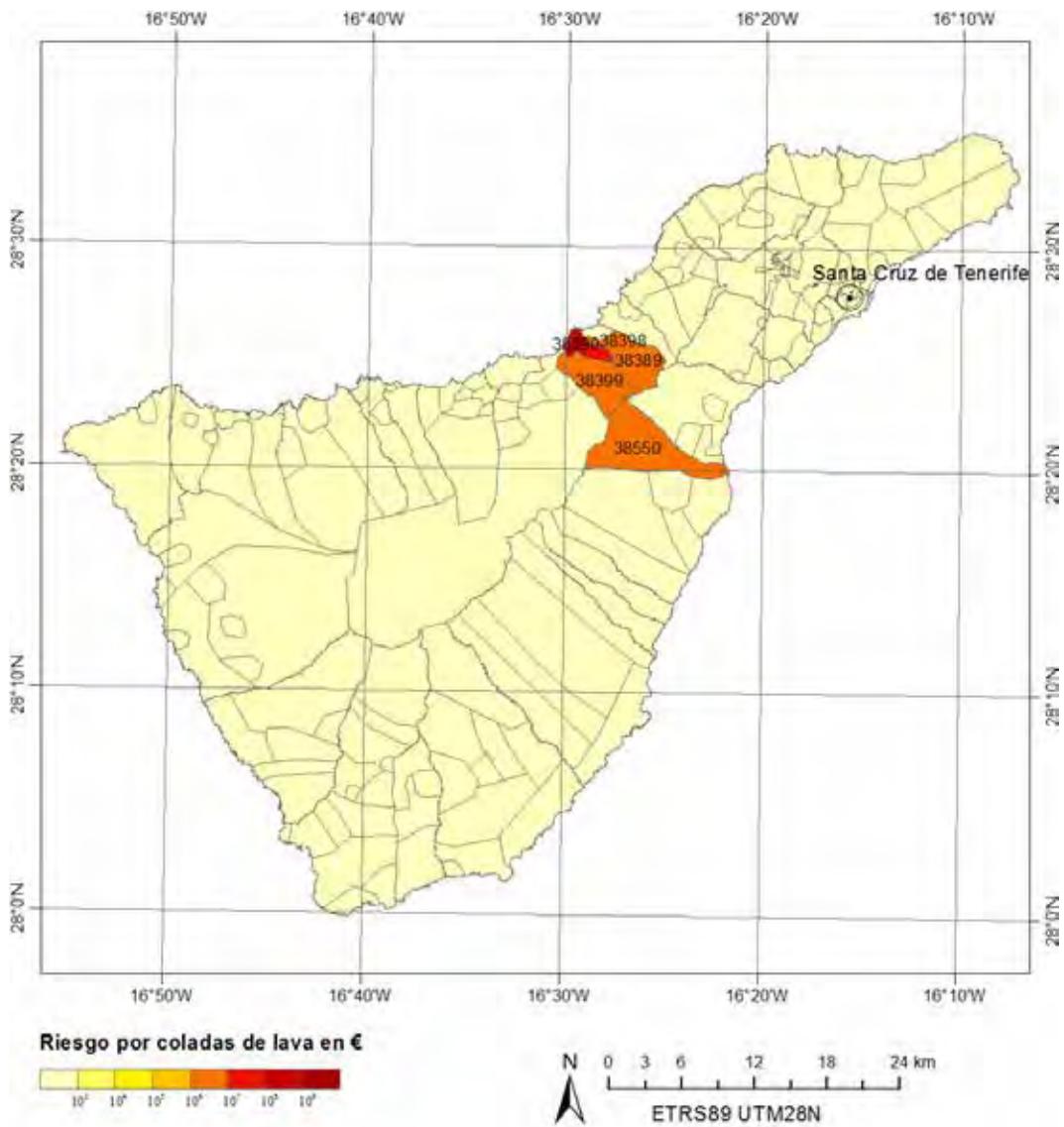


Figura 146. Escenario 394\_1.

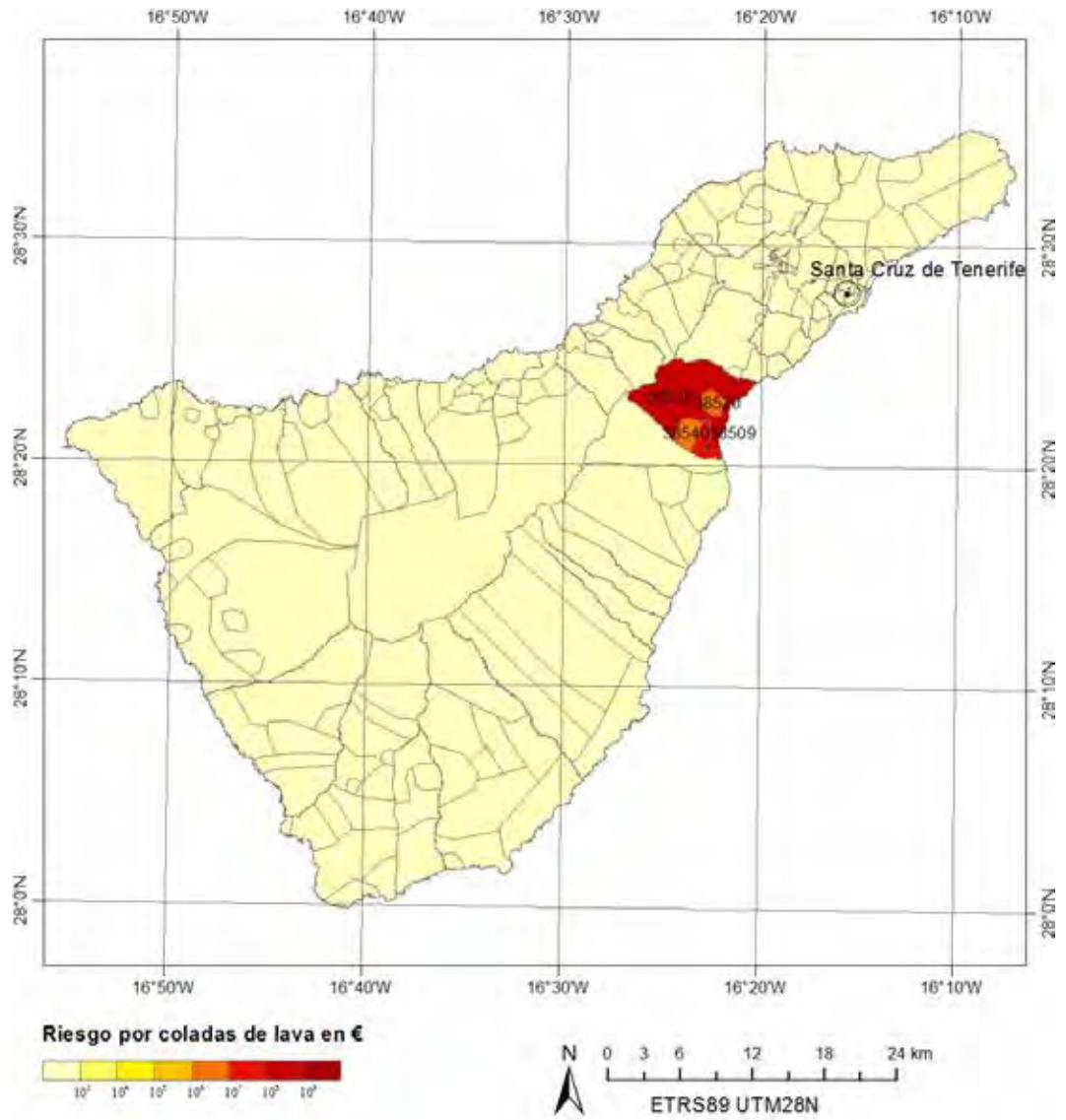


Figura 147. Escenario 395\_3.

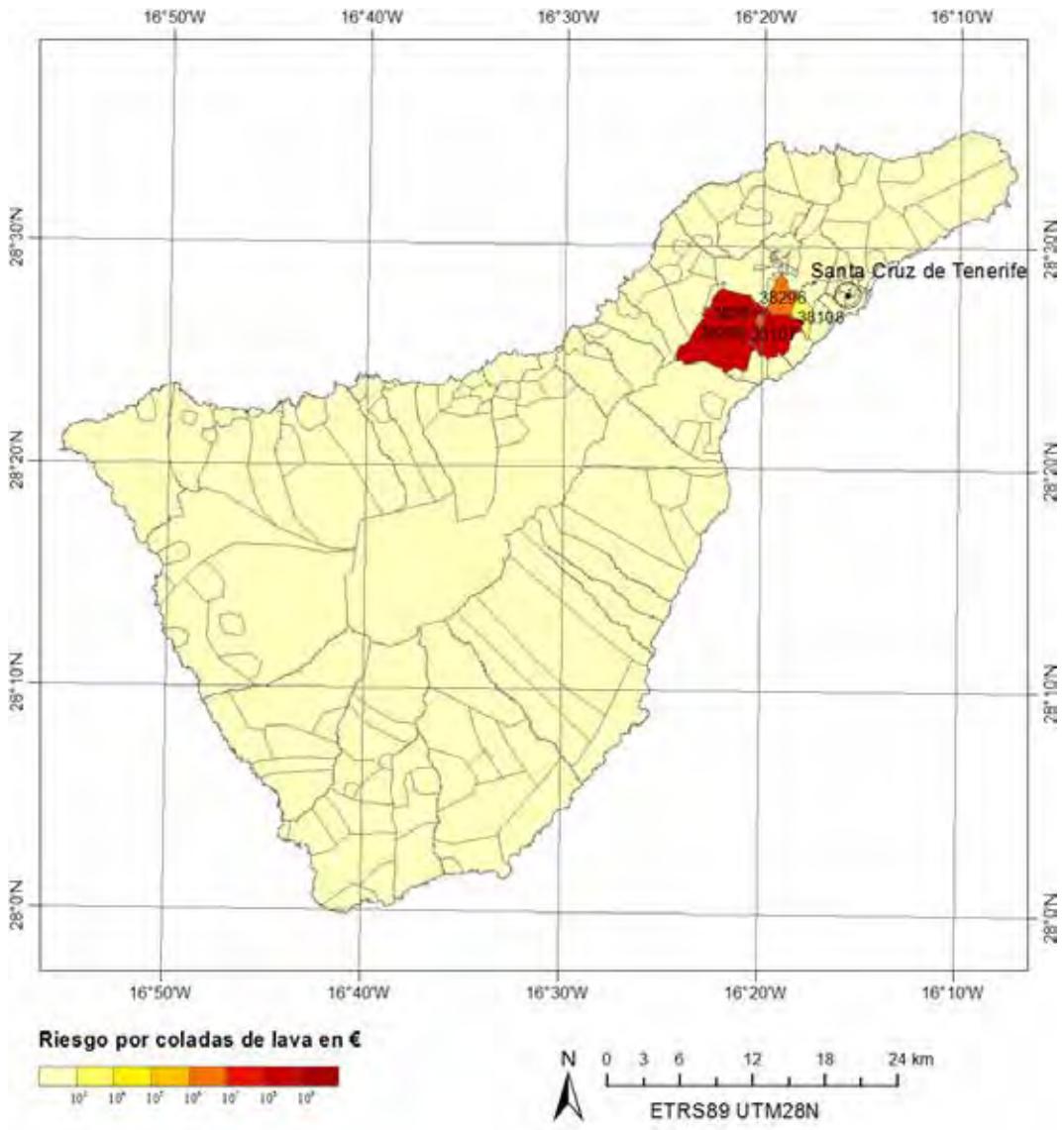


Figura 148. Escenario 262\_4.

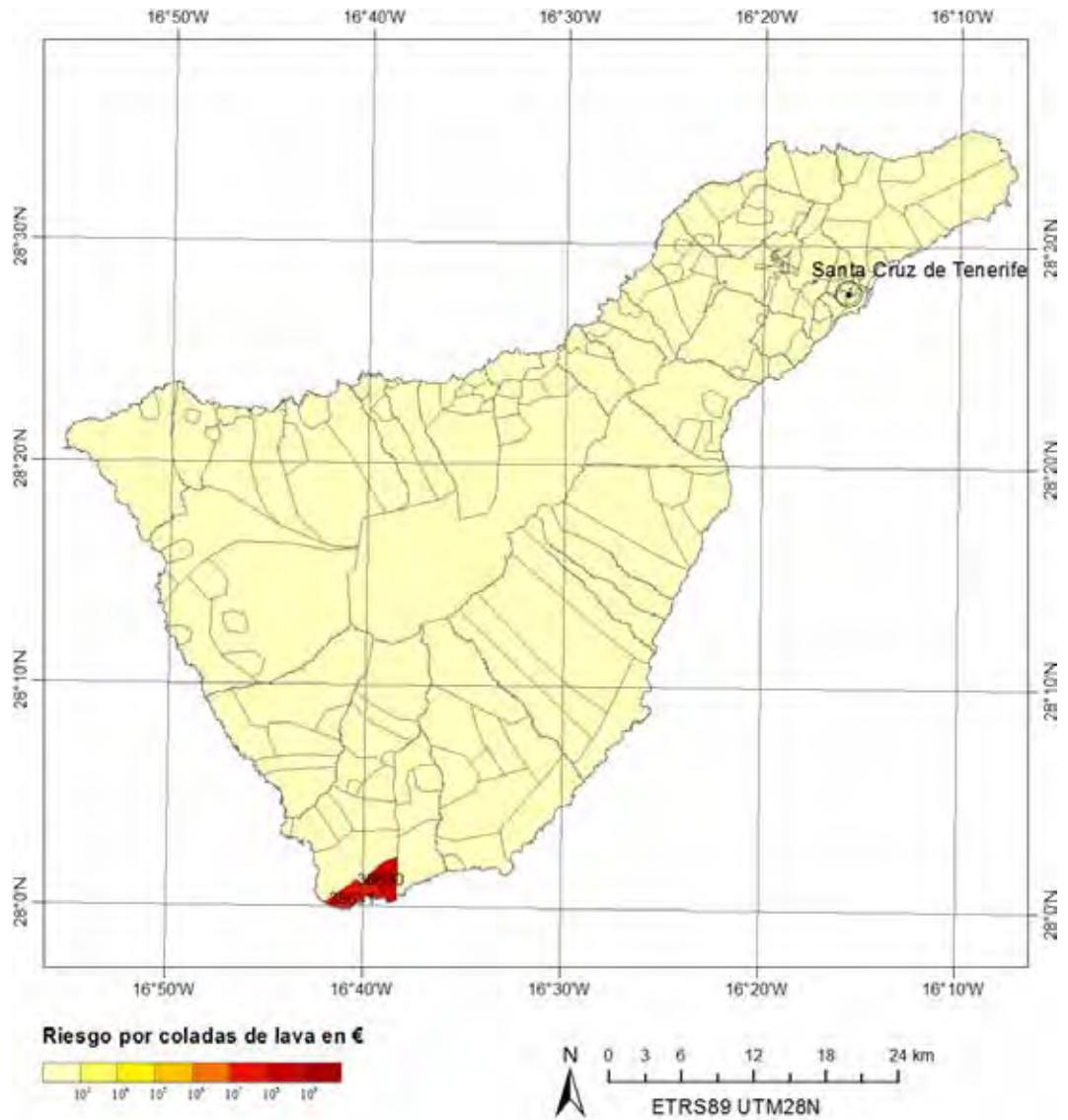


Figura 149. Escenario 930\_3.

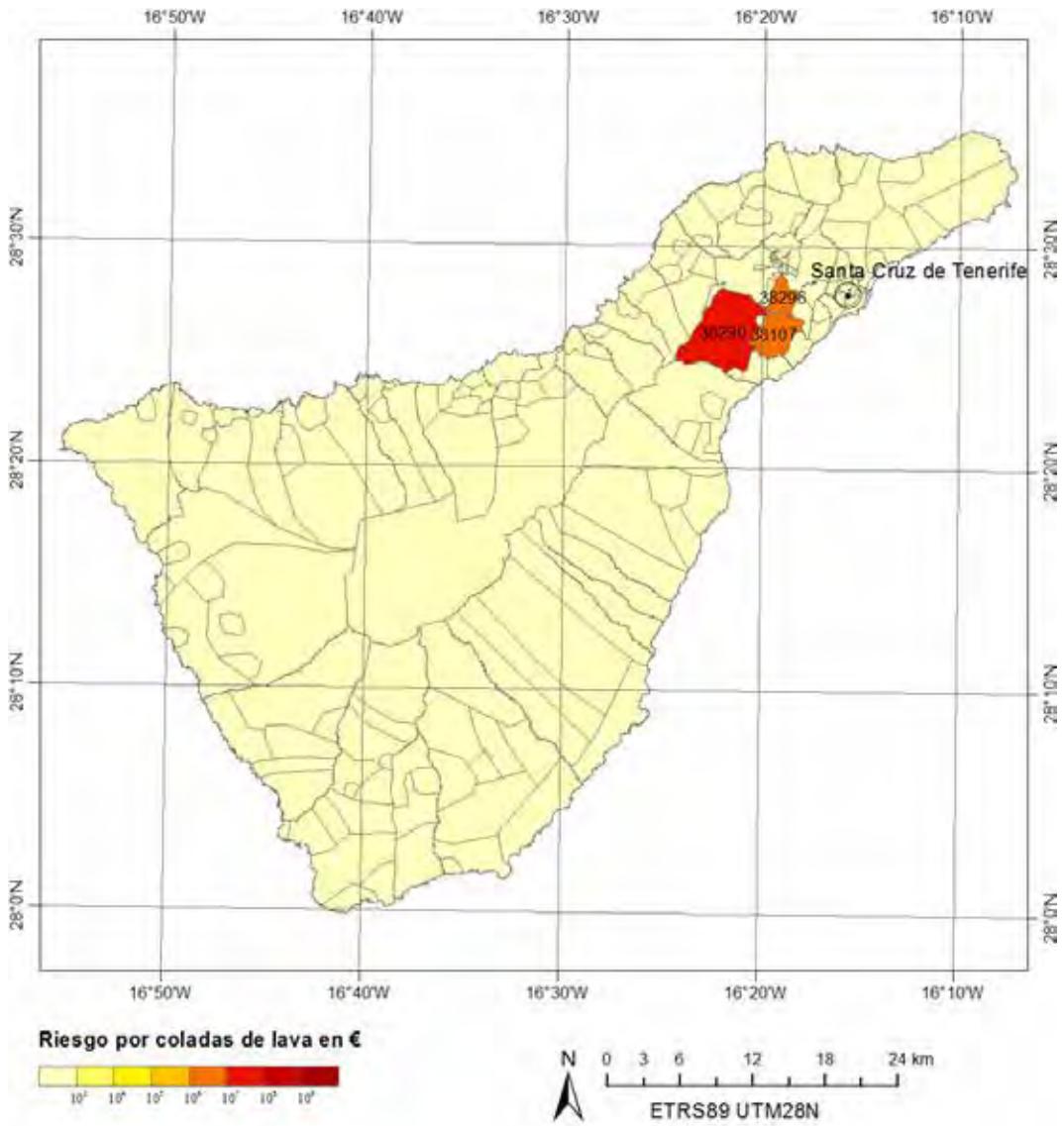


Figura 150. Escenario 295\_4b.

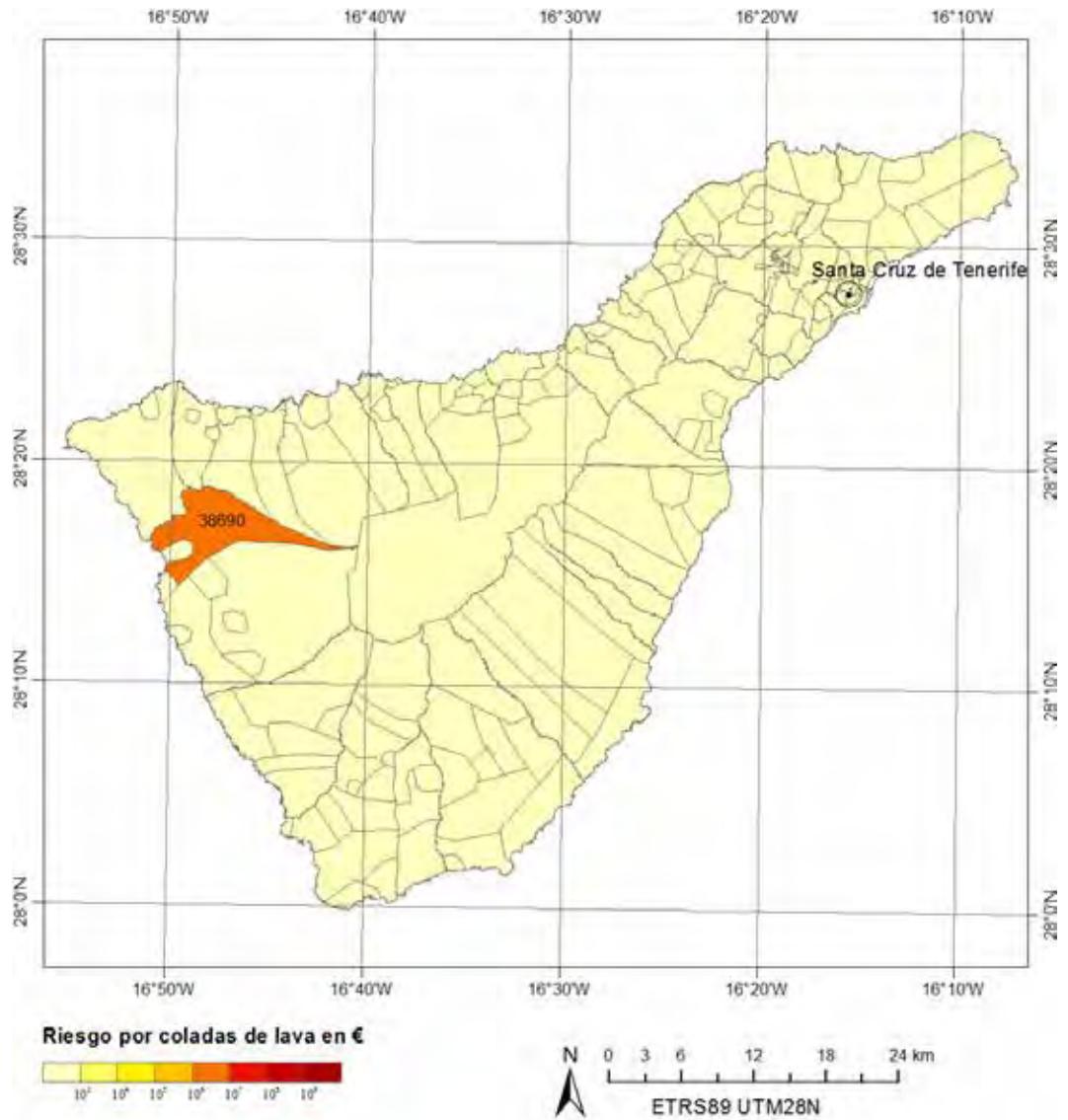


Figura 151. Escenario 484\_2.



## 9. Conclusiones

Este trabajo culmina con un importante resultado: un conjunto de cifras que aportan un horizonte económico a considerar, como referencia de planificación, para el caso de un evento extraordinario de inundación, sismicidad o volcanismo, si uno cualquiera de ellos ocurriera próximamente en las Islas Canarias.

De los tres peligros considerados, el volcánico es sin duda el que mayor impacto económico podría llegar a generar en un único evento. Con una probabilidad igual o menor al 0,2% anual, el capital asegurado en daños por coladas de lava podría ser de unos **5.500 millones de euros**. Otros 2.500 millones de euros de pérdidas adicionales no estarían cubiertos por un seguro. Un evento de precipitación torrencial de similar probabilidad, podría dar lugar a inundaciones que ocasionaran unos **620 millones de euros** de daños asegurados y casi otros 200 no asegurados. En el caso de la sismicidad, la cifra podría superar los **350 millones de euros** asegurados y más de 100 millones adicionales no asegurados. Cabe mencionar aquí, que estas cifras no pueden sumarse en caso de que quisiera evaluarse la concurrencia de varios tipos de procesos; en primer lugar porque al tratarse de procesos independientes, la probabilidad conjunta resultaría muy baja, y en segundo lugar porque el orden con que tendrían lugar los eventos alteraría el resultado, por no mencionar que la complejidad en la interacción de procesos supera con creces cualquier capacidad actual de modelización.

En los tres casos estudiados en este trabajo, no están contemplados los daños derivados de otros procesos propios del volcanismo, de las inundaciones y de la sismicidad; por ejemplo, no se tienen en cuenta las emisiones de gases tóxicos o peligrosos, la erosión, o los deslizamientos. El alcance de los procesos completos aún se desconoce, pero en todo caso, representarían un daño adicional.

Llegar a estas cifras ha supuesto trabajar, gestionar y minimizar incontables fuentes de incertidumbre y tener en cuenta una cantidad de datos nada despreciable. En este sentido, ha sido crucial despojar al planteamiento de toda intención predictiva para centrarse en relaciones causales simples, permitiendo así obtener un resultado óptimo desde un punto de vista de planificación, apoyado en un instrumento numérico sólido.

Como ya se avanzaba en el apartado 2. *Marco conceptual y definiciones* y se corroboraba en el apartado 4.5. *Análisis histórico* de inundaciones, el comportamiento del desastre está sujeto a coyunturas y contingencias puntuales

que pueden modificar de manera significativa los resultados, sin mencionar el abanico completo de procesos que acompañan a los detonantes estudiados. Tanto así, que desde un punto de vista retrospectivo parece perderse toda correlación entre probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural y el alcance de sus consecuencias. Este no-vínculo entre el desastre y el riesgo se afianza con la implementación paulatina de estrategias de reducción del riesgo. A medida que se han ido conociendo mejor los procesos naturales, la tendencia ha sido modificar algunos aspectos del propio proceso y con ello evitar las consecuencias que pudieran ser previsibles en una relación causal simple; algo que no siempre se ha implementado con éxito y que a largo plazo no siempre ha resultado conveniente. Con los avances en el conocimiento del medio, la tendencia se va viendo fortalecida hacia convivir con los procesos naturales, a ser más resilientes y menos vulnerables frente a ellos, algo a lo que contribuyen trabajos como el presente.

Este trabajo cumple la función de identificar en una cifra una consecuencia previsible, y debería servir para despertar conciencias respecto a la importancia de conocer mejor el ambiente en que habitamos y de mejorar nuestra actitud para reducir los riesgos. En ese sentido, incrementar el porcentaje de bienes asegurados es sin duda una estrategia de reducción de desastres en la que aún queda un amplio margen de actuación. Por otro lado, es necesario continuar desarrollando estudios que permitan conocer mejor los procesos que son capaces de interferir con la vida cotidiana e incrementar la cantidad y calidad de las bases de datos con las que se sustentan este tipo de estudios, incluyendo fuentes de datos instrumentales y no instrumentales.

Otro importante resultado de este trabajo es que se ha establecido un mecanismo, protocolo o modelo de análisis que puede ser aplicado a cualquier parte del territorio nacional. No se trata sólo de los algoritmos y de los procedimientos, sino también del marco conceptual que permite que los resultados sean comparables, con objetivos definidos con tanta claridad como las limitaciones en cuanto a su alcance o implementación, lo que representa un verdadero hito en la estimación de pérdidas probables por peligros geológicos.

En los apartados siguientes se añaden algunas reflexiones adicionales organizadas por temática de trabajo que se ha considerado oportuno destacar.

## 9.1. Exposición

Este trabajo muestra que las BBDD del Catastro son utilizables y explotables con la tecnología actual y se deberían tener en consideración en estudios similares siempre que se quiera hacer una aproximación a un valor lo más homogéneo e imparcial posible del riesgo. Del estudio de las BBDD del catastro se han podido obtener parámetros fundamentales para el cálculo de diferentes componentes del riesgo (edad de los edificios, usos de las parcelas, número de plantas) y, al mismo tiempo, se ha podido comprobar que representan una fuente de información tan relevante en los estudios de riesgo como puedan ser los propios modelos digitales de elevaciones. Del estudio de la exposición, también se ha podido verificar la estimación del porcentaje de bienes asegurados, garantizando la robustez del modelo al compararlo con resultados de otros estudios realizados.

## 9.2. Inundaciones

Los datos de pluviometría son un pilar fundamental en el análisis de inundabilidad, sin embargo, la densificación de los datos resulta crucial para poder abordar fenómenos de alta intensidad y muy localizados que pueden provocar situaciones complicadas. De hecho, la representatividad espacial de la muestra puede verse comprometida por este tipo de fenómenos aislados. En cuanto a los estudios de escorrentía, resultaría muy útil mejorar el conocimiento sobre las características del terreno especialmente en lo que se refiere al umbral de escorrentía. Es evidente que, para estudios de detalle, resulta imprescindible mejorar la evaluación de los parámetros hidráulicos, así como la utilización de métodos que permitan evaluar posibles avulsiones, divergencias de flujo y otros procesos en localizaciones singulares, y particularmente en las zonas de desembocadura. Incorporar información de carácter geológico permite detectar zonas de acumulación de material, que representan puntos de cambios importantes en el régimen hidráulico con significativas pérdidas de energía y por tanto zonas muy problemáticas para evaluar desde la perspectiva de agua limpia. La información geológica en su sentido más amplio, complementa pero no sustituye a la información obtenida por otros medios, y viceversa.

La BBDD de siniestros del Consorcio de Compensación de Seguros proporciona un valor doblemente añadido; de una parte permite identificar grupos de zonas conflictivas (geolocalización de los eventos) y por otra parte, permite a largo plazo un conocimiento realista del impacto que tienen las inundaciones en

relación con su probabilidad de ocurrencia. En este sentido, es fundamental inventariar elementos dañados y aportar no sólo la información de la indemnización, sino también la información del valor real de los elementos afectados. Y para que esta información sea explotable, es necesario que su geolocalización disponga, como mínimo, de la precisión que aporta hoy en día cualquier GPS de mano. Una colaboración más estrecha, si cabe, entre distintas administraciones, podría permitir además, que la BBDD de siniestros recabara información geológica, geomorfológica e histórica, como marcas de inundación para evaluar la altura de la lámina de agua, zonas problemáticas por su no vinculación a la red fluvial (mantos de arroyada), así como efectos inducidos (movimientos del terreno, sufusiones o tubificaciones, erosiones de márgenes, alteración en el trazado en planta de la red de drenaje, y otros). Una ventaja y desventaja que plantea la BBDD es que resulta difícil distinguir tipos de inundabilidad; la ventaja reside en que el estudio de inundabilidad se ve parcialmente completado con procesos tipo mantos de arrollada u otros; el inconveniente radica en que los muchos y distintos orígenes de las inundaciones deben ser estudiados cada uno con el método más adecuado.

### **9.3. Sismicidad**

En el cálculo de la peligrosidad sísmica destaca cuán relevante es incorporar factores de amplificación sísmica local, pues sin éstos cualquier aproximación se aleja de la realidad heterogénea con la que se manifiestan los efectos sísmicos. Sin embargo, es necesario realizar estudios específicos de vulnerabilidad más detallados que aporten información, al menos, a nivel de manzanas o grupos de edificios. Por otro lado, algunos efectos inducidos pueden cobrar una significancia destacada, como por ejemplo, los movimientos del terreno. En una región donde el gradiente hipsométrico es tan acentuado como es el caso del archipiélago de Canarias, y donde existen condiciones de sitio propicias a desprendimientos y deslizamientos (por litología o discontinuidades), éste peligro debería ser abordado en próximos estudios como otra fuente de daño inducido por el efecto sísmico, a pesar de que la causa más probable de movimientos del terreno esté relacionada con factores ambientales.

## 9.4. Volcanismo

En el cálculo de la peligrosidad volcánica, la falta de datos y la dificultad en su interpretación destacan por encima de otros factores. Disponer de dataciones en coladas lávicas aisladas, así como sus características mecánicas, térmicas, composicionales y volumétricas es esencial para caracterizar escenarios de coladas de lava. En este estudio la incertidumbre recae, principalmente, en la estimación de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y, en segundo lugar aunque asociado al problema anterior, sobre la ubicación más probable que quedaría afectada por la colada de lava, ya que su punto de origen resulta también incierto. Sin embargo, el sesgo en el resultado de la evaluación del riesgo volcánico por coladas lávicas es menor que en los casos anteriores, debido a que se ha considerado como factor de vulnerabilidad 1, lo que implica pérdida máxima. Ahora bien, es necesario insistir en que el evento volcánico incorporará otros peligros que no se han considerado en este estudio. Los efectos de estos peligros se añadirían a los efectos de las coladas lávicas sólo en el caso de no coalescencia de fenómenos en su ámbito espacial, pues una vez se alcanza el nivel máximo de pérdidas en un lugar, sólo cabe un incremento del riesgo si los fenómenos asociados ocurren en otras zonas.



## Referencias bibliográficas

- Aberturas Ramos, A.A (2012): *La valoración de los bienes inmuebles urbanos en los tributos cedidos a las Comunidades Autónomas. Métodos de comprobación del valor*. Revista CT/Catastro N° 76 pp. 17 a 39.
- AEMET (2012): *Atlas Climático de los archipiélagos de Canarias, Madeira y Azores, temperatura del aire y precipitación (1971-2000)*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 80 pp. NIPO: 281-12-006-X.
- Allen, C.R. (1995): *EERI Distinguished Lecture. Earthquake Hazard Assessment: Has Our Approach Been Modified in the Light of Recent Earthquakes*. Earthquake Spectra, Vol.11, No.3, pp. 357-366.
- Ancochea, E.; Brändle, J.L.; Cubas, C.R.; Hernán, F. y Huertas, M.J, (1993): *La serie I de la isla de Fuerteventura*. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat. Memor.; 27, 151 p.
- Ancochea, E.; Brändle, J.L.; Cubas, C.R.; Hernán, F. y Huertas, M.J. (1996): *Volcanic Complexes in the Eastern Ridge of the Canary Islands: The Miocene activity of the island of Fuerteventura*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res.; 70: 183-204.
- Ancochea, E.; Fúster, J.M.; Ibarrola, E.; Cendrero, A.; Coello, J.; Hernán, F.; Cantagrel, J.M. y Jamond, C. (1990): *Volcanic evolution of the island of Tenerife (Canary Islands) in the light of new K-Ar data*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 44: 231-249.
- Anggraeni, D. (2010): *Modelling the impact of topography on seismic amplification at regional scale*. Tesis Doctoral. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. ITC. 60 pp.
- Anguita, F. (2002): *Los volcanes de Canarias: guía geológica e itinerarios*. Rueda J. M., Ediciones, S.A. 222 páginas. ISBN 9788472071322.
- Anguita, F. y Hernán, F. (1975): *A propagating fracture model versus a hot spot origin for the Canary Islands*. Earth and Planetary Science Letters, v.27, p.11-19.
- Anguita, F. y Hernán, F. (2000): *The Canary Island origin: a unifying model*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 103:1-26.
- Araña, V. y Ortiz R. (1986): *La volcanología actual, una revisión*. An. De Física, 82:1-14.
- Araña, V. y Ortiz R. (1991): *The Canary Islands: Tectonic, magmatism and geodynamic framework*. En Kampunzu, A.B. y Lubala, R. T. (Eds.): *Magmatism in Extensional Structural Settings-The Phanerozoic African Plate*. Springer, New York, 209-249.

- Ashford, S.A. y Sitar, N. (1997): *Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff*. *Bulleting of the Seismological Society of America*, 87(3):692-700.
- Asociación Japonesa de Carreteras (1988): *Manual for Retrofit, and Post-earthquake Measures of Road Facilities*. (En japonés).
- Atkinson, G. y Kaka, S. (2007): *Relationships between felt intensity and instrumental ground motions for earthquakes in the central United States and California*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 497-510.
- Aven, T. y Renn, O. (2010): *Risk Management and Governance: Concepts, Guidelines and Applications*. 270 páginas. 16, DOI 10.1007/978-3-642-13926-0\_1. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
- Ayala-Carcedo, F.J. (2002): *Catástrofes naturales, mitos, religiones e historia*. En Ayala-Carcedo F.J. y Olcina Cantos, J. (Eds): *Riesgos Naturales*. Ed. Ariel Ciencia. ISBN 84-344-8034-4. Barcelona.
- Beauducel, F.; Bazin, S.; y Bengoubou-Valerius, M. (2004): *Loi d'atténuation B-cube pour l'évaluation rapide des intensités sismiques probables dans l'archipel de Guadeloupe*. Informe inédito. OVSG-IPGP-UAG. Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe.
- Becerril Carretero, L. (2009): *Aproximación a la peligrosidad volcánica y sus efectos en zonas costeras en las Islas Canarias*. Trabajo de Master. 155pp. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Below, R.; Wirtz, A.; y Guha-Sapir, D. (2009): *Disaster Category Classification and peril Terminology for Operational Purposes Common accord Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) and Munich Reinsurance Company (Munich RE)*. Working paper. 20pp.
- Beven, K. (2001): *How far can we go in distributed hydrological modelling?* *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5, 1-12, 2001 [www.hydrol-earth-syst-sci.net/5/1/2001/doi:10.5194/hess-5-1-2001](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/5/1/2001/doi:10.5194/hess-5-1-2001).
- Blumer, H. (1931): *Science Without Concepts*. *American Journal of Sociology*. 36:515:33.
- Bodoque, J.M., Díez, A., De Pedraza, J., Martín, J.F. y Olivera, F. (2006): *Estimación de la carga sólida en avenidas de derrubios mediante modelos geomecánicos, hidrológicos e hidráulicos combinados: Venero Claro (Ávila)*. En: Pérez Alberti, A. y López Bedoya, J. (eds.), *Geomorfología y territorio*. Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Santiago de Compostela, 13-15 de septiembre de 2006. Cursos y Congresos, 171, 483-495, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 1037 pp.

- Boore, D.M. (1973): *The effect of simple topography on seismic waves: implications for accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California*. Bulletin of the Seismological Society of America 63(5):1603-1609.
- Bosshard, E. y Macfarlane, D. J., (1970): *Crustal structure of the Western Canary Islands*. Journal of Geophysical Research. Volume 75, Issue 26, pages 4901–4918.
- Bramwell, D. (1997): *Flora de las Islas Canarias, guía de bolsillo*. Ed. Rueda. 220 pp. ISBN 84-7207-102-2.
- Bravo, T. (1962): *El circo de Las Cañadas y sus dependencias*. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat., 60: 93-108.
- Bryant, E. (2008): *Tsunami: The Underrated Hazard*. Springer. ISBN: 978-3-540-74273-9. Alemania.
- Cabañas Rodríguez, L.; Carreño Herrero, E.; Izquierdo Álvarez, A.; Martínez Solares, J.M.; Capote del Villar, R.; Martínez Díaz, J.; Benito Oterino, B.; Gaspar Escribano, J. Rivas Medina, A.; García Mayordomo, J.; Perez López, R.; Rodríguez Pascua, M.A. y Murphy Corella, P. (2011): *Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011*. IGN, UCM, UPM, IGME y AEIS. 138 pp. Disponible en <http://www.ign.es>
- CAM (2013): *Aplicación del método de determinación de los costes de referencia de la edificación en Municipios de la Comunidad de Madrid*. Comunidad de Madrid, Consejería de Vivienda. Dirección General de Arquitectura y Rehabilitación. Disponible en <http://www.madrid.org>
- Carbó, A.; Muñoz-Martín, A.; Llanes, P.; Alvarez J. y el ZEE Working Group (2003): *Gravity analysis offshore the Canary Islands from a systematic survey*. Mar. Geophys. Res. 24, 113–127.
- Carracedo, J.C. (2011): *Geología de Canarias I (Origen, evolución, edad y vulcanismo)*. Editorial Rueda, SL. Alcorcón (España). 398 pp. ISBN: 9788472072039.
- Carracedo, J.C., Pérez Torrado, F.J., Paris, R. y Rodríguez Badiola, E (2009): *Megadeslizamientos en las Islas Canarias*. Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra 17.1: p44-56.
- CEDEX y DGA (2011): *Mapa de Caudales Máximos, memoria técnica*. 73 pp. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y Dirección General del Agua. Madrid. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/mapa-de-caudales-maximos/>.

- CEDEX y DGA (2013): *Manual de usuario de CauMax v.2.2 , aplicación sobre SIG para la consulta de los mapas de caudales máximos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y Dirección General del Agua. 80pp. NIPO: 770-11-273-7.
- Celebi, M. (1987): *Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America, 77(4): 1147-1167.
- CES (2014): *Informe anual 2014 del Consejo sobre la situación económica, social y laboral de Canarias en el año 2013*. Consejo Económico y Social de Canarias. Secretaría General. Las Palmas de Gran Canaria. Colección de Informes anuales, n. 22. 728 pp. DL: GC-245-2015. Octubre de 2014.
- CHJ (2013): *Plan Director de defensa contra avenidas, comarca de la Marina Alta, Alicante*. 228pp. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Disponible en [www.chj.es](http://www.chj.es).
- CIAEH (2013): *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación*. Consejo Insular de Aguas de El Hierro. Disponible en <http://www.aguaselhierro.org/>.
- CIAFV (2013): *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación*. Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura. Disponible en: <http://www.aguasfuerteventura.com>.
- CIAGC (1998): *Plan Hidrológico de Gran Canaria*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. 297 pp.
- CIAGC (2009): *Plan Hidrológico 2010. Estudio General de la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. <http://www.aguasgrancanaria.com/> (última visita 2013).
- CIAGC (2013): *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Disponible en: <http://www.aguasgrancanaria.com/>.
- CIAGO (2013): *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación*. Consejo Insular de Aguas de La Gomera. Disponible en: <http://www.aguasgomera.es/>.
- CIALP (2013): *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación*. Consejo Insular de Aguas de La Palma. Disponible en: <http://www.lapalmaaguas.es/>.
- CIALZ (2013): *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación*. Consejo Insular de Aguas de Lanzarote. Disponible en: <http://www.aguaslanzarote.com/>.
- CIATF (2013): *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación*. Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Disponible en: <http://www.aguastenerife.org/>.

- CIEC 2012: *Informe comparativo de costes de edificación entre comunidades autónomas*. Fundación Centro de Información y Economía de la Construcción. Informe realizado a solicitud del Instituto Canario de la Vivienda.
- Coppersmith, K. y Youngs, R. (1990): *Improved Methods for Seismic Hazard Analysis in the Western United States*. Proceedings of Fourth US National Conference on Earthquake Engineering. Mayo 20-24, 1990, Palm Springs, California (Vol. 1).
- Cornell, C. A. (1968): *Engineering seismic risk analysis*. Bull. Seism. Soc. Am. 58:1583–1606.
- Cornell, C.A. y E. Vanmarcke (1969): *The mayor influences on seismic risk*. Proc., 4WCEE, Santiago de Chile, vol.I,A-1,69-83.
- DGC (2011): *Cartografía catastral en formato shapefile*. 25 pp. Disponible online en: [http://www.catastro.minhap.es/ayuda/manual\\_descriptivo\\_shape\\_file.pdf](http://www.catastro.minhap.es/ayuda/manual_descriptivo_shape_file.pdf). Dirección General del Catastro.
- DGPCE (2002): *Simulación de escenarios sísmicos. SES 2002*. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. CD-ROM. Nipo:126-02-012-3.
- Díez Herrero, A.; Génova Fúster, M.; Mayer Suárez, P.; Ballesteros Cánovas, J.A.; Becerril Carretero, L.; Rubiales Jiménez, J.M.; Hernández Ruiz, M.; Saz Sánchez, M.A.; Bodoque del Pozo, J.M. y Ruiz Villanueva, V. (2012): *Investigaciones dendrogeomorfológicas aplicadas al estudio de la peligrosidad por avenidas e inundaciones en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias)*. En González Díez A. (Coord): Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología. Santander, 17-20 de septiembre de 2012. 690 páginas. ISBN: 978-84-86116-54-5. Universidad de Cantabria. Pp. 159-162.
- Díez, A.; Laín, L. y Llorente, M. (2008): *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, 190 págs., Madrid. D.L. M-46538-2008; ISBN 978-84-7840-770-5; NIP0 657-08-026-2.
- Dorta Antequera, P. (2007): *Catálogo de Riesgos Climáticos en Canarias: amenazas y vulnerabilidad*. Geographicalia, vol. 51, pp. 133-160.
- Douglas, J. (2011): *Ground-motion prediction equations 1964–2010*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) & Pacific Earthquake Engineering Research Center, Peer 2011/102, 455 pp.
- EM-DAT (2012): *The OFDA/CRED International Disaster Database*. <http://www.emdat.net>. Université Catholique de Louvain. Bruselas, Bélgica.

- Faenza L. y Michelini, A. (2010): *Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap*. Geophys. J. Int. (2010) 180 (3): 1138-1152. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04467.x.
- Felpeto, A. (2002): *Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica*. Tesis Doctoral. 260 pp. Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Minas.
- Fernández Betancourt, J.D., Delgado Melián, P.; López García, J. y Rodríguez Pallarés, M. (2009): *Guía metodológica para el cálculo de caudales de avenida en la isla de Tenerife*. En <http://www.aguastenerife.org> (última visita 2013).
- Finlay, P.J. y Fell, R. (1997): *Landslides: risk perception and acceptance*. Canadian Geotechnical Journal. 34(2), pp 169-188.
- García Yagüe, A. y García Álvarez, J. (1988): *Clasificación tipológica de los movimientos de ladera*. Comunicaciones II Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables. Andorra la Vella. pp. 53-64.
- Geldmacher, J.; Hoernle, K.; Bogaard, P.; Zankl, G. y Garbe-Schönberg, D. (2001): *Earlier history of the  $\geq 70$ -Ma-old Canary hotspot based on the temporal and geochemical evolution of the Selvagen Archipelago and neighbouring seamounts in the eastern North Atlantic*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 111: 55-87.
- Geldmacher, J.; Hoernle, K.; van den Bogaard, P.; Duggen, S. y Werner, R. (2005): *New  $^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}$  age and geochemical data from seamounts in the Canary and Madeira volcanic provinces: support for the mantle plume hypothesis*. Earth and Planetary Science Letters, 237, 85-101.
- Geli, L.; Bard, P.Y. y Jullien, B. (1988): *The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results*. Bulletin of the Seismological Society of America, 78(1):42-63.
- GESPLAN (2011): *Estudio de riesgos hidráulicos constatados y de riesgos de incendios insulares, Memoria Estudio de Riesgos Hidráulicos Constatados para la isla de Gran Canaria*. Gobierno de Canarias.
- Gobierno de Canarias (2011): *GETCAN-011, Guía para la Planificación y la Realización de Estudios geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias*. 114 pp. Disponible en: <http://web.ua.es/es/ginter/documentos/guia-geotecnica-canarias.pdf>.
- Gobierno de Kanagawa (1986): *Prediction of seismic damage in Kanagawa Prefecture*. Pp.13-63.

- González de Vallejo L.I.; García-Mayordomo J. e Insua J.M. (2006): *Probabilistic Seismic-Hazard Assessment of the Canary Islands*. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(6): 2040-2049.
- González, M.; Susagna, T.; Goiula, X.; Roca, A. y Safina, S. (2001): *Una primera aproximación de la vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales: hospitales y parques de bomberos*. Memorias del 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. Madrid.
- Grünthal, G. (ed, 1998): *Accord partiel ouvert en matière de prévention, de protection et d'organisation des secours contre les risques naturels et technologiques majeurs du Conseil de l'Europe. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. European Macroseismic Scale*. European Seismological Commission. Subcommission on Engineering Seismology. Working Group Macroseismic Scales. Musée National d'Histoire Naturelle, Section Astrophysique et Géophysique, Luxembourg. ISBN: 2-87977-008-4.
- Hoernle, K.A. y Schmincke, H.U. (1993): *The Role of Partial Melting in the 15-Ma Geochemical Evolution of Gran Canaria: A Blob Model for the Canary Hotspot*. Jour. Petrol., 34: 599-626.
- Holcomb, R. y Searle, R. (1991): *Large landslide from oceanic volcanoes*. Marine Geotechnology 10: 19-32.
- Hongyan, H.; Zhihua, G. y Wenfa X. (2005): *Review on spatial interpolation techniques of rainfall*. Chinese Journal of Ecology, (10): 1187-1191.
- Huang, R. (2013): *Slope Motion Response and Failure Under Strong Earthquakes: Recording, Monitoring and Modeling*. Earthquake-Induced Landslides. Springer. pp 59-73.
- IGME y DGOT Murcia (2007): *Estudio y Cartografía de los Peligros Geológicos de las Comarcas del Anto y Bajo Guadalentín de la Región de Murcia. Términos municipales de Librilla, Alhama de Murcia, Totana, Aledo, Puerto Lumbreras y Lorca*. Escala 1/50.000. Ciciembre de 2007. 237 pp. Disponible online: [www.igme.es](http://www.igme.es).
- IGN (2013): CNIG (2013): *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012*. Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional. 267pp. ISBN: 978-84-416-2685-0. NIPO: 162-13-017-1..
- IPCC (2012): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, y New York, EEUU. 582 pp.

- Ishihara, K.; Iguchi, M. y Kamo, K. (1990): *Numerical simulation of lava flows in some volcanoes in Japan*. En Fink, J.H. (ed): *Lava flows and domes, emplacement mechanisms and hazard implications*. Springer-Verlag. Berlín, pp174-207.
- ISSME (1999): *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards (revised version)*. TC4-Technical Committee for Earthquake Engineering, International Society for Soil Mechanics. The Japanese Geotechnical Society. 219 pp.
- Izquierdo, T. y Marquez, A. (2006): *Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias)*. Geocaceta 40-2006, 307-310. ISSN: 0213683X.
- Izquierdo, T. y Marquez, A. (2007): *Estudio comparativo de diferentes métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación en la isla de La Gomera (Islas Canarias): Evaluación de la incorporación de la altura*. Geocaceta 42, 131-134. ISSN: 0213683X.
- Kieffer, A. y Bois, P.H (2002): *A comparison of methods for mapping statistical characteristics of heavy rainfall in the French Alps: the use of daily information*. Hydrological Sciences-Journal—des Sciences Hydrologiques, 45(5). Pp. 739-752.
- King, S.D. (2007): *Hotspots and edge-driven convection*. Geology, v. 35, p. 223-226.
- Kirby, E.; Whipple, K. y Harkins, N. (2008): *Topography reveals seismic hazard*. Nature Geoscience 1, 485 - 487. doi:10.1038/ngeo265
- Krastel, S. y Schmincke H.U (2002): *Crustal structure of northern Gran Canaria, Canary Island, deduced from active seismic tomography*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 115: 53-177.
- Krastel, S.; Schmincke, H.U.; Jacobs, C.L.; Rihm, R.; Le Bas, T.P. y Alibés, B. (2001): *Submarine landslides around the Canary Islands*. Jour. Geophys. Res., 106: 3977-3998.
- Laín Huerta, L. y Llorente Isidro, M. (2011): *Mapas de peligrosidad geológica en el término municipal de Albuñol (Granada)*. Número 3 de Informes técnicos IGME. Instituto Geológico y Minero de España. 160 pp. ISBN 8478408649, 9788478408641.
- Laín Huerta, L.; Bellido Mulas, F.; Pérez Cerdán, F.; Galindo Jiménez, I.; Mancebo Mancebo, M<sup>a</sup> J. (2007): *Cartografía de peligrosidad volcánica de la isla de Tenerife*. IGME, Madrid, 152 páginas. Disponible en <http://www.igme.es>.
- Lay, T. y Wallace, T.C. (1995): *Modern Global Seismology*. Academic Press, 521 pp.

- Li, J. y Heap, A.D. (2008): *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Geoscience Australia, Record 2008/23. Canberra, Australia. 137pp. ISBN: 9781921498305.
- Linés, C.; López Martínez, J. y Llorente Isidro, M (2008): *Cartografía de zonas potencialmente inundables en Valdepeñas (Ciudad Real). Comparación de modelos hidráulicos bidimensionales aplicados a cartografía de peligrosidad de inundaciones*. PFC. Universidad Autónoma de Madrid. 98 pp.
- Llorente, M. (2013a): *Flood hazard analysis in the Canary Archipelago, Spain*. Ponencia en la 15<sup>th</sup> Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences.
- Llorente, M. (2013b): *Flood risk analysis in the Canary Archipelago, Spain*. Libro de actas. Poster en la 15<sup>th</sup> Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences.
- Llorente, M. (2013c): *GEOMEPE: Modelo de evaluación de pérdidas por peligros geológicos*. En: Rivera, M.; Zavala, B.; Valderrama, P. y Taípe, E.: *Foro Internacional Peligros Geológicos, Volcanes, sismos y movimientos en masa, libro de resúmenes*. INGEMMET, Perú. Pp. 70 a 74.
- Llorente, M. (2013d): *GEOMEPE: Modelo de evaluación de pérdidas por peligros geológicos*. Conferencia en el seminario "Reducción del Riesgo de Desastres por peligros geológicos en la región de Tacna". Perú. 18 de octubre de 2013.
- Llorente, M. (2013e): *Métodos de evaluación de pérdidas por peligros geológicos*. Conferencia Magistral en el I Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra, Valle del Colca, laboratorio natural del Mundo.
- Llorente, M. y Nájera, A. (2013): *Geo-MEP: Geohazard Loss Assessment Method. A Pilot Project on the Canary Islands, Spain*. Conferencia en la 8<sup>th</sup> Meeting of the World Forum of Catastrophe Programmes. Alesund, Noruega.
- Llorente, M.; Díez-Herrero, A.; Benito, G.; Lain, L.; Ballesteros, J.A. (2007). *Incidencia de la disponibilidad documental y el cambio en los usos del suelo en la percepción del fenómeno de las inundaciones y el sesgo en los análisis de su frecuencia*. Libro de resúmenes. I Congreso Nacional sobre el Cambio Global, Madrid, 25-27 de abril de 2007.
- López Alonso, R. (2001): *Propuesta de modificación del método racional*. Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas (Madrid). Cimbra, n.342, pp 24-28.
- Martín Vide, J.P. (2006): *Ingeniería fluvial*. UPC. Barcelona. 331 pp.

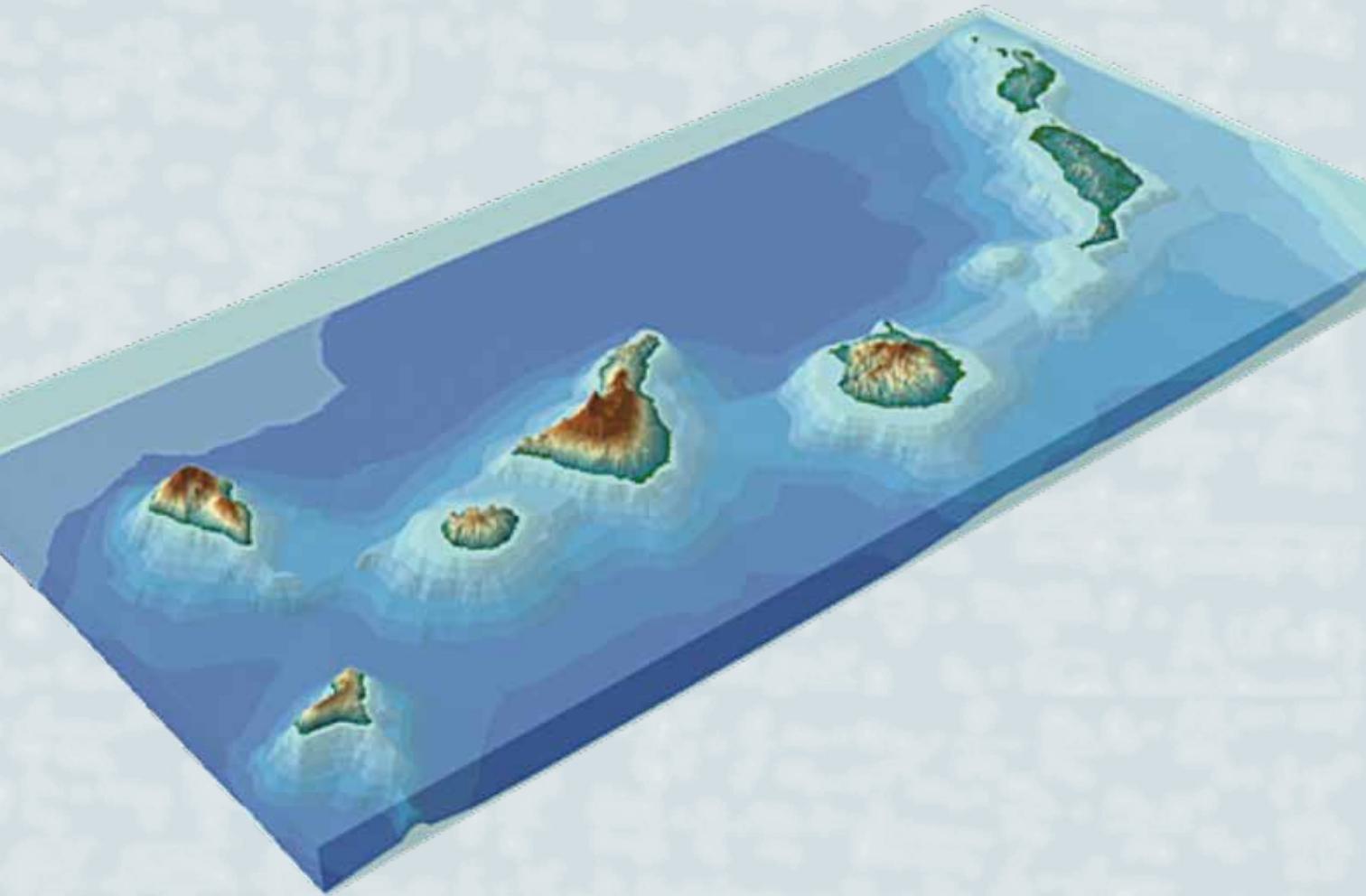
- Martínez Allegue, C.; Paredes Bartolomé, C. y Llorente Isidro (2012): *Estudio de las precipitaciones máximas en la isla de El Hierro*. Inédito, Memoria de Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid. 307 pp.
- Martín-Serrano, A., Salazar, A.; Nozal, F. y Suárez, A. (2005); *Mapa geomorfológico de España a escala 1:50.000: guía para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España. Área de Cartografía Geológica. Madrid. 128pp. ISBN: 8478405623.
- Marzocchi, W.; Mastellone, M. L.; Di Ruocco, A.; Novelli, P.; Romeo, E. y Gasparini, P. (2009): *Principles of multi-risk assessment Interaction amongst natural and man-induced risks*. European Commission. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 75 pp. ISBN 978-92-79-07963-4.
- Masson, D.G.; Watts, A.B.; Gee, M.J.R.; Urgeles, R.; Mitchell, N.C.; Le Bas, T.P. y Canals, M. (2002): *Slope failures on the flaks of the western Canary Islands*. Earth Science Reviews, 57: 1-35.
- Mezcua, J. y Martínez Solares (1983): *Sismicidad del área Ibero-Mogrebi*. Instituto Geográfico Nacional. 313pp. DL: M252681983.
- Miyamoto, H. y Sasaki, S. (1997): *Simulating lava flows by an improved cellular automata method*. Computers and Geosciences, 23(3): 283-292.
- MMA e INM (2002): *Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus períodos de retorno en España: un estudio por regiones*. Ministerio de Medio Ambiente y Dirección General del Instituto Nacional De Meteorología. Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente. Volumen 14, Canarias. 112 pp. ISBN: 8483202026.
- MOPU (1990): *Instrucción de carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial"* (BOE núm. 123, de 23 de mayo de 1990).
- Mora Jiménez, E. y Díez Herrero, A. (2008): *Análisis del riesgo de inundación en localizaciones puntuales: el edificio Sabatini (Toledo)*. En: Galindo Jiménez, I.; L. Laín Huerta y Llorente Isidro M. (Eds.): *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, nº 12, Capítulo 3, 39-52, Madrid, IGME y Consorcio de Compensación de Seguros (MEH). ISBN: 978-84-7840-755-2; NIPO: 657-08-022-0; D.L. M-15342-2008.
- Mora, S. y Vahrson, W. (1993): *Macrozonation methodolgy for landslide hazard determination*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 31(1): 49-58.

- Mulas, J.; Ponce de León, D. y Reoyo, E. (2003): *Microzonación sísmica de movimientos de ladera en una zona del Pirineo Central*. 2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 13-26.
- Munson, C. y Thurber C. (1997). *Analysis of the attenuation of strong ground motion on the Island of Hawaii*. Bull. Seism. Soc. Am. 87, 945–960.
- Murnane, R. J. (2007): *New directions in catastrophe risk models*. World Bank Brown-Bag Launch Presentation. Comunicación oral. Banco Mundial.
- Navarro, J.M. y Coello, J. (1989): *Depressions originated by landslide processes in Tenerife*. ESF Meeting on Canarian Volcanism. Lanzarote 1989, 150-152.
- Newhall, C.G. y Self S. (1982): *The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. J. Geophys. Res., 87(C2), 1231–1238, doi:10.1029/JC087iC02p01231.
- Newmark, N. M. (1965): *Effects of earthquake on dams and embankments*. Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160.
- NOAA (2011): *The Deadliest, Costliest, and Most Intense United States Tropical Cyclones From 1851 to 2010 (and other Frequently Requested Hurricane Facts)*. Memorando técnico NWS NHC-6. 49 pp. <http://www.nhc.noaa.gov/>.
- Olcina, J. y Ayala, F.J. (2002): *Riesgos Naturales*. Ed. Ariel Ciencias. 1512 pp. ISBN: 9788434480346.
- Ordaz, M. (1997): *Sismicidad y riesgo sísmico*. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Ver., México, Vol. 1, PP.143-163.
- Ordaz, M. (2001): *CRISIS 99-1. Sistema de cómputo para el cálculo de peligro sísmico*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México City, 102 pp.
- Oyarzun, R.; Doblas, M.; Lopez Ruiz, J. y Cebriá, J.M. (1997): *Opening of the central Atlantic and asymmetric mantle upwelling phenomena: implications for long-lived magmatism in western North Africa and Europe*. Geology, 25: 727-730.
- Powers, M.R (2006): *Catastrophe forecasting: seeing “gray” among the “black boxes”*. Journal of Risk Finance. Vol. 7(5):1-6.
- Región de Murcia (2006): *Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico en la Región de Murcia*. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. Memoria (148 pp) y anexos (507 pp). <http://www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur/sismimur.php>.

- Renn, O. (1992): *Concepts of Risk: A Classification*. En: Krinsky S. y Golding D. (eds.): *Social Theories of Risk*. Westport, CT (Praeger 1992), pp. 53-79.
- Romero, C. (1991): *Las manifestaciones volcánicas históricas del archipiélago canario*. Tesis Doctoral, Departamento de Geografía, Univ. de La Laguna. Gobierno de Canarias (ed.). 2 vols., 1391 pp.
- Ruiz Villanueva, V.; Díez Herrero., A; Laín Huerta L. y Llorente Isidro, M. (2008): *Elaboración de Mapas de Peligrosidad de Inundaciones según su ámbito de aplicación y escala: propuesta metodológica - Flood Hazard mapping regarding end users and scale of interest: methodological proposal*. Geo-Temas 10, 2008 (ISSN: 1567-5172). Pp. 1409-1412.
- Schmincke H.U, (1982): *Volcanic and chemical evolution of the Canary Island*. En: Von Rad, U.; Hinz, K. ; Sarnthein M. y Seibold, E. (Eds.): *Geology of the Northwest African margin*. Springer, Berlín, 273-306.
- Schmincke, H.U. y Sumita, M. (1998): *Volcanic evolution of Gran Canaria reconstrated from aprom sediments*. Synthesis VICAP drilling project (ODP Leg 157), en: Weaver, P.P.E.; Schmicke, H. U.; Firth J.V. y Duffield, W. (Eds.): *Proc. ODP, Sci. Results, 157*: College Station, TX. Ocean Drilling Program, 443-469.
- Scott A.A.; Sitar, N.; Lysmer, J. y Deng, N. (1997): *Topographic effects on the seismic response of steep slopes*. Bulletin of the Seismological Society of America June 1997 vol. 87 no. 3 701-709
- Scott, E. W. (1989): *Volcanic and related Hazards*. En: Tilling, R. I. (ed.): *A Short Course in Geology*. Vol. 1. Volcanic Hazards. American Geophysical Union. EEUU. Pp. 9 -23.
- Semenza, E. (2010): *The Story of Vajont. Told by the Geologist who Discovered the Landslide*. ISBN 8889288027, 9788889288023; 208 páginas. K-Flash, Italia.
- Shiann-Jong, L.; Yu-Chang, C.; Dimitri K.; Bor-Shouh, H. y Jeroen, T. (2009): *Effects of Realistic Surface Topography on Seismic Ground Motion in the Yangminshan Region of Taiwan Based Upon the Spectral-Element Method and LiDAR DTM*. Bulletin of the Seismological Society of America, 99 (2A). pp. 681-693. ISSN 0037-1106.
- Siyahi, B.G. y Ansal, A. (1999): *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, Technical Committe 4. International Society of Soil Mechnics and Geotechnical Engineering. pp. 68-70.
- Staudigel, H. y Schmincke, H.U. (1984): *The Pliocene seamount series of La Palma (Canary Islands)*. Jour. Geophys. Res., 89; 11195-11215.

- Stillman, C.J. (1999): *Giant Miocene landslides and the evolution of Fuerteventura, Canary Islands*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 94: 89-104.
- SVAPG (2013): *Technical Document (Tec-Doc) on Seismic Vulnerability Assessment Methods for Buildings*. Seismic Vulnerability Assessment Project Group. National Disaster Management Authority, Government of India. 74 pp.
- Teide Group (1997): *Morphometric interpretation of the northwest and southeast slopes of Tenerife, Canary Islands*. Jour. Geophys. Res., 102: 20325-20342.
- Témez J.R. (1991): *Generalización y mejora del método racional*. Versión de la Dir. Gral. De Carreteras de España. Ing. Civil n. 82, pp51-56.
- Tomas, R.; Harrison, M.; Barredo, J.I.; Thomas, F.; Llorente Isidro, M.; Cerba, O. y Pfeiffer, M. (2014): *Towards a cross-domain interoperable framework for natural hazards and disaster risk reduction information*. Geophysical Research Abstracts. Vol. 16, EGU2014-11146, 2014. EGU General Assembly 2014.
- Tobin G. A. y Montz, B. E (1997): *Natural Hazards, Explanation and Integration*. 388 Pages. ISBN 978-1-57230-062-0.
- Toombes, L. y Chanson, H. (2011): *Numerical Limitations of Hydraulic Models*. En Valentine, E.M. (Ed): *Proceedings of 34th IAHR World Congress - Balance and Uncertainty*. Brisbane, Australia, 26 junio al 1 de Julio de 2011. pp 2322-2329 ISBN: 978-0-85825-868-6.
- Tselentis, G.A. y Danciu, L. (2008): *Empirical relationships between Modified Mercalli Intensity Scale and engineering ground motion parameters in Greece*. Bulletin of the Seismological Society of America 98:1863-1875.
- UNESPA (2012): *Memoria Social del Seguro Español 2012*. Asociación Empresarial del seguro. 182 pp. Disponible en: <http://www.unespa.es>.
- UNISDR (2009): *Terminology on Disaster Risk Reduction. The United Nations International Strategy for Disaster Reduction*. Ginebra, Suiza. 35 pp. Disponible para descarga en <http://www.unisdr.org/publications> (última visita 2013).
- Urgelés, R. Canals, M., Baraza, J., Alonso, B. y Masson, D.G. (1997): *The most recent megaslides on the Canary Islands: the El Golfo Debris Avalanche and the Canary Debris Flow, west El Hierro Island*. Jour. Geophys. Res., 102: 20305-20323.
- Urgelés, R. Masson, D.G., Canals, M., Watts, A.B. y Le Bas, T. (1999): *Recurrent large-scale landsliding on the west flank of La Pala, Canary Islands*. Jour. Geophys. Res., 104 (B11):25331-25348.

- USACE (2010): *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual, v4.1*. California, USA. Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx>.
- USGS (2000): *Volcanic Hazards and Phenomena. Graphics – Maps, Charts Tables, etc.* Disponible online en: <http://vulcan.wr.usgs.gov/Hazards/Graphics/framework.html>.
- Varnes, D.J. (1978): Slope movement types and processes. En: Special report 176: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Ven Te Chow (1982): *Hidráulica de los canales abiertos*. Diana (México). 633pp. ISBN 968-13-1327-5.
- Vera, J.A. (ed) (2004): *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 890 páginas.
- Wald D.J. y Allen, T.I. (2007): *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification*. Bulletin of the Seismological Society of America October 2007 vol. 97 no. 5 1379-1395.
- Watts, A.B. y Masson, D.G. (1995): *A giant landslide on the north flank of Tenerife, Canary Islands*. Jour. Geophys. Res., (B) 100: 24487-24498.
- Wells D. L. y Coppersmith K. J. (1994): *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, No. 4, pp.974-1002.
- Wignall, P.B. (2011): *Earth science: lethal volcanism*. Nature 477, 285-286. DOI: 10.1038/477285a.
- Wilson, J.T. (1963): *A possible origin of the Hawaiian Islands*. Canadian Journal of Physics (NRC Research Press) 41: 863–870. Bibcode:1963CaJPh..41..863W. doi:10.1139/p63-094.
- Wilson, R.; Wieczorek, G.; y Harp, E. (1979): *Development of criteria for regional mapping of slope stability*. En: Proceedings of the Annual Meeting of the Geological Society of America, San Diego, USA, 30.
- Worden, C.B.; Gerstenberger, M.C.; Rhoades, D.A. y Wald, D.J. (2012): *Probabilistic Relationships between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California*. Bulletin of the Seismological Society of America, 102:1, pp. 204–221.



**GeoMEP** Modelo de Evaluación de Pérdidas por Peligros Geológicos. Aplicación al Caso de las Islas Canarias.

