

Análisis del riesgo multi-amenaza como instrumento de apoyo al marco territorial de recuperación de la normalidad post-desastre eruptivo en La Palma 2021

Jaime Salvador Díaz Pacheco

Profesor. Dpto. de Geografía e Historia. Universidad de La Laguna.

Nerea Martín Raya

Investigadora. Dpto. de Geografía e Historia. Universidad de La Laguna.

Rafael Jesús Daranas Carballo

Profesor Contratado Laboral. Dpto. de Geografía e Historia. Universidad de La Laguna.

Resumen: Dentro de la respuesta institucional ante el desastre causado por la erupción del volcán Tajogaite en la isla de La Palma a fines de 2021, se desarrolla un marco de trabajo para abordar las acciones de recuperación. De este modo, el Gobierno de Canarias implementa el Marco Territorial de Recuperación de la Normalidad (MTRN), alineado con los principios de reducción del riesgo de desastres delineados en el Marco de Sendai, las guías internacionales de apoyo para la evaluación de necesidades post-desastre y la agenda urbana española. El MTRN busca una recuperación adaptativa y resiliente, enfocándose en la planificación territorial y la reconstrucción sostenible. Este artículo presenta la metodología para desarrollar una cartografía de riesgo multi-amenaza que respalda el MTRN, con el objetivo de facilitar la planificación territorial para la recuperación de usos residenciales, turísticos y comerciales en La Palma. El proceso incluye el análisis de riesgos preexistentes, la evaluación de la susceptibilidad territorial y la vulnerabilidad ante amenazas naturales, culminando en la elaboración de una cartografía detallada para el área de estudio.

Palabras clave: Recuperación post-desastre, análisis del riesgo, PDNA, riesgo volcánico, agenda urbana

Abstract: Within the institutional response to the disaster caused by the eruption of the Tajogaite volcano on the island of La Palma at the end of 2021, a framework is developed to address recovery actions. Thus, the Government of the Canary Islands implements the Territorial Framework for Recovery to Normalcy (MTRN), aligned with the principles of disaster risk reduction outlined in the Sendai Framework, international support guidelines for post-disaster needs assessment, and the Spanish urban agenda. The MTRN aims for adaptive and resilient recovery, focusing on territorial planning and sustainable reconstruction. This article presents the methodology for developing a multi-hazard risk mapping that supports the MTRN, with the goal of facilitating territorial planning for the recovery of residential, tourist, and commercial uses in La Palma. The process includes the analysis of pre-existing risks, the evaluation of territorial susceptibility and vulnerability to natural hazards, culminating in the development of detailed mapping for the study area.

Key words: Post-disaster recovery, risk analysis, PDNA, volcanic risk, urban agenda

1. Introducción

El desastre ocurrido en la isla de La Palma a finales de 2021 originado por el proceso eruptivo del hoy denominado volcán Tajogaite, tuvo un carácter intensamente disruptivo en el que fue necesario contar con ayuda exterior para gestionar el riesgo durante los 85 días en que la erupción se mantuvo activa. Una vez dada por concluida la erupción, en el recuento de los impactos directos se contabiliza la pérdida de 3.974 edificaciones de hecho. En concreto, se hace referencia a la destrucción de edificaciones de diferentes usos, con un peso muy importante de la actividad residencial (67%). De este modo, durante los estudios de inventario realizados dentro del Marco Territorial para la Recuperación de la Normalidad tras la erupción (GOBCAN, 2022) se inventariaron 2.655 edificaciones utilizadas como vivienda y usos complementarios de la vivienda (garaje, barbacoa, otros). El resto se identifican como edificaciones dedicadas a otros usos como el turístico, complementarias de la actividad agrícola, uso industrial y actividades comerciales. A todo ello, se le añade también la destrucción de redes de transporte (73 km), de abastecimiento de agua y riego, así como la pérdida de terrenos de cultivo estimados por el Cabildo Insular de La Palma en más de 370 ha. En definitiva, todo un cúmulo de daños directos al medioambiente, a los bienes y a las infraestructuras de la isla, que luego, como ocurre en este tipo de desastres, interaccionan produciendo efectos de carácter complejo, cuyo impacto total supera en magnitud a la suma de cada uno de los impactos directos inventariados. Y donde, además, los efectos se extienden en el tiempo, bien por la reparación de los daños, o bien, como ha ocurrido en La Palma, por el impacto residual de la erupción, en este caso por emisión continua de CO₂ que aún mantiene a personas desplazadas de sus viviendas en varios núcleos de población. En este contexto de vuelta a la normalidad, tras el cese de la actividad eruptiva declarada el 13 de diciembre de 2021 (GOBCAN, 2021), el Gobierno de Canarias desarrolla el Marco Territorial de Recuperación de la Normalidad tras la erupción (en adelante MTRN).

Impacto devastador de la erupción de La Palma

Desarrollo de un Marco Territorial para la Recuperación de la Normalidad en

El MTRN tiene el objetivo de coordinar los esfuerzos que se están realizando a este nivel institucional para que, de un modo rápido, pero atendiendo a criterios básicos de ordenación territorial, se puedan establecer los instrumentos normativos y de planificación necesarios para volver a la normalidad trabajando desde una perspectiva adaptativa y resiliente. Es decir, atendiendo a las prioridades señaladas por el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (ONU, 2015) y, en este caso, de manera muy destacada a la prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción. A nivel nacional y local y para el caso que nos ocupa, el Marco de Sendai señala de manera explícita la necesidad de promover la gestión del riesgo de desastre en los procesos de recuperación y rehabilitación después de los desastres; aprovechar las oportunidades durante la fase de recuperación para desarrollar capacidades que permitan reducir el riesgo de desastres a corto, mediano y largo plazo (ONU,

2015, 33.j); elaborar directrices con relación a la planificación territorial y la mejora de las normas estructurales (ONU, 2015, 33.k); considerar el traslado de las instalaciones e infraestructuras públicas a lugares fuera de las zonas de riesgo, y consultar con las personas afectadas en los procesos de planificación (ONU, 2015, 33.l). De esta manera el MTRN centra sus metas y objetivos en una serie de premisas contenidas en marcos de consenso establecidos a nivel internacional y nacional, los cuales están en consonancia con el Marco de Sendai y se dirigen a guiar estrategias adaptativas de recuperación sostenibles post-desastre (GOBCAN, 2022). Las tres principales estrategias son la Guía para Desarrollar Marcos de Recuperación de Desastres (GFDRR, 2015); la Guía para las Evaluaciones de Necesidades Post-desastre (GFDRR, 2013); y la Agenda Urbana Española, 2019 (MITMA, 2019).

Entre las premisas que señalan las guías para el desarrollo de los marcos de recuperación y aquellas que tratan de establecer los principios que deben regir las evaluaciones de necesidades, tal y como señala el Marco de Sendai, se encuentran aquellas que advierten de la importancia de analizar los riesgos preexistentes y aquellos que subyacen dentro de las áreas afectadas, los cuales deben ser identificados y evaluados con el fin de que los procesos de planificación territorial puedan atender este criterio en su formulación. De esta manera, el análisis del riesgo durante el desarrollo del MTRN diseñado para La Palma en 2022, debe servir para: planificar y asegurar los reasentamientos de usos e infraestructuras; identificar zonas seguras para la reconstrucción y reedificación; identificar prácticas y tecnología que permita reconstruir los diferentes sectores dañados de modo resiliente; establecer medidas regulatorias para restringir la recuperación y reconstrucción en zonas de riesgo; implantar sistemas de información, medios de asesoramiento técnico (recursos humanos) y capacitación para apoyar una mejor recuperación (building back better); y generar un cartografía multi-amenaza para apoyar con información geográfica los procesos de planificación territorial dentro del MTRN (GFDRR, 2013; GOBCAN, 2022).

La cartografía de riesgos sirve de apoyo a la toma de decisiones en la planificación territorial dentro del proceso de recuperación.

El presente trabajo tiene el objetivo de mostrar la metodología general empleada para la generación de la cartografía de riesgo multi-amenaza, que sirve de apoyo informativo al MTRN iniciado por la Consejería de Transición Ecológica y Energía del Gobierno de Canarias en 2021, en coincidencia con el cese de la actividad eruptiva del volcán Tajogaite. En este caso, la cartografía de riesgo está dirigida, sobre todo, a apoyar los procesos de planificación territorial orientados a la recuperación de los usos de suelo residencial, turístico y comercial. Para ello, se realizó un pre-análisis a modo de síntesis de unidades geográficas del área establecida por el equipo redactor del MTRN para relocalizar las mencionadas actividades; posteriormente, se llevó a cabo el cómputo de susceptibilidad territorial para las amenazas naturales vinculadas a los sismos, el vulcanismo (coladas de lava), los movimientos de vertiente y la inundación; consecuentemente se realizó una evaluación de la vulnerabilidad frente a este tipo de amenazas; y finalmente se elaboró una cartografía de riesgo multi-amenaza para el área de estudio establecida.

2. Descripción del área de estudio

En el proceso de los trabajos técnicos del MTRN esta área se denomina área funcional. La extensión del área funcional abarca un total de 94,3 km² de los que 28,5 km² corresponden al área de afectada directamente por la erupción, de la que, a su vez, son 15,9 km² los que se estiman cubiertos por coladas con grosores de distinta potencia.

El área funcional del MTRN abarca 94.3 km², de los cuales 28.5 km² fueron directamente afectados por la erupción, con 15.9 km² cubiertos por coladas de lava.

El área de estudio se sitúa en la vertiente occidental de la isla de La Palma, al sur inmediato del Barranco de Las Angustias y del antiguo edificio volcánico de Benjén. Esta área abarca la zona directamente afectada por la erupción volcánica, incluyendo el cono piroclástico, las coladas, las cenizas y los piroclastos, así como una gran zona de expansión hacia el norte, limitando con el Barranco de Las Angustias y el extremo norte del municipio de Los Llanos de Aridane. Hacia el sur, el límite coincide con el borde sur del mismo municipio, donde se encuentra en el Malpaís de El Remo. Hacia el este, el área funcional está delimitada por la línea de cumbre, en gran parte coincidiendo con el límite del municipio de El Paso, para luego extenderse hasta Cumbre Vieja, donde alcanza altitudes superiores a los 1.900 m. sobre el nivel del mar. Desde este punto, la delimitación del área desciende hacia el sur hasta llegar a la carretera LP-2. Aquí se traza en dirección sur siguiendo la línea divisoria entre los municipios de Los Llanos de Aridane y El Paso. La delimitación occidental del área funcional coincide con la línea costera, desde la desembocadura del Barranco de Las Angustias en Tazacorte en el norte, hasta el límite sur de la localidad de El Remo (Figura 1).

En el área de estudio, el relieve se describe como una gran rampa que desciende desde la parte más elevada de la dorsal que se inicia en Cumbre Nueva

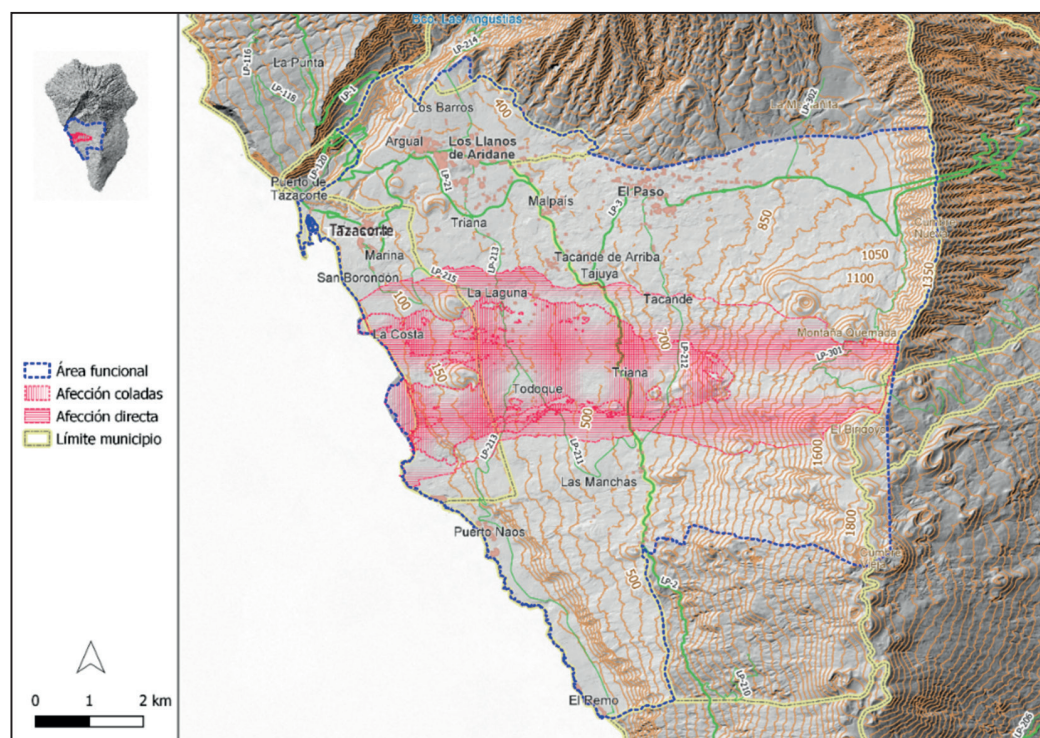


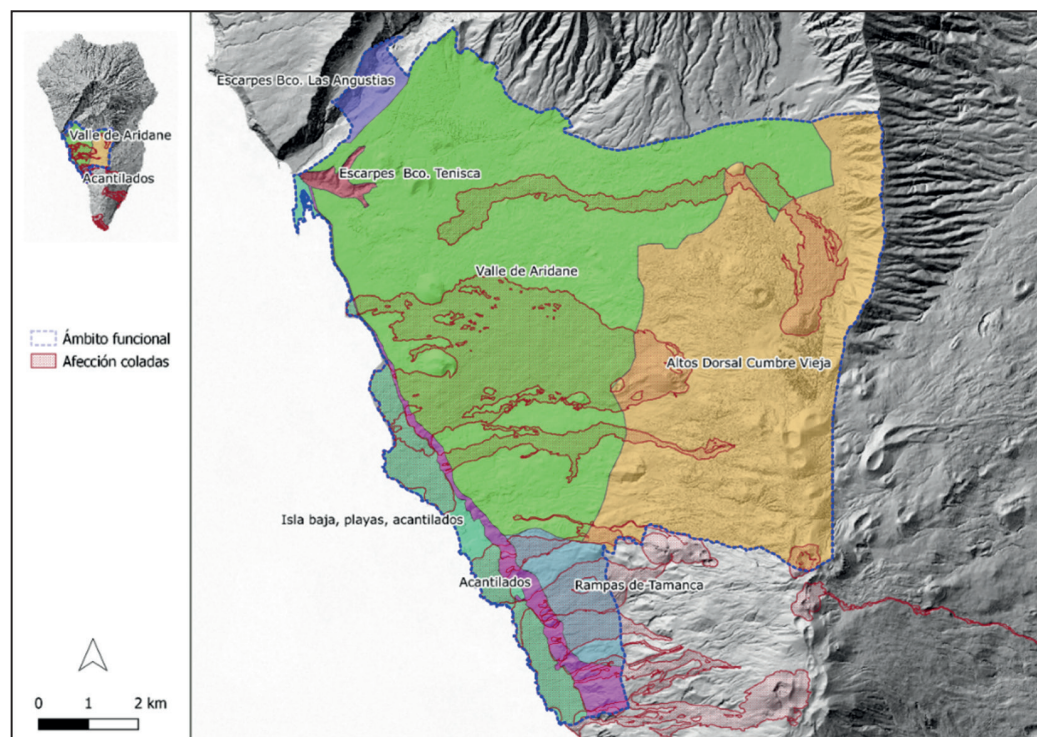
Figura 1. Localización de las áreas delimitadas.

Fuente: IDE Canarias, GESPLAN

conformando un valle flanqueado al norte por el pie del dorso meridional de los antiguos escudos Taburiente y Bejenado; al sur la interrupción la produce una ruptura de pendiente producida por el Barranco de Las Palmas, que nace en las faldas del Volcán del Hoyo Negro. En el ejercicio de pre-análisis orientado al posterior análisis de riesgo, se diferenciaron seis unidades de relieve: los altos de la dorsal de Cumbre Vieja; valle de Aridane; rampas de Tamanca; acantilados; isla baja, playas y acantilados; escarpes del barranco de Tenisca; y escarpe del barranco de las Angustias (Figura 2).

Figura 2. Unidades de relieve del área funcional

Fuente: GRAFCAN



Los altos de la dorsal de Cumbre Vieja conforman una unidad muy poco habitada de componente principalmente natural. Se trata de una franja de pendientes elevadas y relieve abrupto, que abarca casi toda la zona elevada del área funcional, la cual parte de los 700 m. de altitud hasta la línea divisoria de cumbre. La única porción de menor pendiente la encontramos en el sector Noroeste del área funcional, justo en el llano que se extiende al pie de la ladera de Cumbre Nueva. Se trata de un terreno geológicamente joven y además rejuvenecido con erupciones históricas recientes, como la de la zona del Tacande (1430-1470?) o la de Nambroque (1949).

El Valle de Aridane es la unidad más amplia de las diferenciadas. Abarca una amplia franja del área funcional de pendiente moderada y con algunas zonas de pendiente suave, que se corresponde con los llanos donde actualmente se extienden los núcleos urbanos de Los Llanos Aridane y el Paso. Por este espacio discurren las coladas de la erupción actual, las del Tacande. Al sur de la colada actual discurren las coladas de una de las bocas de la erupción del San Juan (1949) y al sur de esta encontramos un relieve abrupto ocupado por el malpaís que produjo la erupción del Tajuya en 1585.

Las rampas de Tamanca conforman una unidad que se corresponden casi en su totalidad con el Paisaje Natural Protegido de Tamanca. Se trata de un sector diferenciado del Valle en el que la pendiente en general es mucho más elevada, superando generalmente el 15%. Se trata de una zona bastante abrupta, que además se encuentra cubierta en gran parte por coladas recientes e históricas, en este caso las de la erupción del Tajuya (1585) y la erupción de Los Charcos (1712).

Los acantilados se han delimitado como unidad, marcando el espacio conformado por la franja estrecha que se corresponde con el conjunto de acantilados, en su mayoría inactivos, que han quedado retirados de la línea de costa por la formación de islas bajas y playas de origen volcánico.

La isla baja, playas y acantilados conforman la franja integrada por una plataforma litoral de pendiente muy suave, que se extiende desde los acantilados inactivos y de mayor ancho en el sector sur, alimentada por los productos volcánicos de las erupciones históricas. La mayor extensión de esta plataforma se encuentra en el delta lávico de las coladas del San Juan (1949), y las actuales islas bajas creadas a continuación de estas por la reciente erupción de 2021.

Los escarpes del barranco de Tenisca se identifican como una unidad diferenciada dentro del área de estudio. Aquí se define el lecho del barranco flanqueado al Norte por un escarpe cuya cornisa alcanza los 100 m. de altitud, mientras que al Sur se encaja en la plataforma del Valle a través de una pared escarpada que llega a alcanzar los 50m. de altura respecto al lecho en algunos tramos

Por último, los escarpes del barranco de Las Angustias, que forman una muesca hacia el interior de dicho barranco, elevándose hasta la terraza de Amagar, justo debajo de las laderas del Time. Se trata del lecho del barranco por donde discurre la carretera hacia Tijarafe y que se encuentra flanqueado por escarpes de pendiente muy abrupta.

De la descripción de todas estas unidades geográficas, la que se ha denominado valle de Aridane es la que, a priori, parece más susceptible de poder ser ocupada en actividades de relocalización de usos de suelo perdidos a causa de la erupción del Tajogaite.

El valle de Aridane se identifica inicialmente como la zona más adecuada para la reubicación de actividades afectadas por la erupción.

3. Metodología y fuentes

El desarrollo de estos trabajos se realiza compartiendo los resultados obtenidos en cada fase de avance con los equipos científicos participantes en la elaboración del estudio, con los agentes de gobierno, promotores y promotoras del proceso, con agentes representantes de distintos sectores económicos y sociales; y con las personas afectadas directamente por la erupción. Los medios empleados para ello fueron un sitio web (GOBCAN, 2022); el puesto de información permanente ubicado en las dependencias de GESPLAN en la isla, la empresa encargada de dirigir y gestionar los trabajos técnicos; las sesiones de trabajo or-

La coordinación interdisciplinar y la comunicación deben ser constantes

ganizadas por la plataforma Revivir el Valle, que tiene un papel fundamental en todo el proceso; y los talleres con las personas y familias afectadas gestionadas por un grupo técnico multidisciplinar organizado por GESPLAN.

Desde el punto de vista científico se trata de un trabajo multidisciplinar en el que participaron científicos y científicas vinculados al Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN) con la misión de realizar el cómputo de la susceptibilidad de las amenazas geológicas; la consultora INCLAN quien se encargó de un análisis espacial de la amenaza de inundación; y la Cátedra de Reducción del Riesgo de Desastres de la Universidad de La Laguna, quién realiza la evaluación de vulnerabilidad y la integración cartográfica general para obtener un mapa de riesgo multi-amenaza del Valle de Aridane (área de estudio).

El análisis del riesgo multiamenaza integra diferentes peligros naturales y la evaluación de la exposición-vulnerabilidad frente a éstos

Diferentes actividades y usos suponen diferentes niveles de riesgo

El concepto de riesgo se suele definir como la interacción entre amenaza, vulnerabilidad y exposición, elementos que se combinan de manera variable en el espacio y el tiempo, entrelazándose y superponiéndose. Un mismo territorio puede enfrentar múltiples amenazas, cada una con diferentes niveles de peligro y repercusiones en la sociedad. Por esta razón, el enfoque de riesgo multi-amenaza resulta valioso para analizar situaciones a escala local y regional (Eshрати et al., 2015). La metodología empleada en este estudio, denominada “multilayer single hazard” desarrollada por Gill y Malamud (2014), implica examinar todas las amenazas relevantes de manera individualizada y estudiar su solapamiento espacial. Aunque no considera la interacción entre las amenazas, este enfoque facilita la identificación de áreas de vulnerabilidad destacadas y la elaboración de indicadores específicos para reducir el riesgo de desastres (Johnson et al., 2016). Además, esta estrategia se alinea estrechamente con políticas internacionales de reducción del riesgo y sostenibilidad, como la Agenda 21 y el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (De Angeli et al., 2022).

En la secuencia metodológica seguida en este trabajo se establecieron cuatro fases: (1) Análisis espacial individualizado de las amenazas; (2) Selección de unidad de representación y agregación espacial de las amenazas; (3) Análisis de condiciones de vulnerabilidad y exposición; (4) Integración de amenazas, cálculo y zonificación del riesgo; (5) Simulación del riesgo en bolsas de suelo propuestas.

1) Análisis espacial individualizado de las amenazas

En el caso que nos ocupa, dentro del MTRN y basándose en un análisis preliminar del área de estudio se decidió analizar las amenazas de inundación, movimientos de ladera, erupciones volcánicas (coladas de lava) y movimientos sísmicos. De manera general son estas amenazas las que suelen tener una mayor consideración en los ejercicios de planificación territorial en Canarias (Dorta et al., 2020). En el enfoque de análisis del riesgo multiamenaza (multilayer single hazard), se evalúa individualmente cada amenaza utilizando una metodología específica para cada una de ellas, tal y como se expone a continuación.

El análisis espacial de las amenazas movimientos de ladera, erupciones volcánicas (coladas de lava) y movimientos sísmicos es llevado a cabo por el equipo técnico y científico del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN) y está dispuesto en el sitio web del MTRN (González de Vallejo et al., 2022). Mientras que el análisis de susceptibilidad de inundaciones lo realiza la consultora INCLAN (Figura 3).

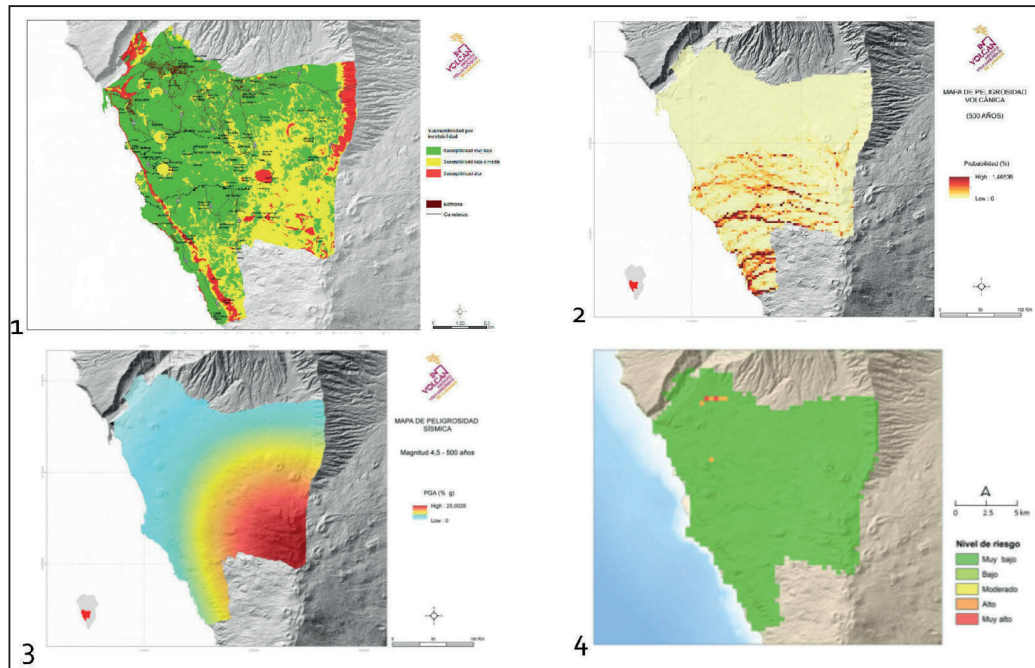


Figura 3. Peligrosidad

(1): Movimientos de laderas

(2): Coladas de lava;

(3): Peligro sísmico

(4): Inundaciones.

Fuente: MTRN (GOB-CAN 2022)

2) Selección de unidad de representación y agregación espacial de las amenazas

Uno de los objetivos más importantes que persigue este trabajo es el de crear una cartografía útil capaz de comunicar con claridad una zonificación del riesgo. Para ello, se buscó una unidad de análisis que permitiera un detalle de análisis adecuado al ejercicio de planificación territorial que se estaba llevando a cabo; que tuviera una escala capaz de asumir los resultados de intensidad y probabilidad de las amenazas que se están evaluando espacialmente, o pudieran ser agregados o desagregados con garantías de validez estadística geoespacial; y que respondiera a una unidad territorial y estadística con datos sociales, económicos y ambientales disponibles.

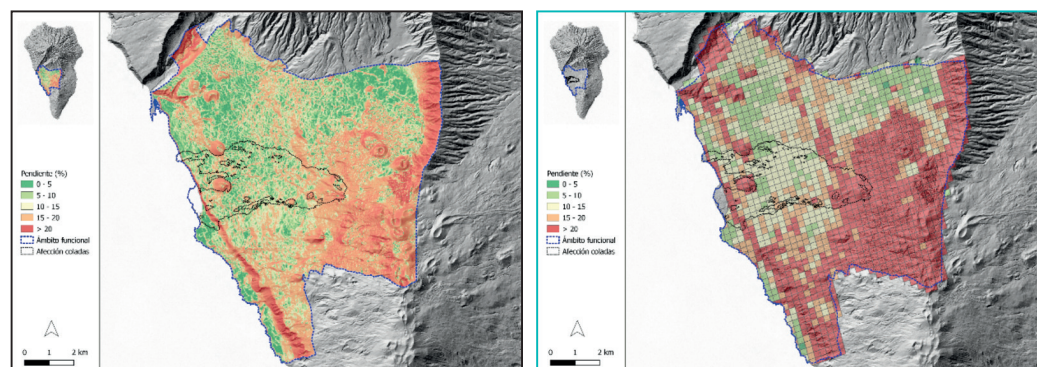
Finalmente, se optó por la malla estadística Eurostat adaptada a Canarias, ya que cumple con los tres requisitos planteados. La malla estadística se distribuye en el espacio de manera homogénea y resulta de enorme utilidad para asimilar estimaciones espaciales de fenómenos físicos y humanos. Asimilándose, en muchos casos, al tipo de trabajo que se puede desarrollar en formato ráster con Sistemas de Información Geográfica. La información se ofrece en el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS84 (World Geodetic System 1984, SRID:4326), utilizado por el Instituto Canario de Estadística (ISTAC), en varios formatos y con las celdas cortadas por una línea de costa generalizada. Los datos alfanuméricos están codificados en UTF-8 (ISTAC, 2022). Su superficie de

representación de 250 x 250 metros equivalentes a 62.500 m². En el contexto del área de estudio, esta unidad espacial permitió tomar decisiones para el ejercicio de planificación territorial inicial que se estaba desarrollando. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis más pormenorizados en los espacios seleccionados para la localización de escenarios urbanos.

La peligrosidad, generalmente computada a escalas de análisis de mucho mayor detalle, superior a 25 m. de celda, se agrega a estas celdas de mayor tamaño utilizando estadísticas de agregación espacial (Figura 4).

Figura 4. Agregación espacial de los valores de pendiente.

Fuente: MTRN (GOB-CAN 2022)



3) Análisis de condiciones de vulnerabilidad y exposición

La vulnerabilidad, componente fundamental del riesgo de desastre, suele ser determinante en la magnitud de los eventos catastróficos (Holand et al., 2011). Dado su carácter inherente al sistema humano, debe ocupar una posición central en el análisis del riesgo de un área determinada. En este contexto, la evaluación de la vulnerabilidad se apoya principalmente en metodologías basadas en indicadores (Sharma et al., 2017), los cuales abarcan una amplia gama de aspectos, desde características individuales como edad, origen, ingresos, salud o vivienda, hasta factores regionales relacionados con el modelo económico, la densidad de construcción, y la infraestructura y servicios (Yang et al., 2015). En el marco de este estudio, se propone una metodología semicuantitativa para calcular la vulnerabilidad física y social del área de estudio, que incluye la evaluación de la población, las edificaciones, la red vial, los cultivos, así como las principales infraestructuras y servicios.

Se han considerado una serie de variables cualitativas y cuantitativas de cada uno de ellos, consideradas cruciales para evaluar la vulnerabilidad. Tras analizar las características de estas variables, se han definido intervalos a los que se les asigna valores del 1 al 5, con el fin de establecer una escala uniforme que facilite comparaciones y agregaciones (Dai, Lee y Zhang, 2021). Es relevante mencionar que los límites de estos intervalos se han determinado mediante un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos, que incluyen la revisión de la literatura, la consulta a expertos y el análisis de las características territoriales, siguiendo la propuesta de Wang et al. (2008). El método propuesto aquí asigna un peso a cada variable en función de su relevancia, el cual se multiplica por el valor de vulnerabilidad asignado, según lo expresa la siguiente ecuación:

$$\text{Vulnerability} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{score}_i \times \text{weight}_i}{\sum_{i=1}^N \text{weight}_i}$$

Los elementos expuestos de los que se evaluó la vulnerabilidad se agrupan en las categorías de: población, de acuerdo a las variables de densidad, edad y procedencia (% de población extranjera); edificaciones, según su uso, antigüedad y densidad edificatoria; cultivos, en cuanto al tipo de cultivo, la superficie ocupada y el método de cultivo (regadío, secano); las carreteras, de acuerdo a la densidad de tráfico, el número de carriles, la categoría y el movimiento de mercancías peligrosas; los servicios, en base al tipo, por ejemplo, educativo, alojamiento, industrial, etc; y los ecosistemas, según el tipo de espacio natural, la biodiversidad, la fragmentación del hábitat y el estado de conservación (Tabla 1).

Las fuentes empleadas para cada categoría de variables proceden de la plataforma de datos abiertos del Gobierno de Canarias y el repositorio homónimo del Cabildo de La Palma (Open Data La Palma).

	Ponderación	Variable	Criterio	Valor vulnerabilidad					Peso
				1	2	3	4	5	
Población	0,4	Densidad población	hab/km2	<250	251-350	351-450	>450		0,4
	0,3	Edad	% < 14 y > 65 años	<20	21-30	31-40	> 40		
	0,1	Procedencia	% extranjeros	<20	21-30	31-40	> 40		
	0,3	Antigüedad	fecha construcción	>2000	1980-2000	1960-1980	1940-1960	<1940	
Edificaciones	0,2	Uso	tipo de uso	almacén/agrario	Cultural/deportivo/religioso	Ocio/hostelería/Industrial/oficinas	Residencial		0,3
	0,4	Densidad	nº edf	<50	50-100	100-500	500-1000	>1000	
	0,5	Tipo de cultivo	Categoría	familiar	otros cultivos	viña/aguacate	plátano		
Cultivos	0,3	Superficie	m2	<1000	1000-10000	10,000-50,000	>=50000		0,2
	0,1	Método de cultivo	Invernadero	Sí					
	0,1		Regadío	Sí					
	0,1	Densidad de tráfico	aforos	<1500	1500-3000	3000-5000	>5000		
Carreteras	0,2	Carriles	Número de carriles	3		1			0,2
	0,5	Categoría	Tipo de categoría	Pistas forestales	Urbano	Carretera secundaria	Carretera General		
	0,1	Mercancías peligrosas	toneladas permitidas	<100tn	>100tn				
	0,2	Centros sanitarios	Gestión	Cruz Roja	Resto				
Servicios	0,2	Centros sociales	Superficie	<300	300-500	500-1000	>1000		0,3
	0,2	Centros educativos	Superficie Solar	<300	300-500	500-1000	>1000		
	0,1	Puertos y aeropuertos	Presencia	Sí					
	0,1	Servicios de emergencia	Nivel de importancia	Municipal	Comarcal	Insular			
	0,05	Cementerio	Nivel de importancia	Otros	Municipal				
	0,05	Tanatorio	Sup cubierta	<50	50-100	100-300	>300		
	0,1	Gasolineras	Presencia	Sí					
	0,2	Alojamientos	Nº plazas	<50	50-100	100-200	>200		
	0,1	Lonjas y mercados	Gestión	PRIVADA	MUNICIPAL				
	0,1	Zonas industriales	Tipo	Almacenamiento	Producción otros	Producción bienes esenciales			
	0,1								
Ecosistemas	0,2	ENP	Categoría ENP	Ninguna	Paisaje Protegido	Monumento Natural	Parque Natural		0,1
	0,2	Biodiversidad	NPP (unidades de masa de CO2)	Menor valor			Mayor valor		
	0,1	Hábitat	Fragmentación del Hábitat	Fragmentación total					
	0,1	Estado de conservación	Índice de naturalidad	Artificial			Natural		

Tabla 1. Vulnerabilidad. Muestra de organización de criterios y ponderaciones utilizados.

Fuente: MTRN (GOB-CAN 2022)

4) Integración de amenazas, cálculo y zonificación del riesgo

La incidencia de cada amenaza en el territorio varía significativamente, tanto en términos de sus períodos de retorno como en su capacidad para causar daños. Por consiguiente, es común que algunas amenazas sean más críticas que otras, y es importante asignarles pesos diferentes según su importancia relativa (Bani-Mustafa et al., 2020). En este estudio, para determinar la importancia relativa de las diferentes amenazas, se empleó el Índice de Probabilidad-Daño, tal como se describe en el Plan de Emergencias Territorial de Canarias (PLATECA, 2015). Este índice tiene como objetivo evaluar la peligrosidad de cada amenaza en función de la magnitud de los daños que puede provocar y sus períodos de recurrencia correspondientes (Tabla 2), asignando un valor numérico a cada variable. Al multiplicar los valores asignados para cada amenaza, se obtiene un nivel de peligrosidad que facilita la comparación y la clasificación de las amenazas de mayor a menor riesgo.

Tabla 2. Matriz para el cálculo de Índice de riesgo.

Fuente: Elaboración propia. Cátedra Reducción de Riesgos de Desastres.

Amenaza	I.Probabilidad	I. Daño	I.Riesgo	Ponderación
Inundaciones	3	2	6	0,2
Movimiento de ladera	4	1	4	0,2
Coladas de lava	1	7	7	0,3
Terremoto	1	1	1	0,1

De este modo, el índice respondería a la siguiente ecuación:

$$HI = PI * DI$$

Donde HI es el índice de peligrosidad; PI el índice de probabilidad y DI el índice de daño.

Para establecer el valor del índice atribuido a cada una de las amenazas se ha llevado a cabo un trabajo de consulta bibliográfica (Dorta 2007; Llorente, 2014; López-Saavedra and Martí, 2022). Teniendo en cuenta estos datos, se obtiene el orden de prioridad de cada amenaza y su índice de peligrosidad (HI), a partir del que se asignan las ponderaciones adecuadas para integrar todas las amenazas del área de estudio.

Una vez integradas las amenazas, tanto desde el punto de vista espacial como se realiza el análisis del riesgo. Para ello, en este estudio se emplea la siguiente ecuación (Johnson et al., 2016):

$$R = E(V) \times A$$

Dónde R es el índice de riesgo, E (V) son los elementos expuestos valorados según la vulnerabilidad y A la valoración multi-amenaza producto de la adición integrada del valor de peligrosidad de cada amenaza multiplicada por los valores de ponderación (Tabla 2).

5) Simulación del riesgo en bolsas de suelo propuestas

Una vez obtenida la graduación espacial del riesgo para el estudio, se realizan una serie de análisis complementarios sobre una serie de regiones determinadas propuestas como bolsas de suelo para diferentes usos y actividades. Entre ellas, la más importante, la relocalización de usos residenciales perdidos durante el desastre. Para ello se realiza una simulación de usos de suelo con una ordenación orientada por criterios de sostenibilidad donde también se tienen en cuenta criterios de reducción del riesgo como la orientación a procesos de evacuación. Se realizan evaluaciones de vulnerabilidad basados en estos escenarios simulados de ocupación del suelo y se lleva a cabo un análisis del riesgo empleando la misma metodología aplicada al área de estudio.

Las bolsas de suelo se proponen en localizaciones situadas en las entidades poblacionales de La Laguna, La Asomada y Las Norias. Para su localización se tuvo en cuenta el criterio general producido por el análisis espacial multi-amenaza, sin embargo, también tienen influencia factores de accesibilidad y, sobre todo, los deseos de la población afectada quien durante los talleres informativos expresaban sus preferencias para la relocalización de sus hogares, después de recibir información sobre diferentes criterios entre los que los riesgos de origen natural tenían un papel fundamental.

4. RESULTADOS

Integración de las amenazas

La peligrosidad, fruto de la integración de las cuatro amenazas aportadas por los otros grupos de trabajo, tiene un comportamiento heterogéneo en el ámbito de estudio. Como se aprecia en la Figura 5, los menores niveles de peligrosidad se encuentran en la zona norte del Valle de Aridane, y conforme nos desplazamos hacia el sur la peligrosidad aumenta. Esto se debe a la importancia de las coladas en este análisis y la aparición de estas principalmente en la zona sur. Mientras que en el sector norte predomina el peligro de inundación y movimientos de laderas, en el sur lo hacen las coladas de lava y los sismos.

El riesgo aparece muy influido por el peligro de coladas al sur del área de estudio. Los movimientos de ladera y las inundaciones caracterizan el riesgo al norte de la zona afectada por la erupción.

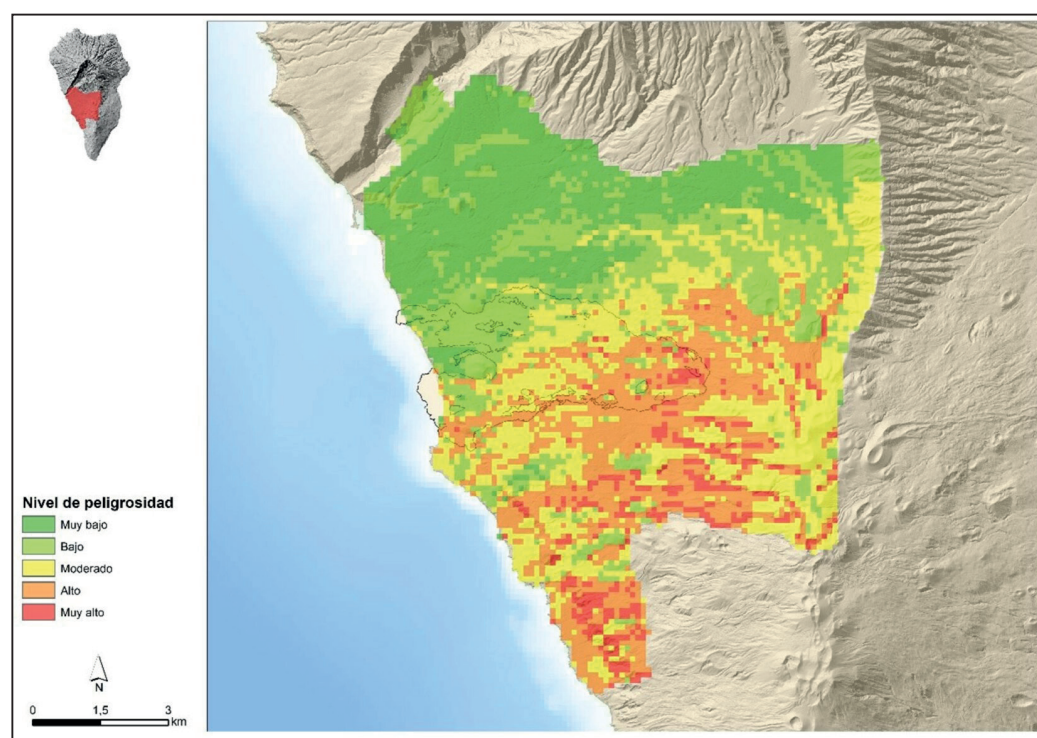


Figura 5. Grados de peligrosidad multi-amenaza para el área de estudio.

Fuente: MTRN (GOB-CAN 2022)

Análisis de las condiciones de vulnerabilidad exposición

Tras el proceso de selección de los elementos vulnerables en el área de estudio, con su posterior descripción de los criterios elegidos para la selección de

Altos niveles de vulnerabilidad en zonas urbanas y costeras

las variables y, siguiendo los pasos que se han descrito en la metodología, se han obtenido los resultados del análisis de vulnerabilidad de cada uno de los elementos individualizados. Como se observa en la Figura 6 la distribución de las celdas respecto a la población se ciñe mayoritariamente al norte y noroeste, donde se sitúan los núcleos de los municipios de Los Llanos de Aridane, seguido de El Paso y Tazacorte. De igual manera, aquellas celdas de valor muy alto corresponden con el casco central de Los Llanos de Aridane, donde se concentra la mayor densidad de población. Al sur de la colada estarían representadas otras áreas de población que corresponden al barrio de Las Manchas y Jedey, pertenecientes al municipio de Los Llanos de Aridane, ayuntamiento que recoge la mayor cantidad de habitantes de la isla.

En cuanto a edificaciones, destaca la franja situada en medianías, principalmente con valores medios de vulnerabilidad. Los valores bajos son prácticamente inapreciables, sin embargo, en el centro de Los Llanos resalta una zona con estos. Del mismo modo, existen extensas zonas donde convergen varias celdas con niveles muy altos. Esto sucede principalmente en la costa, en la franja situada entre La Bombilla y El Remo y en los alrededores del Puerto de Tazacorte (Figura 6b). Por otro lado, observando el análisis de vulnerabilidad realizado para la infraestructura viaria (Figura 6c) se observa como predominan celdas con nivel medio de vulnerabilidad. Estas se corresponden con zonas donde confluyen, principalmente, pistas forestales, caminos o sendas, que, si bien a priori no son redes importantes, durante una emergencia pueden ser decisivas y utilizadas como vías alternativas, tal y como pasó durante esta última emergencia volcánica. No obstante, los niveles más altos de vulnerabilidad corresponden con las principales vías de comunicación y acceso al Valle. Teniendo en cuenta esto, en el mapa se puede distinguir claramente dónde se sitúan las carreteras generales (LP-2 y LP-3), las secundarias, como la que da acceso a Puerto Naos (LP-213) y parte del trazado urbano de los núcleos de Los Llanos y El Paso.

Menores niveles de vulnerabilidad de cultivos en zonas altas

El análisis de vulnerabilidad de los cultivos establece que en el ámbito de estudio, más de tres cuartas partes de las celdas tengan un nivel igual o mayor al medio. Una gran proporción de celdas de valor muy alto, se agrupan mayoritariamente en la región costera, donde se sitúan principalmente los cultivos de plataneras, principal cultivo del Valle y de la isla. Además, se cuantifican también otro tipo de cultivos como la viña o el aguacate, entre otros, así como aquellos de ámbito familiar o privado, que, aunque constan de menor valor son también de importancia en el cálculo de la vulnerabilidad (Figura 6e). A medida que se asciende en altitud, el nivel de vulnerabilidad va disminuyendo, siendo el valor medio el predominante en las medianías de la zona. A grandes rasgos, las celdas con un nivel bajo o medio corresponden con núcleos urbanos o zonas de pinar.

La Figura 6d muestra la predominancia de niveles bajos de vulnerabilidad en las infraestructuras y servicios. No tanto debido a la poca vulnerabilidad sino a que estos se sitúan agrupados en torno a las principales zonas urbanas, lugar donde, precisamente, se produce un aumento de la vulnerabilidad. De igual manera,

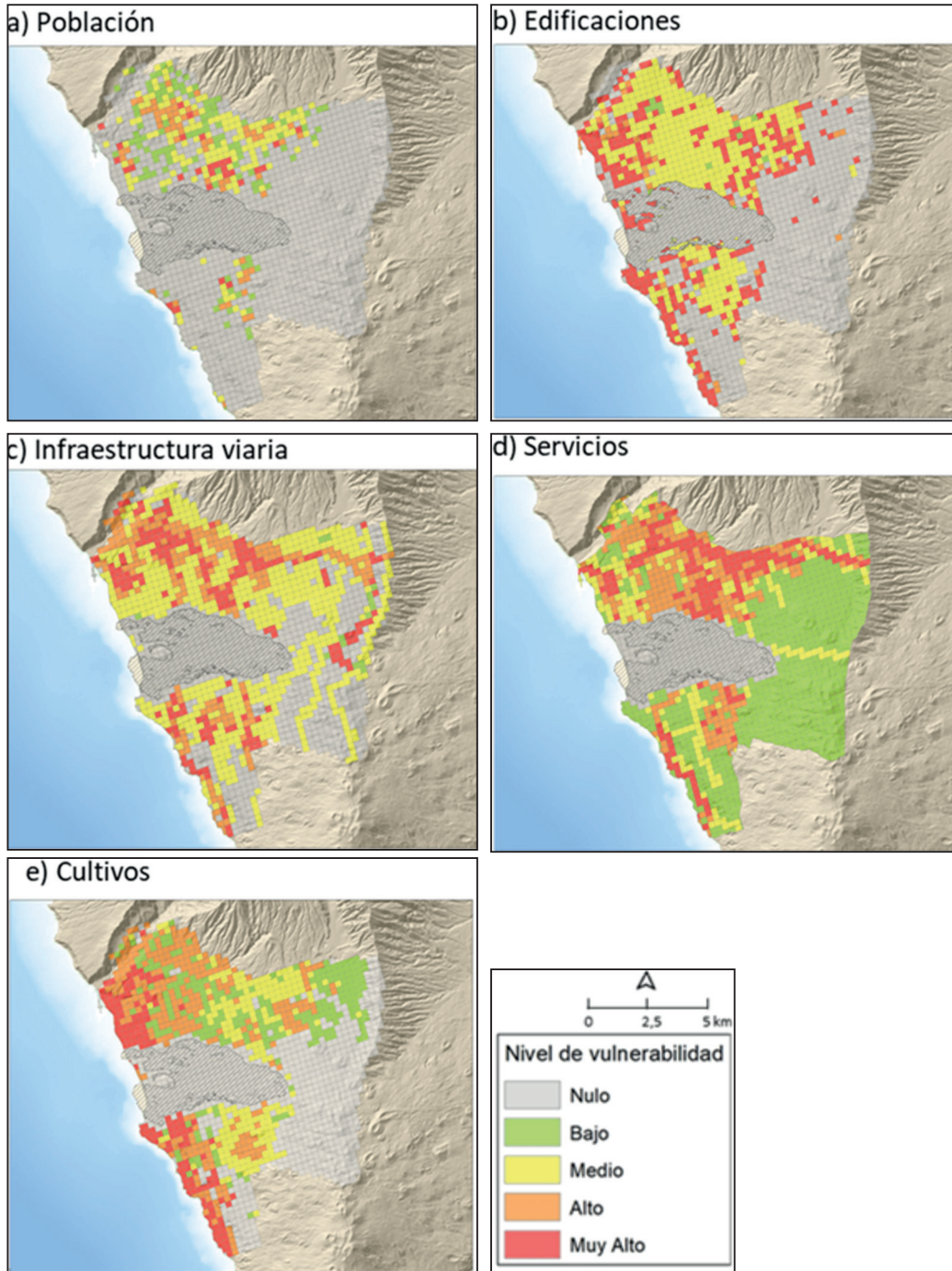


Figura 6. Niveles de vulnerabilidad de cada uno de las categorías analizadas.

Fuente: MTRN (GOB-CAN 2022)

no hay que olvidar que la vulnerabilidad obtenida corresponde al conjunto de equipamientos y servicios, incluidos la energía y la red de abastecimiento. Por ello, las zonas con vulnerabilidad en las mayores altitudes, en las proximidades a Cumbre Nueva, se deben a que es donde se localizan las redes de distribución de las mismas.

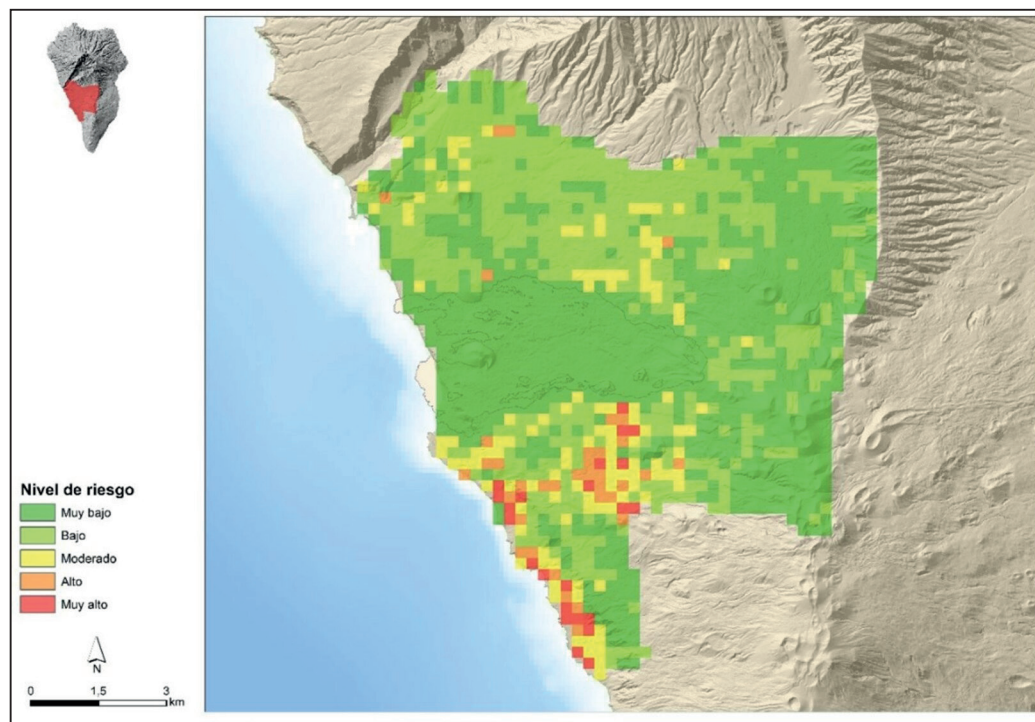
Cálculo y zonificación del riesgo

Los resultados finales muestran que, en la zona sur, destaca el riesgo por coladas de lava y la susceptibilidad sísmica. En cambio, en el norte, se encuentran

pequeñas zonas donde existe riesgo de inundación, especialmente en torno al barranco de Las Palomas, el cual ya ha sufrido inundaciones históricas. Por su parte, el riesgo de movimientos de ladera se sitúa en torno al límite del edificio Bejenado debido a las importantes pendientes y el alto grado de exposición que hay al pie de este (Figura 7).

Figura 7. Zonificación del riesgo.

Fuente: MTRN (GOB-CAN, 2022)



Simulación del riesgo en bolsas de suelo propuestas

Para cada una de las propuestas de bolsas de suelo localizadas de acuerdo a lo indicado en el apartado metodológico, se realiza una simulación de la vulnerabilidad y un cómputo del riesgo, basado en una disposición aleatoria de elementos vulnerables que imitan a la trama urbana de otros espacios compactos existentes en el área de estudio (Figura 8).

Propuesta de bolsa de suelo en La Laguna

Con esta simulación se muestra una situación de riesgo alto. Dentro de la propia bolsa la zona con mayor riesgo es la más próxima a Montaña Laguna, por lo que, si fuese posible, habría que priorizar los nuevos asentamientos en la parte central de la misma, donde aparecen valores bajos y medios. El aumento del riesgo tiene que ver con la amenaza de inundación y la disposición aleatoria de los elementos vulnerables. Tomando medidas adecuadas de relocalización de usos podría reducirse la vulnerabilidad. La vulnerabilidad también se puede reducir utilizando tipologías constructivas resilientes, vías de transporte que faciliten la evacuación y evitando localizar infraestructuras críticas o servicios básicos en áreas de alta peligrosidad.

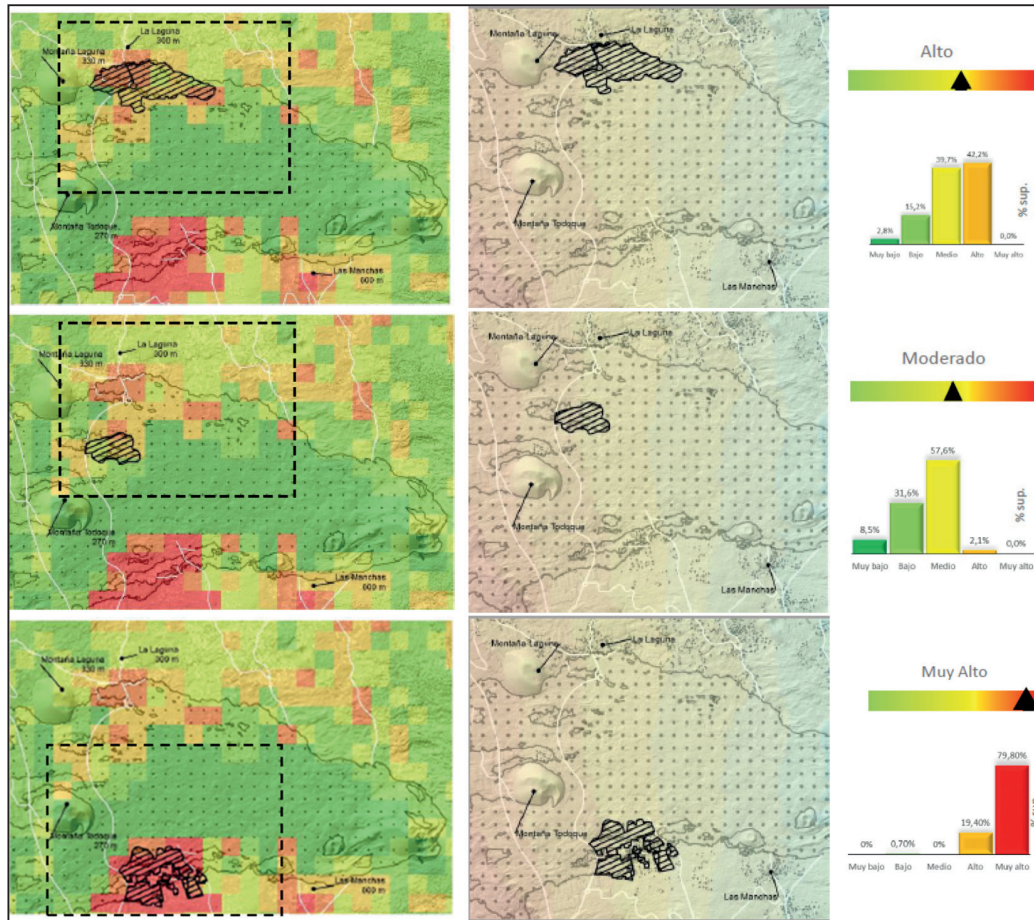


Figura 8. Riesgo simulado en bolsas de suelo. De arriba abajo: La Laguna, La Asomada, Las Norias.

Fuente: MTRN (GOB-CAN, 2022)

Propuesta de bolsa de suelo en La Asomada

Con esta simulación se muestra una situación de riesgo moderado. La mayoría de la superficie de la bolsa se encuentra en zona con riesgo medio o bajo. El riesgo se produce sobre todo por la simulación de coladas volcánicas en esta área dado los altos índices de apertura de bocas eruptivas en la zona.

La vulnerabilidad se puede reducir utilizando tipologías constructivas resilientes, vías de transporte que faciliten la evacuación y evitando localizar infraestructuras críticas o servicios básicos en áreas de alta peligrosidad.

Propuesta de bolsas de suelo en Las Norias

Esta es la bolsa en la que la simulación produce niveles de riesgo muy altos. La amenaza con mayor peligrosidad es la volcánica, por lo que la zona que se sitúa encima de las coladas es la más segura por encontrarse elevada respecto al resto del terreno. De las tres bolsas analizadas esta es la que mayor nivel de riesgo presenta debido a la confluencia de la alta peligrosidad y alta vulnerabilidad de la zona.

Las Norias, zona con mayor riesgo atendiendo a la simulación de usos en esta área

Aunque la vulnerabilidad se puede reducir siguiendo las mismas indicaciones que en los casos anteriores (tipologías constructivas, vías de transporte que

faciliten la evacuación y evitando localizar a toda la población vulnerable en el mismo sector, etc.), el nivel de amenaza sigue siendo considerable.

En caso de usar la bolsa para relocalizar a la población, se deberían priorizar las zonas con menos riesgo, en este caso, las situadas más al norte, dentro de las coladas de la reciente erupción.

5. CONCLUSIONES

Desafíos en la toma de decisiones: variabilidad de la peligrosidad y vulnerabilidad

Se ha llevado a cabo un análisis de riesgo multi-amenaza dentro del Marco Territorial de la Recuperación de la Normalidad de la isla de La Palma, concretamente de casi la totalidad de lo que se suele denominar el Valle de Aridane, situado en la vertiente sur occidental de la dorsal de Cumbre Vieja. El principal objetivo era contar con una herramienta válida de información que diera cuenta de los riesgos principales subyacentes durante los procesos de planificación territorial para la recuperación. Su práctica viene determinada por marcos de consenso internacional explicitados en guías que orientan la evaluación de necesidades post-desastre y sobre la recuperación de los mismos, así como otros destinados a realizar planificación territorial sostenible, como la Agenda Urbana Sostenible 2019. Todos ellos indican de manera expresa la exigencia ineludible de analizar los riesgos de origen natural, así como los detonantes del mismo durante los procesos de planificación y generación de estrategias de recuperación.

Seguridad y protección de la población ineludibles en la recuperación

El nivel de peligrosidad analizado para cada amenaza es muy heterogéneo para toda el área de estudio. Hay que destacar que la peligrosidad de coladas de lava aumenta al sur del área. Cada una de las amenazas tiene unos niveles de incertidumbre variables, así como una capacidad de daño y unos periodos de recurrencia diferentes, por lo que cuando se lleven a cabo medidas para la mitigación del riesgo debe analizarse cada zona y cada amenaza de manera independiente. Debe tenerse en cuenta que la cartografía resultante de riesgo multi-amenaza juega un papel muy importante en la toma de decisiones inicial, pero luego, al aumentar la escala de planificación, cada peligro debe volver a ser analizado.

Necesidad de planificación detallada con modelos actualizados

En la línea de toma de decisiones, es importante destacar que en los procesos de planificación de relocalización de nuevos asentamientos, infraestructuras o servicios en una zona de amenaza baja-media, es posible que el riesgo aumente por el incremento de la vulnerabilidad-exposición. El escenario simulado para las bolsas de suelo propuestas da cuenta de esta observación. Lo ideal, por tanto, es relocalizar los nuevos asentamientos en zonas con menor peligrosidad, de otra manera, debe señalarse el umbral de peligrosidad asumible y llevar a cabo una planificación encaminada a la reducción del riesgo donde primen los criterios de prevención y mitigación.

Los resultados del riesgo de las bolsas de suelo analizadas, arrojan los lugares más y menos idóneos dentro de ellas para localizar usos de suelo y actividades.

No obstante, y así se llevó a cabo posteriormente, se hace necesario sustituir las simulaciones por la ordenación pormenorizada planteada y volver a ejecutar el modelo de cómputo aquí mostrado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bani-Mustafa, T., Zeng, Z., Zio, E., & Vasseur, D. (2020). A new framework for multi-hazards risk aggregation. *Safety science*, 121, 283-302. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.043>
- Dai, F. C., C. F. Lee, and X. H. Zhang (2001). GIS-based Geo-environmental Evaluation for Urban Land-Use Planning: A Case Study. *Engineering Geology* 61 (4). 257–271. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00028-X)
- De Angeli, S., Malamud, B. D., Rossi, L., Taylor, F. E., Trasforini, E., & Rudari, R. (2022). A multi-hazard framework for spatial-temporal impact analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73, 102829. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102829>
- Dorta, P. (2007). Catálogo de riesgos climáticos en Canarias: amenazas y vulnerabilidad. *Geographica*, (51), 133-160.
- Dorta, P., López-Díez, A., Díaz-Pacheco, J., Mayer, P., & Romero, C. (2020). Turismo y amenazas de origen natural en la Macaronesia. Análisis comparado. *Cuadernos de turismo*, (45), 61-92. <https://doi.org/10.6018/turismo.426041>
- Eshrati, L., Mahmoudzadeh, A., & Taghvaei, M. (2015). Multi hazards risk assessment, a new methodology. *International Journal of Health System and Disaster Management*, 3(2), 79. <https://doi.org/10.4103/2347-9019.151315>
- Gill, J. C., and B. D. Malamud (2014). Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards, *Rev. Geophys.*, 52,680–722, <https://doi.org/10.1002/2013RG000445>
- GFDRR (2013). *Post-disaster Needs Assessments. Volume A*.
- GFDRR (2015) *Guía para desarrollar Marcos de Recuperación de Desastres. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery*, <https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/drf-guide-espanol.pdf>
- GOBCAN (2021) La erupción de La Palma se declara finalizada tras 85 días. (s.f.). <https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/la-erupcion-de-la-palma-se-declara-finalizada-tras-85-dias-y-8-horas-de-duracion-y-1-219-hectareas-de-coladas/>

- GOBCAN (2022) Marco Territorial para la Recuperación de la Normalidad tras la Erupción. <https://lapalma.planderecuperaciondecanarias.es/prclp/> [accedida el 12 de abril de 2024]
- González de Vallejo, L; Rodríguez Losada, J.A.; Hernández Gutiérrez, L.E.; Miranda Hardisson, A. (2022). *Objetivo 1. Evaluación preliminar de la estabilidad del edificio volcánico principal y el campo de cenizas circundante*. Instituto Volcanológico de Canarias. https://minioapi.devops.grafcan.es/prclp/230629_04_involcan-001.pdf [accedida el 12 de abril de 2024]
- Holand, I. S., Lujala, P., & Rød, J. K. (2011). Social vulnerability assessment for Norway: A quantitative approach. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 65(1), 1-17. <https://doi.org/10.1080/00291951.2010.550167>
- Johnson, K., Depietri, Y., & Breil, M. (2016). Multi-hazard risk assessment of two Hong Kong districts. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 19, 311-323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.08.023>
- Llorente Isidro, M. (2014). Evaluación cuantitativa de pérdidas por peligros geológicos. Caso del archipiélago de Canarias: Inundaciones, sismicidad y vulcanismo (Doctoral dissertation, ETSI_Energía).
- López-Saavedra, M., & Martí, J. (2022). Reviewing the multi-hazard concept. Application to volcanic islands. *Earth-Science Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104286>
- MITMA (2019) *Agenda Urbana Española 2019*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana,
- ONU (2015) Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres. 2015-2030*, <https://www.refworld.org/es/ref/confdoc/undrr/2015/es/127880> [accedida el 13 de abril de 2024]
- PLATECA (2015) Plan Territorial de Emergencia de Protección Civil de la Comunidad Autónoma de Canarias (PLATECA). (BOC nº 104 de 2 de junio de 2015)
- Sharma, J., Upgupta, S., Jayaraman, M., Chaturvedi, R. K., Bala, G., & Ravindranath, N. H. (2017). Vulnerability of forests in India: a national scale assessment. *Environmental management*, 60(3), 544-553. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0894-4>
- Yang, S., He, S., Du, J., & Sun, X. (2015). Screening of social vulnerability to natural hazards in China. *Natural Hazards*, 76(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1225-1>



Cultivos actuales de viña en Llanos Negros y Los Quemados, Fuencaliente.

Borrador del Plan Especial del Paisaje Protegido de Tamanca, La Palma

Autor: Equipo redactor del Plan