GRADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

Curso 2019-2020

Análisis del trazado de las coladas de lava a través de simulaciones en Cumbre Vieja, La Palma

Realizado por: Nerea Martín Raya

Dirigido por: María del Carmen Romero Ruiz y

Jaime Díaz Pacheco

Universidad de La Laguna

ÍNDICE

RESUMEN 3

1. INTRODUCCIÓN 5

1.1. Objetivo e hipótesis 5

1.2. Fuentes y metodología 6

1.3. Antecedentes 10

2. RESULTADOS 13

2.1. Resultados de la fase exploratoria 13

Las coladas de lava como peligro volcánico 13

Contexto geológico y características del volcanismo histórico 15

Estudio del relieve y el contexto topográfico 20

Contexto geográfico 23

2.2. Puntos de emisión y parámetros morfométricos utilizados 28

Establecimiento de los puntos de emisión 28

Parámetros morfométricos utilizados 31

3. SIMULACIONES 33

4. GENERACIÓN DE ESCENARIOS GEOGRÁFICOS 35

4.1. Escenario nº 1 (zona sur) 35

4.2. Escenario nº2 (vertiente este) 37

4.3. Escenario nº3 (vertiente oeste) 40

4.4. Escenario nº 4 (ambas vertientes) 43

5. DISCUSIÓN 46

6. CONCLUSIONES 49

7. BIBLIOGRAFÍA 50

ANEXO CARTOGRÁFICO 56

RESUMEN: En islas volcánicas con volcanismo activo y exposición de bienes, personas e infraestructuras, las acciones de reducción del riesgo de desastres cobran especial relevancia. Entre los diferentes peligros asociados a la amenaza volcánica, el flujo de coladas es uno de los que generalmente se tiene en cuenta, sobre todo en relieves de pendiente importante y topografía compleja. En estos ámbitos, durante un evento eruptivo pueden producirse interferencias entre la circulación de las coladas con los mencionados elementos vulnerables expuestos, que pueden ocasionar diferentes daños y afecciones.

Este trabajo, a través de una aplicación integrada en un sistema de información geográfica, realiza la simulación de flujos lávicos desde una serie de centros de erupción probables localizados en Cumbre Vieja (La Palma, Islas Canarias), para posteriormente estudiar el trazado de las lavas y analizar sus implicaciones espaciales.

Este análisis se realiza obteniendo como resultado una serie de escenarios geográficos que tendrían utilidad desde el punto de vista de la reducción del riesgo y la planificación de emergencias.

Los resultados muestran para la dorsal volcánica de Cumbre Vieja, cuatro escenarios geográficos que responden a distintos grados de complejidad desde el punto de vista del riesgo volcánico y con relación al peligro por flujo de coladas, definidos en gran parte por la localización de los posibles centros eruptivos (zona Sur; vertiente Este; vertiente Oeste; ambas vertientes) y por la exposición de elementos vulnerables.

PALABRAS CLAVES: dorsal volcánica, escenario geográfico de peligro, simulación, flujo lávico, Q–LAVHA

ABSTRACT: In volcanic islands with active volcanism and high exposure of people, infrastructures and assets, the disaster risk reduction actions are extremely relevant. Between the different hazards linked to the volcanic threat, the lava flow is one of the most pointed out, specifically in sloped sites with a complex relief. Precisely, spatial interferences between the lava flow and the mentioned vulnerable exposed elements could take place and produce different damages and effects.

Through an application integrated in a Geographical Information System software, this works attempts to simulate lava flows from hypothetical eruptions located

in a set of likely vents in Cumbre Vieja (La Palma, the Canary Islands). Subsequently the lava flow paths and its spatial implications were analysed. Finally, a set of geographic scenarios were obtained from the analysis that would be useful for risk reduction strategies and emergency planning.

The outcomes show for Cumbre Vieja volcanic rift four geographic scenarios with different degree of complexity from the point of view of the volcanic risk and related to the lava flow hazard. The scenarios are mainly defined by the location of the probably vents (South area; East slope; West slope and both slopes) and the exposition of vulnerable elements.

KEY WORDS: rift, geographic danger stages, simulation, lava flow, Q–LAVHA

1. INTRODUCCIÓN

Una dorsal volcánica es una estructura formada a partir de un conjunto de edificios volcánicos de carácter monogénico en un periodo dilatado de tiempo. En este sentido, Cumbre Vieja es una dorsal localizada en el sur de la isla de La Palma dispuesta en dirección N – S. Este trabajo, estudia esta dorsal debido a que se corresponde con la zona volcánica más activa de las Islas Canarias, al concentrar siete de las trece erupciones históricas que han tenido lugar en el archipiélago (Romero, 2000).

El estudio centra su atención en el establecimiento de futuros centros de emisión para la simulación de flujos lávicos a través de la utilización de la herramienta Q–LAVHA 3.0 (*Quantum–Lava Hazard Assessment*). A partir de ello, se pretende llevar a cabo un ejercicio teórico-práctico que permite la caracterización de diversos escenarios geográficos a partir del estudio de los posibles trazados de los flujos lávicos obtenidos mediante simulaciones. De este modo, para analizar las implicaciones espaciales, se han tenido en cuenta algunas variables territoriales como: el poblamiento, en su mayoría disperso por las medianías de la dorsal; la estructura del viario, cuyo eje principal rodea la dorsal; los cultivos, que destacan en las islas bajas; y la masa forestal, identificada como un bosque de pinar, que caracteriza los sectores de mayor altitud de Cumbre Vieja, pues estos elementos son los que mejor definen el espacio geográfico de cara a la planificación y la gestión de la emergencia en caso de una crisis eruptiva.

Es conveniente señalar que, en el presente estudio no se han tenido en cuenta otro tipo de materiales eruptivos como cenizas o piroclastos.

1.1.Objetivo e hipótesis

El objetivo de este trabajo es conocer y estudiar el trazado de las coladas de lava basálticas en el caso de una posible erupción volcánica en la dorsal de Cumbre Vieja en La Palma a través del establecimiento de simulaciones, basándose en un Modelo Digital del Terreno y la utilización de una aplicación de uso libre denominada Q-Lavha, la cual funciona integrada en software de Sistema de Información Geográfica.

Como hipótesis de partida buscamos constatar si los resultados obtenidos de los trazados de las coladas de lava, realizados mediante simulaciones, pueden ser utilizados

para definir escenarios geográficos, que posteriormente puedan ser aprovechados en la planificación territorial y en la gestión de las emergencias.

1.2.Fuentes y metodología

Fuentes

El trabajo emplea fuentes de información que se vinculan, por un lado, con el requerimiento de datos geográficos que demandan las aplicaciones utilizadas para la simulación de las erupciones y específicamente de las coladas de lava, y por otro, con el fondo teórico y técnico del estudio. De esta manera, nos referimos a la literatura que envuelve el uso de estas herramientas informáticas, sumadas a toda una serie de consultas bibliográficas utilizadas para la aproximación al área de estudio, sus características geográficas y geológicas y fundamentalmente al estudio del comportamiento del volcanismo histórico en la zona.

Respecto a los datos geográficos, la principal fuente utilizada para llevar a cabo este trabajo ha sido un Modelo Digital del Terreno de celdas 5 x 5 m (MDT05) disponible en los datos abiertos del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Por otro lado, para la salida gráfica final de los resultados obtenidos se ha utilizado el modelo digital de sombras disponible en el listado de servicios del IDECanarias. Para el análisis de las implicaciones territoriales de cada uno de los escenarios geográficos establecidos se han considerado una serie de variables territoriales que son utilizadas como elementos significativos y que permiten un acercamiento somero al espacio geográfico. Estas variables incluyen: la capa de poblamiento del Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 (BTN25) del IGN; y el mapa de cultivos de la isla de La Palma descargable desde la plataforma de datos abiertos del Gobierno de Canarias (SITCAN); la red de carreteras de La Palma, obtenida a través de la plataforma de datos abiertos del Cabildo de La Palma y el mapa forestal de España a escala 1:50.000, publicado por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Por último, en relación con la bibliografía consultada para las características geográficas, geológicas y el comportamiento del volcanismo histórico de la zona, se han empleado diferentes artículos y publicaciones que se detallarán en el apartado de antecedentes.

Metodología

Este estudio utiliza un método empírico–analítico, a través del cual se pretenden establecer las relaciones esenciales existentes entre los datos obtenidos mediante las simulaciones del trazado de las coladas y las observaciones obtenidas del análisis de determinados elementos territoriales que configuran los espacios geográficos de la dorsal de Cumbre Vieja. La aplicación de este método se basa en 5 fases:

a) Determinación del tema.
b) Fase exploratoria.
c) Fase de simulación y definición de los escenarios geográficos.
d) Fase de análisis.
e) Establecimiento de conclusiones.

a) Determinación del tema

El primer paso para poder comenzar a desarrollar el trabajo, al igual que en cualquier otra investigación científica, es determinar el tema que se va a tratar y establecer los objetivos y la hipótesis de partida. Esto último se hace esencial pues permite orientar el trabajo y no desviarse de la idea principal que se quiere tratar.

b) Fase exploratoria

Consiste en una primera aproximación científica al tema de estudio, con relación con los objetivos principales y secundarios planteados en el trabajo. Esta aproximación se ha llevado a cabo desde dos perspectivas distintas: una teórica relacionada con el acopio de información acerca del área de estudio; y otra empírica-descriptiva mediante la cual se imita el comportamiento de las coladas emitidas en una erupción, a través modelos de simulación de calibración empírica (se modifican parámetros de manera empírica hasta alcanzar una similitud razonable con el objeto simulado); y se establecen relaciones descriptivas sobre la relación de las coladas simuladas con la geografía del entorno.

Durante esta fase se realiza la búsqueda y consulta de información sobre trabajos relacionados con el objetivo principal y los secundarios planteados, tanto desde la perspectiva teórica como con aquellas cuestiones relacionadas con la técnica de simulación empleada. Del mismo modo, aquí se determina la necesidad de simular los posibles caminos seguidos por los flujos de lava en la dorsal de Cumbre Vieja, para

posteriormente trabajar las diferentes implicaciones o escenarios geográficos propuestos en nuestro objetivo.

c) Fase de simulación y definición de los escenarios geográficos

Esta fase posee una gran carga técnica, ya que comprende tanto el desarrollo de las simulaciones de flujos de lava como el consiguiente análisis de los rasgos que definen cada uno de los escenarios geográficos.

Selección de la aplicación para la simulación de coladas de lava

Una vez analizados en la fase uno los requerimientos necesarios para llevar a cabo la elaboración de escenarios de peligro a través de la simulación de flujos de lava en la dorsal de Cumbre Vieja, se pasan estudiar las posibles herramientas que permitirían alcanzar los objetivos propuestos. En este sentido, se identifica el software VORIS (Felpeto, 2009) como una posibilidad técnicamente accesible puesto que había sido aplicado previamente con resultados científicos muy satisfactorios en ámbitos territoriales diversos entre los que se encuentran algunas islas del archipiélago canario (Martí et al., 2012; Sciani et al., 2014; Syavulisembo et al., 2015; Becerril et al., 2017). Sin embargo, la aplicación Voris resulta en la actualidad, no sólo difícil de obtener, sino también de utilizar pues sólo es compatible con una versión, ya muy desfasada del ARCGis, (ArcGis 8.0.)

Durante el proceso de búsqueda y análisis de los requerimientos de VORIS, se descubre que los algoritmos implementados en el mismo habían sido actualizados para su uso en QGIS de licencia libre y cuya funcionalidad había mejorado (Mossoux et al., 2016). Esta aplicación se denomina Q-LAVHA 3.0 y es compatible con versiones de QGIS 3. Se trata de una aplicación que corre en un entorno SIG, es gratuita y simula la probabilidad de invasión de un flujo de lava “aa”. Este modelo es útil para la isla de La Palma debido a que una buena parte de las coladas emitidas durante las erupciones históricas de la isla poseen rasgos aa; las pahoehoe solo han sido descritas para algunas coladas del Volcán de San Martín de Tigalate, correspondientes a centros efusivos localizados en la costa y en algunos sectores localizados de las coladas de la erupción de 1949, fundamentalmente en los canales de lava de los flujos que discurrieron por la vertiente occidental de la isla durante la erupción. El modelo simula la invasión de los flujos a partir del establecimiento de puntos de emisión en un Modelo Digital de Elevaciones (DEM). Además, combina tres modelos probabilísticos de longitud máxima

(Manhattan y euclidiana) y probabilidad decreciente; y un modelo determinista denominado FLOWGO (Felpeto et al., 2001; Harris y Rowland, 2001) (http://we.vub.ac.be/en/q-lavha). Entre estos modelos se ha utilizado el modelo probabilístico de longitud máxima euclidiana por razones que veremos más adelante.

Esta aplicación tiene la ventaja de que requiere unos parámetros mínimos sobre las características físicas de la lava, y evita el determinismo de los modelos que se basan excesivamente en el factor de gravedad, siendo capaz de realizar simulaciones con alto grado de similitud a una colada real.

Parámetros y procedimientos para la simulación

El Q-LAVHA incorpora un algoritmo que permite evaluar la precisión de los flujos de lava simulados a partir de la comparación con uno existente conocido mediante el umbral de ajuste (*fitness index*). Por lo que, un paso previo a la realización de las simulaciones fue la calibración de los parámetros (Cuadro 1) utilizados para conseguir una buena bondad de ajuste mediante un método empírico de prueba–error.

Parámetro	**Significado**
Hc	Espesor de la colada
Hp	Factor de corrección, capacidad de la colada para sobrepasar obstáculos
Longitud euclidiana	Longitud máxima en línea recta desde el punto de emisión hasta el frente de la colada)
Umbral	La probabilidad mínima considerada en el resultado de la simulación (%). Solo los píxeles con probabilidades superiores al umbral definido se muestran en el mapa
Interacciones	Número de líneas de flujo de lava estimadas

Cuadro 1.Parámetros morfométricos utilizados para la realización de las simulaciones.

A continuación, se procedió al establecimiento de los puntos de arranque a partir de los cuales se simulan los flujos de lava. Para ello, en primer lugar, se llevó a cabo la

identificación y cartografía de los puntos de emisión existentes en la dorsal de Cumbre Vieja, a partir del cual se elaboró un análisis kernel de las áreas de mayor densidad de puntos de emisión (DeBoer, 2015).. Tomando como base este análisis se procedió al establecimiento de los puntos de arranque de las coladas que debían ser utilizados para la simulación, y que fueron creados de manera manual a partir de unos criterios determinados que se nombrarán más adelante en el apartado de datos.

d) Fase de análisis

Una vez considerados todos los requisitos necesarios, se procedió a realizar la simulación de las coladas. A parir de estas simulaciones, se obtienen unas áreas que, como consecuencia de la adaptación de las coladas a la configuración topográfica de la dorsal, estas se derraman, mostrando modos de comportamiento muy similar (dirección de flujos, superficies ocupadas, trazados, etc). Para cada una de dichas áreas se consideró conveniente, seleccionar una serie de variables territoriales mínimas (núcleos de población, viario, cultivos y la masa forestal) que permiten obtener una visión general de la configuración del espacio geográfico. El conjunto de estas variables define así escenarios geográficos de diferente complejidad dentro de la dorsal de Cumbre Vieja, los cuales son descritos en este trabajo.

1.3.Antecedentes

Los caracteres geológicos generados durante la etapa histórica, y el conocimiento de los principales rasgos volcanológicos son esenciales de cara a obtener datos sobre el comportamiento y características de los procesos eruptivos y, en menor medida -debido a los importantes cambios que ha sufrido la isla en las últimas décadas-, sobre la vulnerabilidad del territorio. El conocimiento geológico de la isla de La Palma ha avanzado mucho desde el desarrollo de la erupción del Teneguía en 1971, habiéndose completado la cartografía geológica de la isla en los primeros años del siglo XXI con la aportación de trabajos como los de Carracedo (2008), Carracedo et al. (2001), Troll et al. (2016), Kügel et al. (1999, 2000, 2005) o Day et al. (1999).Del mismo modo, existen numerosos trabajos sobre las erupciones históricas de La Palma que permiten una aproximación a los rasgos característicos de estas (Romero et al., 1951; Benitez-Padilla, 1952; Afonso, et al 1974, Araña et al., 1974; Barker et al, 2015; Expósito, 1970; Hernández-Pacheco et al., 1982b; Martel San Gil, 1960; San Miguel de la Cámara et al., 1952; Klügel, 1999 y 2000; Romero, 1990 y 2000; etc.).

Para el estudio del riesgo volcánico es necesario conocer el pasado eruptivo de la zona de estudio. Así, la intensa actividad volcánica que tuvo lugar en toda Canarias en el siglo XVIII impulsó la difusión y mejora de conocimientos de los procesos volcánicos: sismos premonitores, apertura de fisuras, expulsión de materiales, etc. (Romero, 2016). En la mayoría de las erupciones históricas de Canarias hubo algún tipo de control de la emergencia por parte de las autoridades. Aunque en la mayoría de los casos éste se emprendió una vez comenzados los primeros signos de inestabilidad, hay cierta planificación de la misma. Para la erupción de 1730-1736 se creó una comisión de crisis con el fin de efectuar un control y seguimiento del proceso volcánico y se hizo un mapa que constituye el primer mapa de riesgo volcánico en Canarias (Romero, 2003). Del mismo modo, en 1793 tuvo lugar una crisis sísmica en El Hierro que llevó a plantearse a las autoridades, no solo los posibles escenarios eruptivos, sino también la evacuación completa de la isla. (Romero, 2016)

Hasta hace aproximadamente cuarenta años no se comenzó a abordar el estudio científico y sistemático de peligrosidad y riesgo volcánico en las Islas Canarias. Este tipo de estudios se ha abordado principalmente en las islas con volcanismo histórico de Tenerife (Soler et al., 1983; Araña et al., 2000; Carracedo et al., 2004), Lanzarote (Becerril et al., 2017; Felpeto et al., 2001; Carracedo et al., 1990a), La Palma (Marrero et al., 2019; Carracedo et al., 2003) y El Hierro (Becerril, 2014).

Los estudios geofísicos, petrológicos, geológicos y geomorfológicos se configuran como datos básicos para poder reconstruir la historia eruptiva y acometer el estudio de peligros. En este sentido encontramos autores como Felpeto (2009), Martí (1994a; 1994b; 2000), Carracedo et al. (2001, 2015a y 2015b), Becerril (2009; 2014), Troll et al., (2016) o instituciones como el IGME (Gómez, 2006) o proyecto como el de Riesgomap (2013). Del mismo modo, el volcanismo histórico fue objeto de estudio por parte de autores como Carracedo et al. (1991, 2003), Bonelli (1950) Hernández-Pacheco (1982a y 1982b), Martel (1960) y Romero (1990).

Las primeras evaluaciones llegaron en las últimas décadas del siglo pasado y, basándose en los conocimientos geológicos y en los datos de las erupciones históricas se realizaron investigaciones cualitativas del peligro potencial y posibles zonas donde se podrían desarrollar erupciones (Bravo, 1980; Alonso, 1986; Carracedo 1988; Martí et al., 1994). En esta época, la cartografía de riesgo estaba poco desarrollada y era muy exigua, aunque se pueden encontrar trabajos como los de Araña (1988) y Carracedo et

al (1990b). Del mismo modo se elaboró el primer mapa de amenazas volcánicas que se hizo en Tenerife publicado por Alonso (1980). El desarrollo tecnológico y el uso habitual de ordenadores permitió que desde el año 2000 empezasen a realizarse trabajos más concretos para analizar el riesgo volcánico del archipiélago a través de tesis doctorales y trabajos de investigación derivados (Becerril, 2014; Felpeto, 2009; Carracedo et al., 2004; Scaini, 2014) que formaron la base que permitiría desarrollar el análisis del riesgo potencial en futuros eventos. En 2007 el IGME elaboró el Mapa de Peligrosidad Volcánica de Tenerife. También a comienzos de esa centuria Carracedo y Tilling (2003) realizan el primer mapa de riesgo volcánico de la isla de La Palma.

Durante este periodo parte del estudio de los peligros volcánicos se realizó utilizando un entorno SIG. En este tema destacan los trabajos de Gómez (2006)y, sobre todo los de Felpeto (2009), que desarrolló en su tesis una herramienta para la generación de mapas de peligrosidad volcánica basada en modelos de simulación numérica, tanto para coladas de lava como para la dispersión y caída de cenizas. Para la elaboración de la peligrosidad asociada a los flujos lávicos utilizó dos modelos: uno de carácter determinista, que parte de la consideración de la lava como un fluido Bingham que se emplaza sobre un modelo digital de elevación, y considera la viscosidad y cizalla umbral en dependencia con la temperatura y su disminución por pérdida de calor por radiación; y otro de carácter probabilístico, basado en un algoritmo de Montecarlo, en el que se considera que los posibles caminos que puede seguir el flujo dependen únicamente de la topografía. Esta metodología fue aplicada al estudio de de la peligrosidad volcánica de Tenerife y Lanzarote. A partir de estos trabajos, Felpeto (2009) elaboró una herramienta en entorno SIG para la evaluación de la peligrosidad volcánica y la generación de escenarios eruptivos en la que se integran modelos numéricos adecuados a la metodología utilizada para el establecimiento de la peligrosidad. Esta herramienta denominada VORIS está diseñada para poder ser utilizada como una extensión para ArcGis. Además de este, existen otros trabajos relacionados con los sistemas de información geográfica como Becerril (2009); Scaini (2014); López et al. (2014); Martí et al. (2010). Del mismo modo, algo similar a lo que se pretende realizar en este trabajo ya ha sido utilizado por González (2014) para llevar a cabo un estudio sobre el trazado de las coladas a partir del establecimiento de puntos de emisión en otros entornos volcánicos de las islas (http://analisisterritoriales.blogspot.com/) Recientemente, cabe destacar a Marrero et al.

(2019) que desarrolla la metodología utilizada para la elaboración de los mapas de riesgo volcánico, disponibles en la plataforma Grafcan, del Gobierno de Canarias.

Todos estos estudios constituyen herramientas básicas para la realización de los Planes de Prevención y Planificación de Protección Civil. No obstante, tradicionalmente el análisis de los peligros y amenazas volcánicas se ha realizado, principalmente, desde una perspectiva científica. Si bien el Cabildo de Tenerife tiene desde hace años información sobre mapas de riesgo volcánico total, la perspectiva de los riesgos desde una óptica vinculada a la Ordenación del Territorio y Protección Civil es muy reciente, y surge la necesidad de elaborar los Planes de Actuación ante Riesgo Volcánico de Canarias, encomendados desde el PEVOLCA. En este sentido, en el año 2018 se aprobó el Plan de Emergencia Volcánica de Canarias (PEVOLCA) y el Plan de Actuación Volcánica de La Palma (PAIVPAL) se encuentra en fase de aprobación y el de Tenerife (PAIVTFE) está en su última etapa de elaboración.

2. RESULTADOS

2.1.Resultados de la fase exploratoria

Las coladas de lava como peligro volcánico

La evolución operada en la consideración de los riesgos y peligros en los últimos 40 años ha sido tan espectacular, que a lo largo de este periodo se ha producido un consenso internacional en la definición y aplicación de los términos básicos. Esos términos son los que se aplican en la actualidad de modo riguroso y diferenciado, independientemente del tipo de amenaza (UNISDR, 2009):

- Amenaza: fenómeno capaz de causar daños y pérdidas tanto humanas como materiales.
- Vulnerabilidad: elementos expuestos susceptibles a ser afectados por una amenaza.
- Riesgo: posibilidad de que se produzca un evento adverso sumado al impacto que produciría sobre los elementos expuestos, es decir, es la combinación entre amenaza y vulnerabilidad

A lo largo de este mismo periodo se han ido definiendo y caracterizando los distintos tipos de peligros vinculados con el volcanismo considerándose como un tipo de fenómeno multiamenaza (Figura 1) (Martí, 2017).

Aunque los peligros asociados al derrame de lavas rara vez amenazan la vida humana, suelen ser los más habituales y han caracterizado a todos los episodios volcánicos históricos de La Palma, siendo los que mayor impacto territorial han causado en la isla. Las coladas de lava son flujos compuestos por materiales fundidos que se emiten de manera más o menos tranquila y se derraman siguiendo la línea de máxima pendiente. Estas se comportan como fluidos plásticos Bingham, dependientes de su viscosidad, por lo que para poder avanzar es necesario que superen una altura crítica que venza la resistencia impuesta por la misma y permita su desplazamiento en función de la pendiente y la gravedad(Ortiz, 2000).

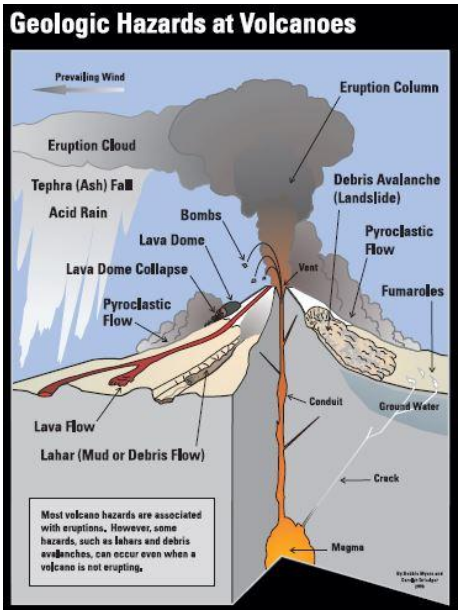


Figura 1. Esquema de la USGS (2008) de los distintos tipos de peligros vinculados con el volcanismo.

Los rasgos e impactos de una colada están determinados por una serie de factores como el tipo de magma, su viscosidad, duración de la erupción, velocidad de avance e interacción con el agua (Williams et al., 1979). De este modo, el comportamiento de las coladas y su derrame en áreas con rasgos topográficos diferentes y en contextos hidrogeológicos diversos determina la existencia de varios peligros asociados a su emplazamiento. Por ejemplo, cuando la lava discurre por un plano, se

derrama en todas las direcciones, mientras que al encauzarse por un barranco no se puede expandir lateralmente y recorre mayores distancias sin enfriarse.

Los peligros asociados al derrame y avance de las coladas están relacionados con sus efectos mecánicos y térmicos (Carracedo et al, 2015b). Entre ellos destacan los siguientes:

a) Desgasificación de la lava durante su emplazamiento.
b) Incendios en grandes masas forestales.
c) Colapso de los frentes de las coladas y generación de flujos piroclásticos.
d) Generación de bolas de acreción debido a fuertes rupturas de pendiente.(Goya, 2017)
e) Destrucción de todo lo que encuentran en su camino, incluyendo inmuebles e infraestructuras, por el emplazamiento directo de las coladas.
f) Procesos de inversión del relieve, que pueden suponer nuevas áreas de vulnerabilidad.
g) Peligros asociados con el contacto con agua (nubes de vapor, olas de agua calientes, colapso de deltas y plataformas lávicas, y formación de pseudocráteres explosivos)(https://volcanoes.usgs.gov/observatories/hvo/hawaii_ocean_entry.html)
h) Bloqueo de valles o barrancos que pueden desencadenar inundaciones.
i) Contacto de la lava con capas de hielo y nieve que provoca inundaciones repentinas, denominadas como jokulhlaups en Islandia (Bryant, 1991)

Contexto geológico y características del volcanismo histórico

La isla de La Palma presenta una planta que sigue una disposición meridiana en sentido N–S y está formada por dos estructuras poligenéticas, separadas por un collado pronunciado existente al sur de Cumbre Nueva; de un lado, el Volcán de Taburiente, actualmente extinto, y de otro la Dorsal de Cumbre Vieja, zona volcánica más activa de Canarias (Troll et al., 2016).

El escudo norte de la isla se encuentra formado por tres edificios superpuestos: un edificio submarino, que corresponde a la formación del Complejo Basal; y los volcanes subaéreos de Garafía, Taburiente y Bejenado. El edificio submarino de la isla (Figura 2)se comenzó a formar en El Plioceno, entre los 4 y los 2 millones de años

(Carracedo, 2008) y está constituido por sedimentos pelágicos, tobas palagoníticas (hialoclastitas), intercalados entre lavas submarinas (pillow lavas), que representan facies tanto de aguas poco profundas como profundas(Carracedo et al., 2016).Toda la formación está atravesada por numerosos diques basálticos y grabos intrusivos.(Fernández et al., 2002). Parte de esta formación emerge sobre el nivel del mar como consecuencia de la presión magmática de la atenosfera, formando un monte de 1500m.s.n.m que tiene una inclinación de 50º hacia el suroeste de carácter tectónico (Carracedo et al., 2001)

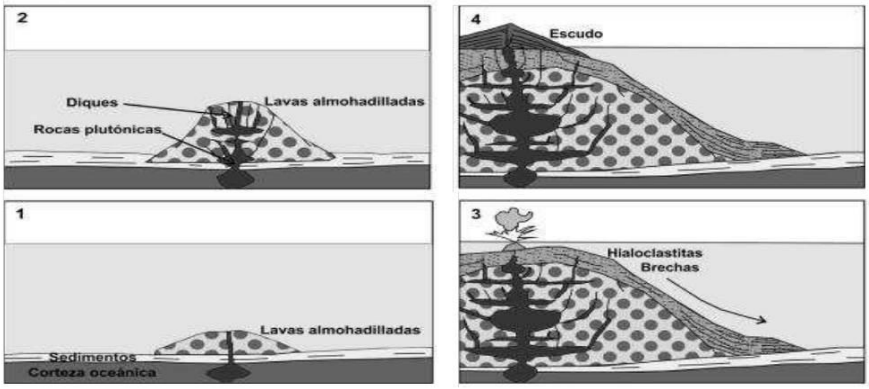


Figura 2.Fases de formación de los edificios submarinos y las fases de escudo posteriores de las islas oceánicas, equiparables a las formaciones geológicas existentes en la isla de La Palma (De la Nuez et al., 2018)

Tras una pausa erosiva se comenzó a formar, entre los 1,7 M.a y los 1,2 M.a, el Edificio Garafía (Fernández et al., 2002). Este está compuesto por capas de coladas pahoehoe y piroclastos basálticos que alcanzaron los 2000 m de espesor (De la Nuez et al., 2018). El final de su crecimiento terminó con el colapso gravitacional hacia el sureste de parte del edificio.

Sin apenas interrupción de la actividad eruptiva se inició la construcción del Edificio Taburiente (1,08–0,4M.a) (De la Nuez et al., 2018). Este cubrió los dos volcanes anteriores y rellenó la depresión formada por el colapso del Edificio Garafía. Este nuevo edificio está caracterizado por la presencia de coladas aa, intercaladas con piroclásticos basálticos, evolucionando hacia materiales félsicos, resultado de erupciones explosivas, en sus últimas fases (De la Nuez et al., 2018). Tras su formación la actividad eruptiva comenzó a migrar hacia el sur. De este modo, se desarrolló el rift meridional conocido como Cumbre Nueva y debido a su crecimiento excesivo se produjeron los movimientos gravitacionales que formaron el Valle de Aridane y la

Caldera de Taburiente, tras los cuáles se desarrolló el Edificio Bejenado. La actividad en esta zona de la isla terminó hace 0,4 M.a. y pasó a localizarse en un nuevo edificio, conocido como Cumbre Vieja (Carracedo et al., 2001).

Desde hace 150.000 años la actividad eruptiva de la isla de La Palma está localizada en la Dorsal de Cumbre Vieja (Troll et al., 2016). A diferencia del Edificio Norte, que posee una disposición tronco–cónica marcada, el rift de Cumbre Vieja tiene una disposición Norte–Sur que se prolonga hacia el océano y continúa, ya sumergido bajo las aguas, formando una alineación de volcanes submarinos recientes. Las lavas son predominantemente basálticas (basanitas, tefritas y traquibasálticas), aunque también aparecen domos fonolíticos en la cumbre y flancos de la dorsal (Carracedo et al., 2001). De este modo, las lavas de Cumbre Vieja parecen haber evolucionado más que en las formaciones de Garafía y Taburiente.

La mayoría de erupciones de este sector de la isla han sido de carácter estromboliano; no obstante, también aparecen algunas hidromagmáticas como las que dieron lugar a la caldera de Puerto Naos, o a las montañas de Tigalate, y las Indias, Montaña del Viento o la erupción subhistórica del volcán San Antonio (De la Nuez et al., 2018). Aún así, los materiales forman una masa de basaltos muy homogéneos sin, prácticamente, aparición de discordancias, lo que dificulta la separación de unidades estratigráficas. Sin embargo, se pueden separar las erupciones en dos grupos diferentes: erupciones pre-acantilados y erupciones post-acantilados (Day et al., 1999).

En el primer grupo se encontrarían aquellas erupciones que tuvieron lugar antes del último máximo glaciar establecido hace 20.000 años. Los materiales de estas erupciones afloran principalmente en los flancos noroeste y este, apareciendo recortados por los acantilados. Los centros de emisión pertenecientes a este grupo se distribuyen por toda la superficie de Cumbre Vieja con fracturas poco definidas, pero con predominio de los rumbos NW y NE desde el centro de la dorsal. La mayoría de estas erupciones tienen un comportamiento estromboliano, y en menor medida freatoestromboliano. Del mismo modo, los domos fonolíticos son relativamente abundantes y habitualmente se encuentran intensamente fracturados- por ejemplo, encontramos el Roque Teneguía (56 k.a) y Roque Mendo (26 k.a)- y su aparición refleja la rápida evolución de los magmas de Cumbre Vieja.

En el segundo grupo, se encuentran las erupciones con menos de 20.000 años cuyas lavas, al llegar al mar, forman plataformas lávicas costeras dispuestas al pie de los

acantilados formados en la etapa precedente. Durante este segundo periodo se produce una reorganización del volcanismo y los centros eruptivos comienzan a concentrarse en el actual eje de Cumbre Vieja. Estos eventos eruptivos cubren gran parte de la superficie actual de la dorsal. Los magmas siguen siendo predominantemente basálticos, aunque abundan también, lavas tefriticas y tefrifonolíticas, como las relacionadas con Montaña Cabrera (15k.a.), Montaña del Faro (18k.a), Birigoyo–La Barquita (6k.a) o San Antonio–La Caldereta (subhistórica) (Day et al., 1999; Troll et al., 2016; y Carracedo et al., 2001). Cabe destacar, que las erupciones basálticas recientes están asociadas con domos fonolíticos, puesto que al estar muy fracturados proporcionan una ruta preferente más fácil para que el magma llegue a la superficie (Carracedo et al, 2001).

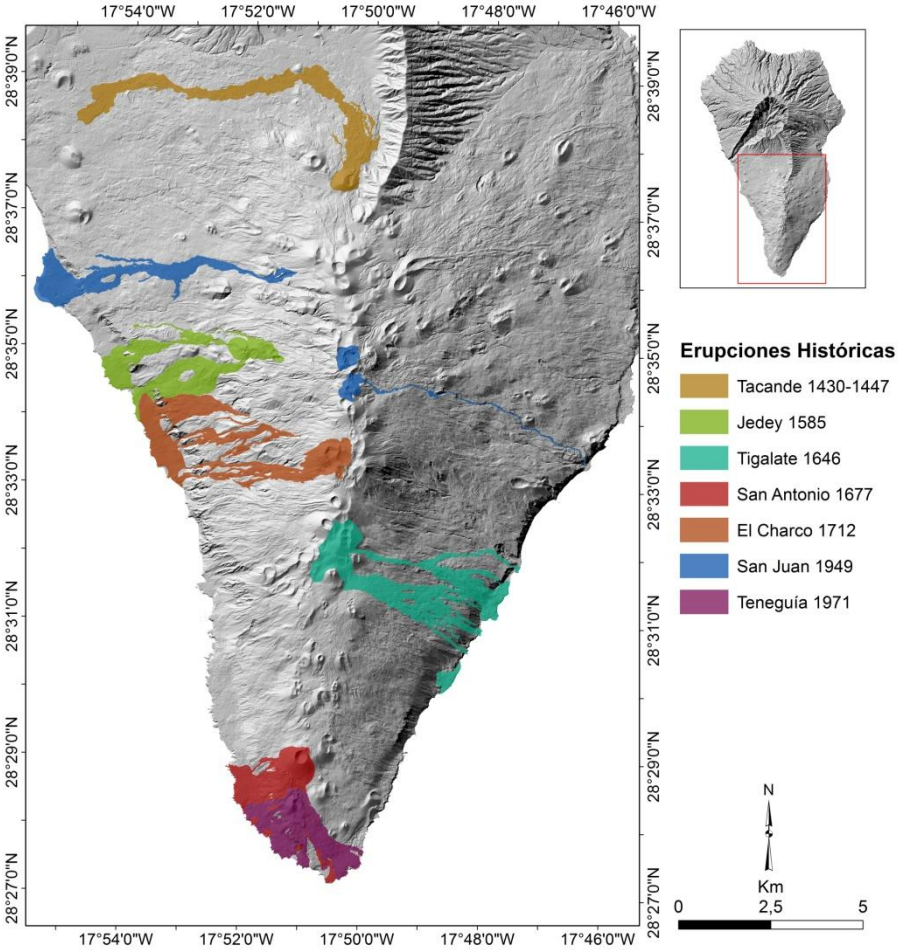


Figura 3. Coladas históricas de La Isla de La Palma. Fuente: Romero, 2000. Cartografía de las coladas realizada por Carmen Romero y Juan Samuel Suárez, curso 2019-2020.

La última fase eruptiva corresponde a las erupciones históricas desarrolladas en la isla desde la etapa de la precolonización hasta nuestros días (Figura 3). Aunque no se observa un patrón de distribución temporal similar sí parece que las erupciones duran cada vez menos (Troll et al., 2016). Del mismo modo, todas las erupciones históricas

presentan unas características similares: magmas de carácter básico, están relacionadas con domos y fracturas; formación de fisuras alargadas en kilómetros; presencia de varios puntos eruptivos alineados oblicuamente con el eje del rift; y comportamiento explosivo en los centros de emisión localizados en la cumbre y efusivo en los centros de emisión de los flancos (Romero, 1990).

De los 15 eventos eruptivos que ha habido en Canarias en la etapa histórica, 7 han tenido lugar en La Palma con una directriz dominante N–S y dos secundarias (NW–SE y NE–SW) (Romero, 2000). Todas han expulsado lavas de carácter basáltico a excepción de la erupción de Jedey (1585) que emitió materiales tefrifonolíticos (Carracedo et al., 2001). Esta erupción fue la primera recogida por testigos oculares y emitió lavas que llegaron hasta el mar formando una isla baja. No obstante previamente, entre 1430 y 1440, tuvo lugar la erupción prehispánica de Tacande o Montaña Quemada que emitió una colada que alcanza los 10 km de longitud, siendo la única erupción histórica de La Palma, cuyas coladas no llegaron al mar. En el siglo XVII tuvieron lugar dos nuevas erupciones, por un lado, la de Tigalate (1646) formó dos bocas eruptivas que emitieron coladas basálticas y San Antonio (1677) donde la boca superior tuvo un comportamiento estromboliano y la inferior dio lugar a la formación de fisuras efusivas, a partir de las cuales fueron emitidas las coladas de lava que también construyeron plataformas lávicas costeras. Durante la erupción mixta estromboliana, con fases hidromagmáticas, de El Charco (1712) las coladas de lava derramadas desde fisuras eruptivas localizadas en la ladera oeste de la dorsal, formaron una isla baja; esta erupción es la única desarrolladas a lo largo del siglo XVIII. Tras unos 237 años de calma, en 1949 tuvo lugar la triple erupción de Hoyo Negro, Duraznero y Llano del Banco, durante la cual los dos centros de emisión de Hoyo Negro y Duraznero, situados en el eje de la dorsal, tuvieron un comportamiento fundamentalmente explosivo, mientras que la fisura eruptiva del Llano del Banco, localizada a unos 1325 m de altitud en la ladera occidental, dio lugar a la formación de fuentes de lava y emitió lavas basálticas. El Teneguía (1971) ha sido la última erupción subaérea de las Islas Canarias y formó una isla baja que se superpuso a la formada en 1677 (Carracedo et al., 2001).

El periodo de mayor actividad volcánica histórica de La Palma se desarrolla entre 1585 y 1712, ya que en un periodo de 125 años se produjeron cuatro de las siete erupciones históricas de la isla (Romero, 2000). El volcanismo de este periodo ocupa el 5,2% (36,9 km^2) de la superficie total de la isla.

Estudio del relieve y el contexto topográfico

La Palma es la segunda isla más alta del archipiélago canario (2426m) y la quinta más grande (706km2). Es una isla de base triangular con su lado mayor en la parte Norte y su vértice más acusado hacia el Sur. Posee un relieve montañoso con desniveles muy marcados -más del 55% de su territorio tiene pendientes entre los 12 y 36º- y su punto más alto se encuentra en El Roque de Los Muchachos (2426 m). La orografía insular permite diferenciar dos grandes unidades topográficas: el sector norte y el área meridional (Figura4).

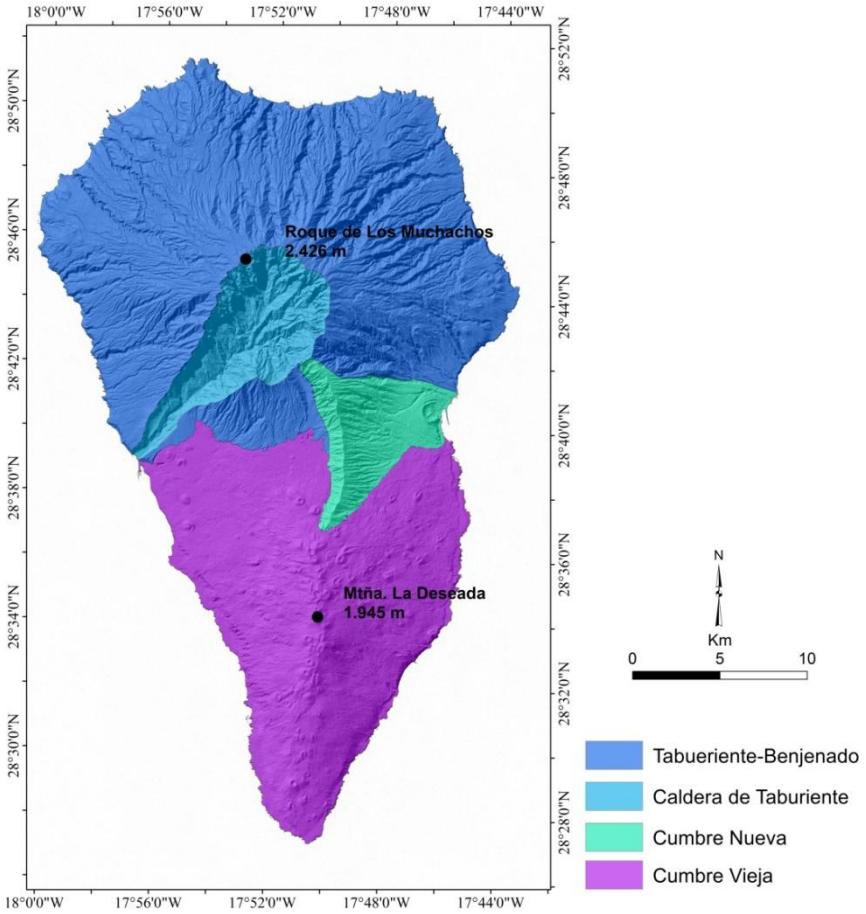


Figura4. Unidades topográficas de La Isla de La Palma. Elaboración propia

El sector septentrional ocupa 424 km^2 desde Punta Cumplida y de Juan Adalid (Figura4), al norte, hasta el extremo sur de Cumbre Nueva. Se caracteriza por un relieve abrupto y de elevada rugosidad, con pendientes muy pronunciadas, ya que aquí se encuentran los valores más importantes de la isla, con 36–48º. Es una unidad de planta groseramente circular y morfología tronco–cónica, con una prolongación hacia el sur.

Su complejidad orográfica permite diferenciar tres subsectores claros: las laderas de Taburiente y Bejenado, La Caldera de Taburiente y Cumbre Nueva.

Las laderas de Taburiente y Benjenado corresponden con un edificio cónico con pendientes de más de 30º, cuya línea de cumbre se asemeja a una herradura abierta hacia el suroeste y su red de drenaje se distribuye de manera radial desde la cumbre hacia la costa. En segundo lugar, La Caldera de Taburiente constituye una gran depresión acotada por paredes escarpadas de unos 1000 m de desnivel. Este sector constituye la mayor cuenca hidrográfica de la isla y se desarrolla desde el centro del área septentrional hacia el suroeste, encauzándose en su tramo final a través del Barranco de Las Angustias. Por último, Cumbre Nueva se dispone como una cuña hacia el sur, conectando ambos sectores de la isla. Se trata de una pequeña cordillera de 10 km de longitud ligeramente arqueada y abierta hacia el oeste. Su máxima altitud se encuentra en el norte, en Punta de Los Roques (2090m) y desciende hacia el sur hasta los 1480m, donde conecta, a través de rupturas de pendientes acentuadas, con Cumbre Vieja.

La Dorsal de Cumbre Vieja se desarrolla desde el área de contacto con Cumbre Nueva al norte hasta la Punta de Fuencaliente al sur. Posee una base triangular cuyo ancho máximo es de unos 17 km en el sector de contacto con el área norte y se estrecha progresivamente hacia el sur, donde posee unos 4 km en torno al Volcán de Teneguía. De este modo, con una longitud de 20 km y una única línea de cumbre de dirección Norte–Sur, la dorsal tiene una superficie total de 220 km^2 (Troll et al., 2016). Al igual que la anterior unidad, Cumbre Vieja posee un relieve montañoso, aunque de menor rugosidad general y pendientes menos acusadas que el área norte. Su máxima cota altitudinal se encuentra a 1950m en la Montaña de La Deseada (Figura 5).

La concentración de conos y fisuras efusivas alineadas en el eje del rift hace que se caracterice por tener una cresta acentuada. De norte a sur, su altitud aumenta rápidamente desde el contacto con Cumbre Nueva hasta el Pico del Birigoyo (1800m), a continuación, sigue aumentado, pero de manera más paulatina hasta la Montaña de La Deseada; a partir de este punto hay una disminución progresiva hasta la punta de Fuencaliente. No obstante, el eje del rift no es completamente recto, sino que en la parte sur forma una ligera curvatura en arco abierto hacia el oeste. En general, los numerosos conos volcánicos forman una cadena montañosa con una línea de cumbre discontinua en la que aparecen numerosos altos topográficos como Montaña Quemada, del Birigoyo,

Nambroque, del Fraile, Duraznero, La Deseada, Hoya de La Manteca, de Martín, la Degollada, Volcán de San Antonio, del Mago o Volcán Teneguía. Entre ellos aparecen depresiones intramontañosas como la de Las Brujas, de los Cestos, del Tanque, del Monte, o la de Los Canarios en la que se asienta el pueblo de Fuencaliente.

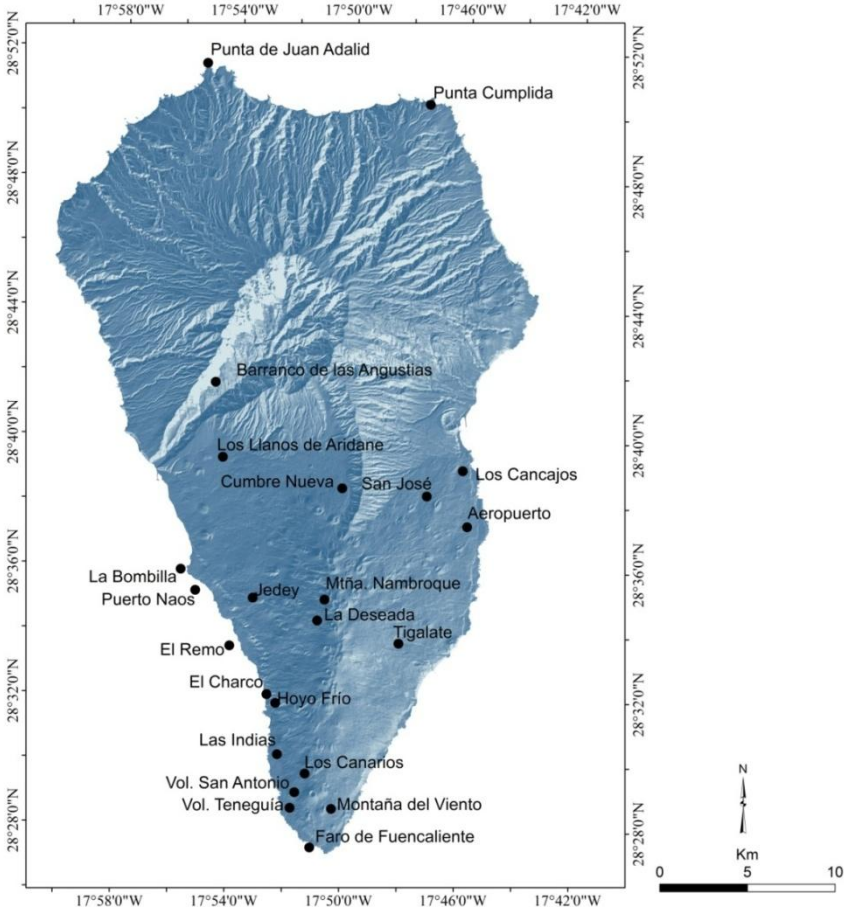


Figura 5. Mapa de topónimos de La Isla de La Palma. Fuente: Grafcan. Elaboración propia

Los flancos de la dorsal tienen poco recorrido -máximo 8 km desde el eje axial hasta la costa. La juventud de Cumbre Vieja y la continua interferencia entre los procesos erosivos y volcánicos hace que apenas muestre formas erosivas; su red de drenaje está poco desarrolladas, debido a la interferencia constante del volcanismo (Romero, 1990).Esta destaca sobre todo en el sector septentrional, el área geológicamente, más antigua de la dorsal y se caracteriza por una red de cauces únicos que se desarrollan de manera paralela desde la línea de cumbre hacia una vertiente u otra. Aún así hay indicios de una incipiente red con cauces simples que discurren desde la línea de cumbre hacia el este u oeste, sin cabeceras definidas, e incluso sin conexión de los cauces con el mar (Romero, 1990).

Las laderas de la dorsal tienen una altitud que disminuye desde el eje en planos inclinados hacia el este, sur y oeste y sus principales relieves se asocian a las morfologías de las coladas (sobre todo canales lávicos) o a la presencia de conos volcánicos monogénicos. Las canales de lava o las coladas estructuradas a partir de *leveés* laterales aparecen desarrollados a lo largo de ambos flancos de la dorsal, con dirección este y oeste siguiendo la línea de máxima pendiente y, debido a sus rasgos topográficos, son habitualmente interpretados como cauces. Puntualmente, en estas laderas del sector septentrional de Cumbre Vieja es posible encontrar conos volcánicos que se disponen con direcciones preferentes NE–SW en la ladera occidental y, NW–SE, en la ladera oriental. Algunos ejemplos son Montaña de Todoque, de Tamanca, Hoyo frío, de Los Ríos, Hoyo de Camacho, de Tirimaga o Las Calderetas.

Las mayores rupturas de pendiente de Cumbre Vieja se producen en las áreas litorales y prelitorales de la dorsal, donde se desarrollan acantilados aún funcionales y escarpes, correspondientes a antiguos acantilados que han dejado de ser activos por la llegada de coladas al mar. Aún así, la configuración del litoral no es homogénea, pudiéndose diferenciar claramente el litoral oriental del occidental. En el flanco oeste los escarpes oscilan desde los 40 m de altura en la Punta de Fuencaliente hasta los 300 m en torno a las Indias y El Remo y los 150–100 m en Puerto Naos desde donde disminuyen rápidamente hasta el contacto con la unidad norte donde tienen alturas en torno a los 50 m. Además, en este flanco el desarrollo de islas bajas es prácticamente continuo desde el sector de Las Salinas hasta La Bombilla (unos 17 km) la mayor interrupción se encuentra en torno a la población de El Charco. Por su parte, en el flanco este los escarpes poseen alturas, de sur a norte, desde los 300 m en la Montaña del Viento, 200 m en Las Caletas y en torno a 200–300 m desde Montes de Luna, para descender a continuación hasta alcanzar menos de 100 m. En este sector las islas bajas son prácticamente inexistentes; su mayor continuidad se encuentra al norte, entre El Lajío y Los Cancajos. También cabe destacar la aparición de altos topográficos litorales como Montaña del Viento (200 m) y Montaña de Azufre (260 m).

Contexto geográfico

La isla de La Palma cuenta actualmente con 82.671 habitantes, lo que supone solamente un 3,8% sobre el conjunto del archipiélago canario (ISTAC, 2019).Los

Llanos de Aridane (20.467 habitantes) y Santa Cruz de La Palma (15.716 habitantes) son los municipios más poblados de la isla. A parte de estos dos casos, ningún otro municipio supera los 10.000 habitantes. Entre los municipios con más de 5.000 habitantes encontramos El Paso (7.622 personas), Breña Alta (7.204 personas) y Breña Baja (5.690 personas). Por su parte, los municipios con menor población son Barlovento (1.876 personas), Fuencaliente (1.722 personas) y Garafía (1.667 personas). De este modo, se observa una clara diferenciación de la isla entre el sur, donde se encuentra el 82% de la población, y el norte, poco poblado con apenas el 18% (ISTAC, 2019).

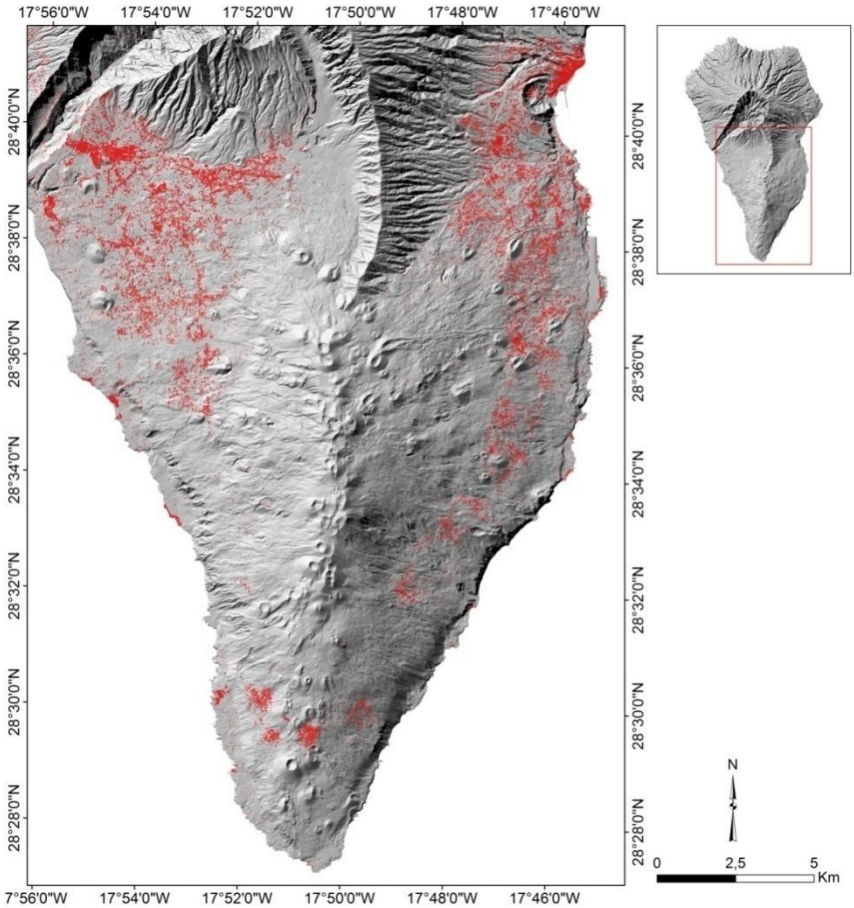


Figura 6. Distribución del poblamiento de la dorsal de Cumbre vieja. .Fuente:BTN25, IGN. Elaboración propia

En las laderas de Cumbre Vieja encontraríamos los municipios más poblados de la isla: Breña Baja, Breña Alta, Villa de Mazo, El Paso, Los Llanos de Aridane; y Fuencaliente, el segundo menos poblado. El poblamiento en esta zona, como es común en las Islas Canarias, es muy disperso. En la vertiente este, coincidiendo con los municipios de Breña Alta, Breña Baja y la Villa de Mazo, podemos observar una franja de edificaciones dispersas que se extiende cubriendo las medianías, y dispersándose aún

más y extendiéndose hacia la costa a medida que nos acercamos al núcleo de población de Santa Cruz de La Palma. Por otro lado, el poblamiento de la vertiente occidental, aunque también disperso en las zonas de medianías y costa, tiende a concentrarse en torno a los principales núcleos de población de Los Llanos de Aridane, Tazacorte y El Paso. Por último, los núcleos poblacionales más concentrados de la dorsal los encontramos en el municipio de Fuencaliente, donde el poblamiento disperso es prácticamente imperceptible articulándose en torno a los barrios de Los Canarios, La Caleta, Las Indias y Los Quemados (Figura **6**).

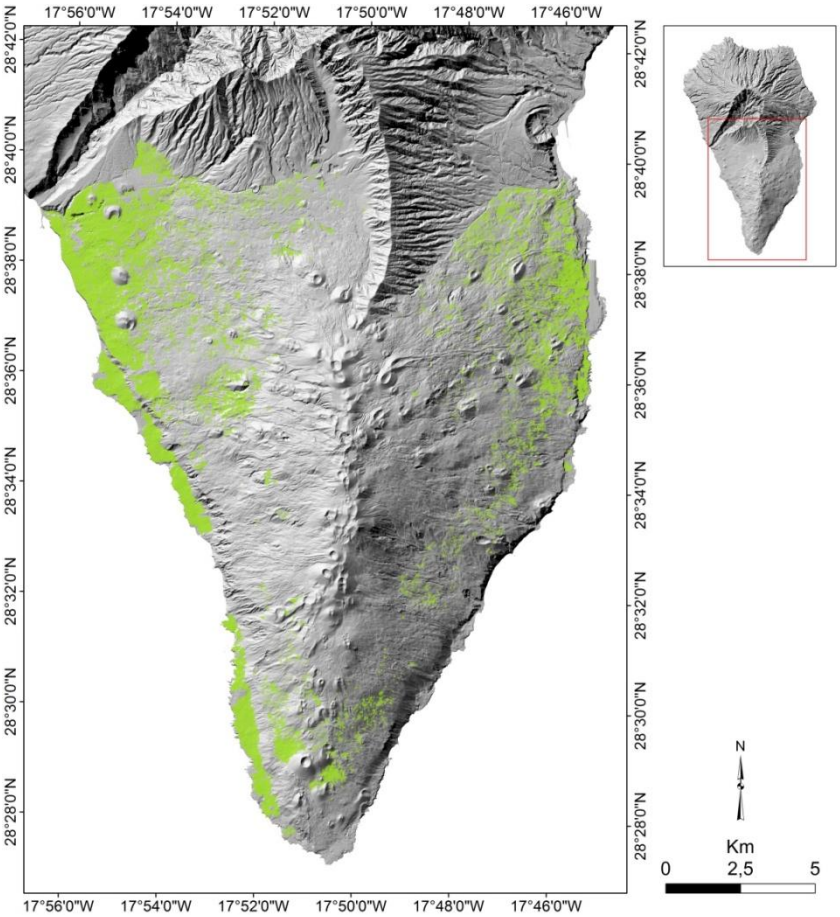


Figura 7. Cultivos de Cumbre Vieja. Fuente: SITCAN. Elaboración propia.

Históricamente La Palma ha sido la isla con mayor porcentaje de ocupación agraria, representando un 26 % de su territorio. Aunque en las últimas décadas el abandono del secano ha supuesto una pérdida del 60 % de la superficie cultivada, la isla sigue siendo la que más superficie cultivada posee de Canarias con un 10,4% de su territorio (García–Rodríguez, 2013). En El Valle de Aridane, y en menor medida toda la vertiente oeste de Cumbre Vieja, se encuentra la zona agrícola más importante de toda la isla, caracterizada por cultivos costeros intensivos, que en los últimos años han visto

reducida su extensión debido a la mayor intensificación de los mismos. De este modo, las islas bajas que recorren la costa oeste se caracterizan por la presencia de cultivos de exportación de cultivos e invernaderos de plataneras y en las medianías, principalmente del SW, caracterizadas por sustratos de piroclastos basálticos, predominan los viñedos. No obstante, esta distribución se ve alterada en torno al Valle de Aridane donde el cultivo del plátano asciende a medianías con el fin de ampliar su ciclo productivo (García–Rodríguez, 2013). La distribución en la vertiente este es similar en cuanto a cotas altitudinales, sin embargo, como se aprecia en la Figura 7la superficie ocupada es mucho menor y se encuentra concentrada en el sector NE en torno a Las Breñas.

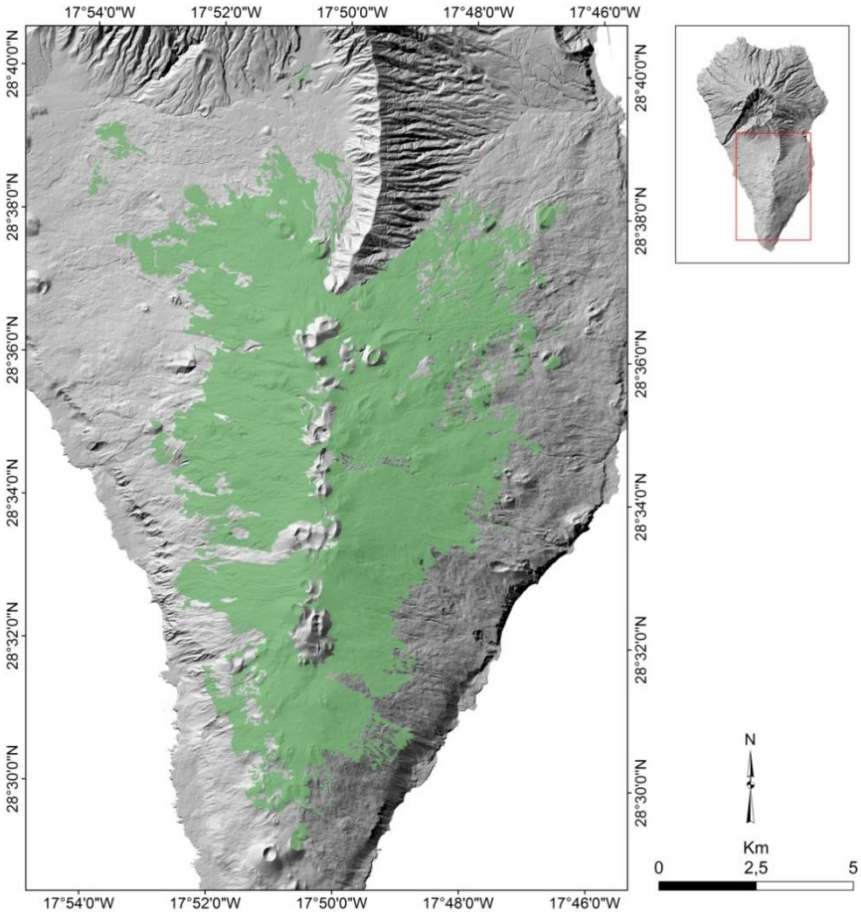


Figura 8. Masa forestal de Cumbre Vieja, asociada, principalmente, con un bosque de pinar. Fuente: Mapa Forestal de España. Elaboración propia.

Desde el punto de vista del paisaje vegetal, y dado el alto nivel de antropización de las ladera medias y bajas de la dorsal, cabe destacar la masa forestal que ocupa toda su área central, coincidiendo con las cotas altitudinales más altas de la dorsal. Se caracteriza principalmente por un bosque de pinar que se desarrolla entre los 800–1500 m de altitud con una cubierta más o menos densa que se abre conforme asciende o

desciende de altitud. Por encima de los 1500 m, coincidiendo con las cotas culminantes de la dorsal, aparece un pinar disperso con ejemplares aislados dejando un suelo prácticamente desnudo. Esta formación no solo se encuentra relacionada con la altitud sino que también las mayores discontinuidades del bosque se deben a la aparición de materiales de las erupciones históricas recientes. Por otro lado, en el sector de medianías del NE-en torno a 500–1000 m- se encuentra una formación de transición de fayal–brezal relacionado con la recolonización de terrazas de cultivo abandonadas que dejan un mosaico discontinuo, intercalándose terrazas de cultivos con formaciones de fayal–brezal en diferentes fases de madurez (Figura 8).

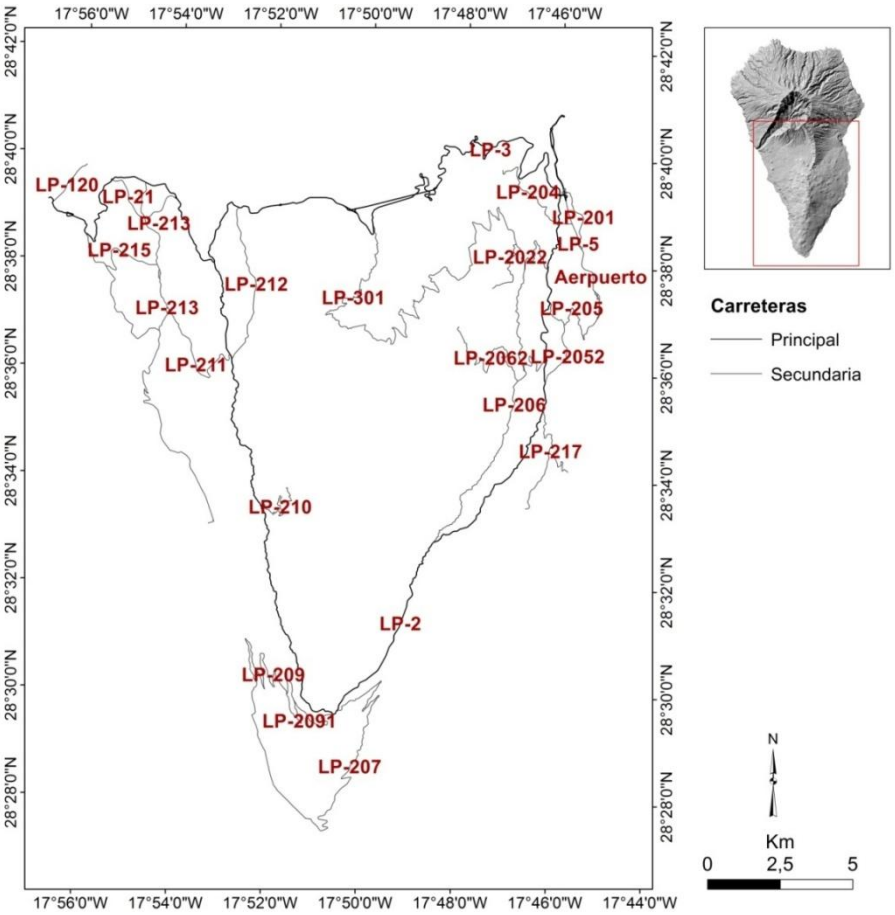


Figura 9. Red de carreteras de Cumbre Vieja. Fuente: Cabildo de La Palma. Elaboración propia.

En cuanto al sistema de la red de carreteras y transporte de la dorsal, la Carretera General del Sur (LP–2) es el eje principal que articula la totalidad de Cumbre Vieja. Sale desde Santa Cruz de La Palma y rodea toda la dorsal hasta llegar a Los Llanos de Aridane, conectando ambos extremos por los túneles de Cumbre Nueva lo que la convierte en una red totalmente circular (Figura 9). A partir de ella se articulan

pequeñas carreteras dispuestas de cotas altas a bajas conectando esta vía principal con sectores de zonas costeras. Entre ellas se pueden destacar: la LP–207, que articula todo el sector costero del municipio de Fuencaliente y conecta ambos de sus extremos con la carretera general; la LP–213, una carretera "sin salida", encargada de conectar los núcleos de Puerto Naos y El Remo con el centro del municipio de Los Llanos de Aridane; y la LP–301, pista forestal que conecta las Breñas con el Refugio del Pilar en El Paso que es fundamentalmente usada durante los incendios pero que constituye una vía alternativa de conexión (Open data Cabildo de La Palma, 2020).

Con todo esto se pueden diferenciar a gran escala varias unidades de paisaje antrópico diferenciadas. En primer lugar, en la costa oeste aparece un paisaje litoral de agricultura intensiva donde los invernaderos se han incrementado en los últimos años dejando la apariencia de un paisaje artificial. En las medianías destaca un paisaje rural caracterizado por un poblamiento disperso y huertas familiares que se intercalan con otras ya abandonadas. En las cotas más altas se manifiesta un paisaje forestal, hasta cierta medida natural, donde predomina la vegetación caracterizada por el bosque de pinar. En el sector más meridional de Cumbre Vieja, en el área de emplazamiento de los volcanes Teneguía y San Antonio se encuentra un paisaje volcánico reciente caracterizado por la roca desnuda y el predominio de las formas volcánicas. Por último, en el Valle de Aridane, coincidiendo con el municipio más poblado de la isla se vislumbra un paisaje caracterizado por formas de construcción propias de áreas urbanas en el núcleo de Los Llanos de Aridane.

2.2.Puntos de emisión y parámetros morfométricos utilizados

Establecimiento de los puntos de emisión

Para establecer la localización de los puntos de emisión de la simulación, primero se identificaron los centros de emisión existentes en la dorsal de Cumbre Vieja. Los centros de emisión identificados, un total de 335 (Figura10), se concentran principalmente en dirección N–S siguiendo el eje de la dorsal, no obstante de manera secundaria se aprecian dos lineamientos de centros de emisión con dirección NE–SW y

NW–SE, que caracterizan a los sectores más septentrionales de Cumbre Vieja.

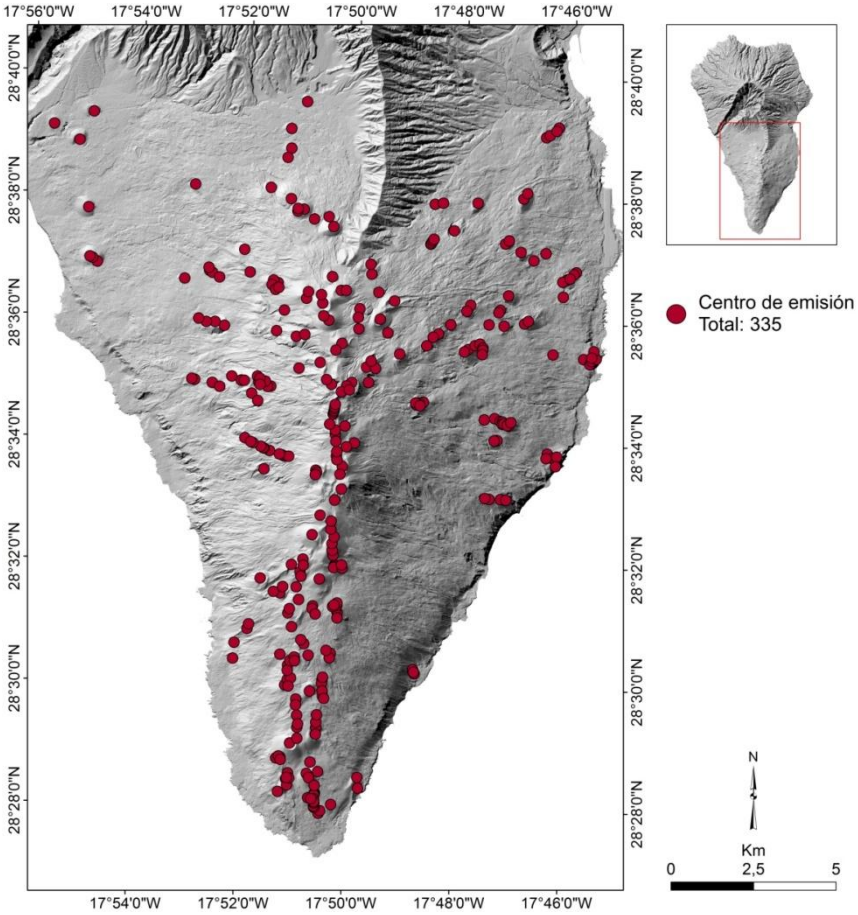


Figura10. Centros de emisión existentes en Cumbre Vieja a partir de la base de datos realizada por Carmen Romero Ruiz. Elaboración propia.

A partir de estos centros de emisión se ha elaborado un análisis kernel de 2 km de radio para identificar las áreas de mayor densidad de centros eruptivos. Este se representa en un modelo de representación raster sobre celdas de 100 x 100 m y un modelo gaussiano, siguiendo el ejemplo de Connor et al. (2019) que ya había utilizado este método previamente. El resultado (Figura11) representa la probabilidad espacial de generarse un futuro centro de emisión. En él se puede observar que las mayores densidades se encuentran en el eje N–S de la dorsal. Del mismo modo, se aprecia que la mayor densidad de centros de emisión se concentra en el extremo sur de la dorsal desde donde se produce un paulatino descenso de la misma hacia el norte, sector en el que existe una mayor dispersión y donde la concentración de los mismos es más difusa afectando tanto al eje como a determinados sectores de las laderas oeste y este.

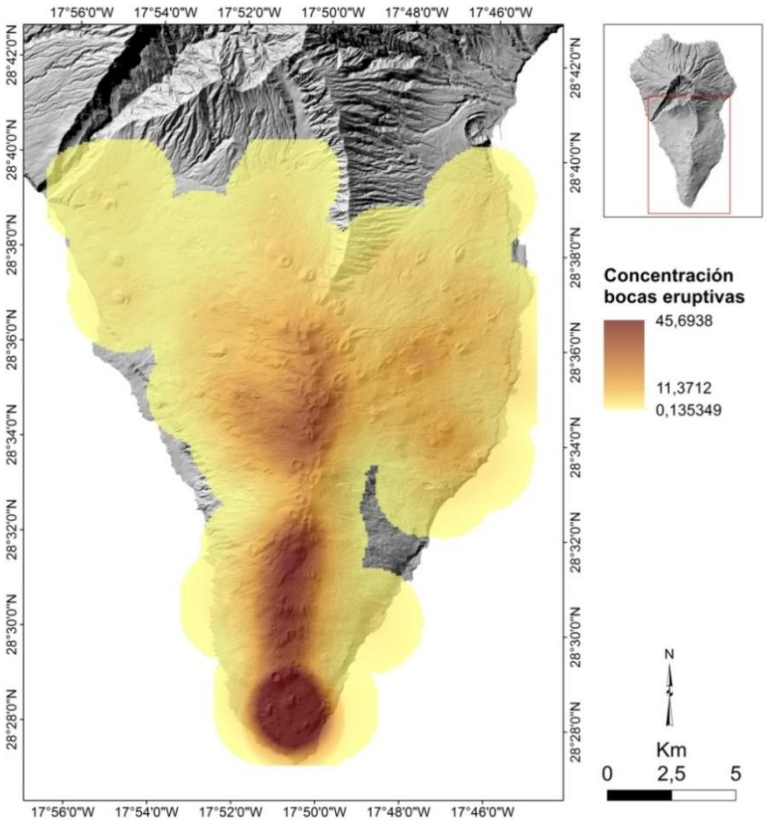


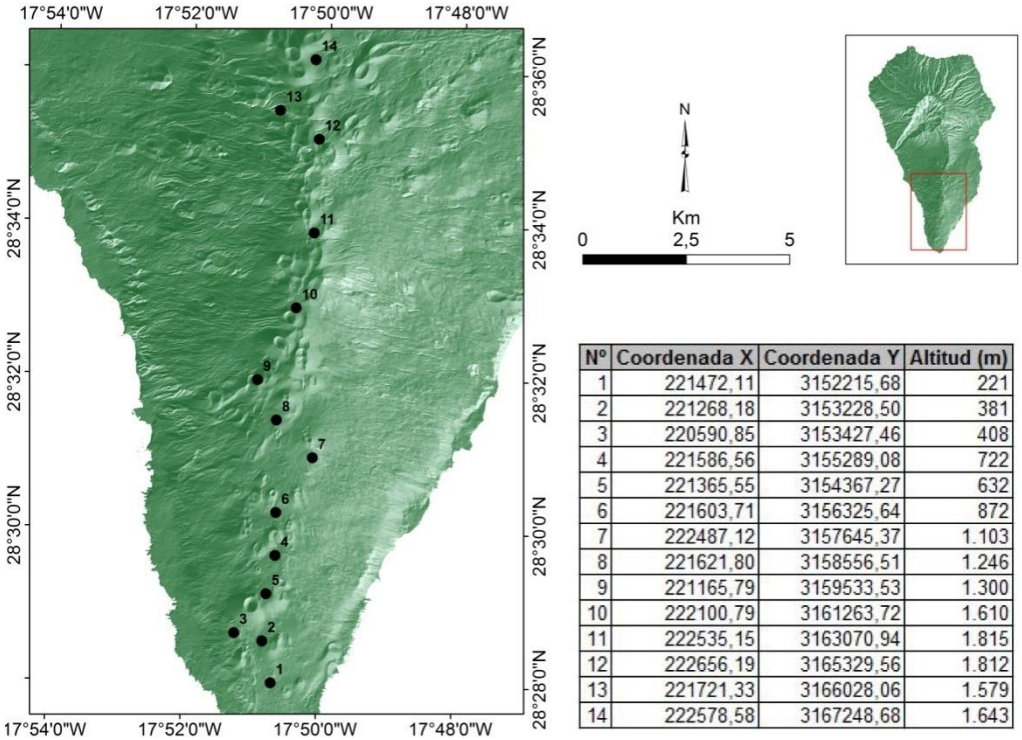
Figura11. Áreas de densidad de puntos de emisión de Cumbre Vieja a partir de la base de datos realizada por Carmen Romeo Ruiz. Elaboración Propia

Teniendo en cuenta estas áreas de mayor densidad se procedió al establecimiento de la localización de los centros de emisión utilizados como punto de arranque de las coladas en la simulación. La ubicación de los mismos se realizó manualmente teniendo en consideración los siguientes criterios.

1. Los puntos de emisión deberían estar localizados en las áreas de mayor densidad de centros eruptivos de la dorsal de Cumbre Vieja
2. Estos puntos deberían estar localizados en las áreas de directrices estructurales marcadas en el pasado geológico reciente de la dorsal, en este caso en el eje N–S del rift de Cumbre Vieja
3. Que no fuesen coincidentes espacialmente con centros de emisión previos
4. Dado que los centros de emisión históricos están ubicados espacialmente en las cercanías o en la proximidad a domos de carácter fonolítico, intensamente fracturados, que permiten el ascenso del magma con menos dificultad (Carracedo et al., 2001), los centros de emisión utilizados deben cumplir, en la medida de lo posible, este requisito.

5. Los nuevos centros de emisión deben estar, además en situaciones topográficas contrastadas y variadas, tanto en la cumbre como en las zonas altas de las vertientes este y oeste como sucede con las erupciones históricas.

Siguiendo estos criterios se obtuvieron 14 puntos de emisión, estableciéndose sus coordenadas y la altitud de su emplazamiento, a partir de los cuáles se realizan las simulaciones (Figura 12).



Nº	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud (m)
1	221472,11	3152215,68	221
2	221268,18	3153228,50	381
3	220590,85	3153427,46	408
4	221586,56	3155289,08	722
5	221365,55	3154367,27	632
6	221603,71	3156325,64	872
7	222487,12	3157645,37	1.103
8	221621,80	3158556,51	1.246
9	221165,79	3159533,53	1.300
10	222100,79	3161263,72	1.610
11	222535,15	3163070,94	1.815
12	222656,19	3165329,56	1.812
13	221721,33	3166028,06	1.579
14	222578,58	3167248,68	1.643

Figura 12.Localización de los centros de los centros de emisión que servirán como puntos de arranque para las simulaciones. Elaboración propia.

Parámetros morfométricos utilizados

En primer lugar, para obtener los parámetros morfométricos que se utilizarían en las simulaciones se utilizó un método empírico de prueba–error mediante la utilización del *Fitness Index.* Tras realizar 35 pruebas la mayor bondad obtenida fue 0,3 sobre 0,5, valor asequible según Mossoux et al. (2018). Si bien los parámetros (
Cuadro **2**) fueron calibrados por dichas pruebas, en especial el número de interacciones y el umbral, también se tuvieron en cuenta datos de las erupciones históricas de Canarias como el espesor de la colada (Carracedo et al., 2004) y la longitud máxima (la mayor longitud alcanzada por una colada en los volcanes históricos de la isla de La

Palma, fue de 10 km en la erupción de Montaña Quemada de 1430–1447). Dado que la mayor parte de las coladas históricas tienen longitudes máximas visibles notablemente inferiores a las de Montaña Quemada, con recorridos que no llegan a superar los 8 km, se ha creído oportuno utilizar esta distancia (10 km) para conseguir que el modelo simule flujos de lava que puedan alcanzar la costa, ya que en seis de las siete erupciones históricas de esta isla, las coladas han terminado por alcanzar el litoral (Romero, 1990).

Parámetros	**Valor**
Hc	3 m
Hp	2 m
Longitud euclidiana	10 km
Umbral	0 %
Interacciones	10.000

Cuadro 2.Parámetros morfométricos utilizados para la realización de las simulaciones y obtenidos mediante el método empírico de prueba–error.

3. SIMULACIONES

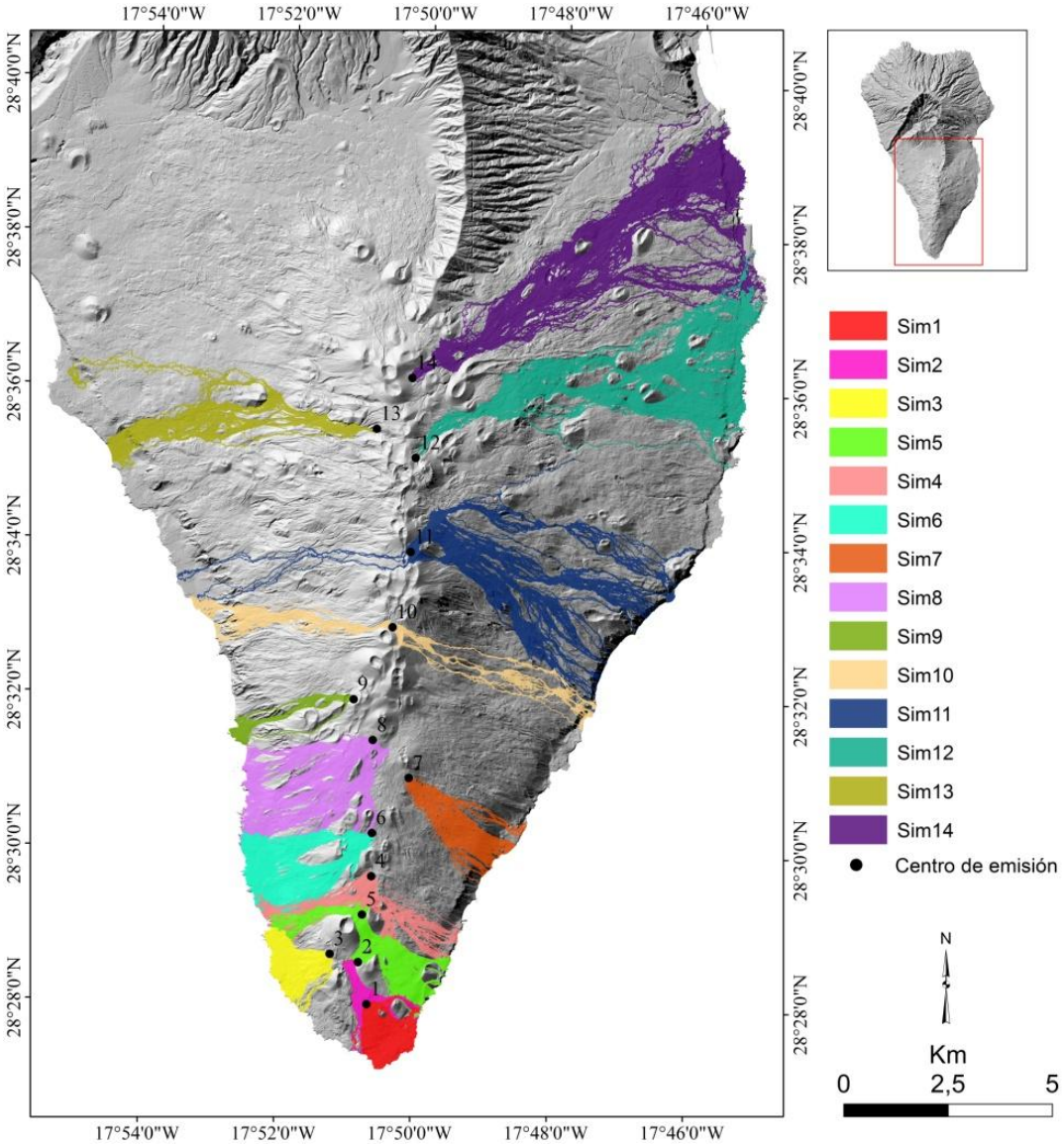


Figura 13. Simulaciones de coladas de lava obtenidas a partir de los centros de emisión establecidos. Elaboración propia

Las simulaciones obtenidas permiten tener una visión de conjunto sobre las diferencias existentes en el trazado de las coladas entre unos sectores y otros de la dorsal de Cumbre Vieja (Figura 13).

Observando las simulaciones, puede verse como ambas vertientes se ven más o menos afectadas por el mismo número de coladas. Además, se aprecia que todas las coladas, a excepción del brazo norte de la simulación 13, alcanzan el mar, por lo que es probable que todas hubieran generado, en mayor o menor medida, plataformas y deltas

de lava si se hubiese incorporado al DEM los datos batimétricos próximos a la costa. Por otro lado, todos los centros de emisión localizados en la línea divisoria de aguas de la dorsal (simulaciones 4, 5, 10 y 11) dan lugar a coladas que derraman por ambas vertientes.

Nº simulación	Altitud centro emisor	Área	Longitud (Km)	Sur	Oeste	Este	Nº brazos	Nº zonas aisladas	Pendiente media (%)
1	221	1,5	1,5	X			1	< 10	15 %
2	381	2,1	2,6	X			1	< 10	15 %
3	408	1,5	1,5	X			1	< 10	27 %
4	722	6	4,7	X	X	X	4	>2 0	15–27 %
5	632	4,6	3,8	X	X	X	3	10-20	16–26 %
6	872	4,3	3,1		X		2	< 10	27 %
7	1.103	2	2,9			X	1	10-20	37 %
8	1.246	6,1	3,6		X		5	> 20	34 %
9	1.300	0,7	3		X		1	< 10	43 %
10	1.610	2,4	5,2		X	X	2	>20	30–38 %
11	1.815	6,2	7		X	X	3	>20	30–32 %
12	1.812	8,3	8,6			X	1	>20	15–20 %
13	1.579	3,2	6,4		X		2	10-20	24 %
14	1.643	10,2	9,6			X	1	>20	15–20 %

Cuadro3. Principales características de las coladas obtenidas a través de simulaciones. Elaboración propia.

Además, las simulaciones que menos área ocupan (Cuadro3) son aquellas situadas en el sector más meridional de la isla (simulaciones 1, 2 y 3) y el área ocupada aumenta conforme avanzamos hacia el norte debido a que la dorsal se ensancha y como consecuencia de haber optado por introducir datos en la aplicación que hicieran llegar la colada al mar con una longitud de colada de 10 km. Las coladas que más área ocupan son la 12 y 14 localizadas en el área meridional de la dorsal, con 8,3 y 10,2 km^2 respectivamente. No obstante, destaca la simulación 9, que aún estando situada más al norte que otras, es la que menor área ocupa (700 m^2) probablemente porque los flujos se encauzan por un sector de elevada pendiente, caracterizada por barrancos, y discurren muy constreñidos topográficamente. Es probable que, de haber contado con datos batimétricos, este flujo hubiera generado una isla baja de mayor superficie.

En cuanto al comportamiento de las coladas observamos como las que se desarrollan por mayores pendientes se corresponden con la vertiente oeste (simulaciones 3, 6, 8,9 y al menos un brazo de la 4, 10 y 11) mientras que las que discurren por una pendiente más tendida coinciden con el sector NE (simulación 12 y 14). Del mismo modo, podemos ver diferencias en el trazado de las coladas, cuanto más al norte discurre una colada más flujos estrechos y bifurcaciones presenta debido a que se encauzan por la red de drenaje incipiente que se desarrolla en dicha zona. Las coladas más al sur, especialmente uno de los brazos de la simulación 4, se encauzan por canales de lava recientes y por eso también presentan algunos flujos finos, especialmente en los extremos. Por último, la principal causa por la que se producen las bifurcaciones son la aparición de altos topográficos, sobre todo conos previos, que sirven como obstáculo para que la colada fluya normalmente.

La información obtenida a partir del diseño y distribución de los trazados de las coladas generadas por las simulaciones en combinación con los rasgos geográficos del paisaje, característicos de sus áreas de emplazamiento, permite la definición de al menos cuatro escenarios geográficos distintos.

4. GENERACIÓN DE ESCENARIOS GEOGRÁFICOS

4.1.Escenario nº 1 (zona sur)

En este primer escenario geográfico se insertarían las simulaciones 1, 2 y 3 (Figura 14). Las coladas 1 y 2 presentan prácticamente el mismo comportamiento. En este sector las coladas parten de los centros de emisión situados en las cotas altitudinales más bajas de la zona de estudio, con un área de 1,5 km^2 y 2,1 km^2 respectivamente. La colada 2, cuyo centro de emisión se sitúa a 381 m de altitud, se encauza con un solo brazo entre el Volcán Teneguía y Montaña el Mago para luego, al igual que la simulación 1 -situada a 220 m-, descender hacia el mar en dirección SSE por una pendiente tendida de entorno al 15 % y sin importantes rupturas de pendiente. Conforme descienden en altitud las coladas se van abriendo, el brazo principal se bifurca al encontrar en su recorrido a la Montaña de Las Margaritas y Montaña del Lajío, dejando a estas dos aisladas entre ellas. Al llegar a la costa se abren completamente y afectan a la totalidad de El Malpaís de Los Frailes, Las Salinas y Los

Arenales. Por su parte, la colada 3 desciende desde su centro de emisión a 408 m hasta el mar en dirección oeste por una pendiente media del 27%, debiendo saltar un escarpe subvertical de 100 m de altura para llegar a la costa. El brazo principal concentra la mayor parte del material emitido, no obstante se observa la aparición de un flujo secundario mucho más fino que crea un islote entre ambos. La colada se abre, paulatinamente, desde su centro de emisión hasta llegar a la costa, derramándose por toda la isla baja situada en El Rincón y ocupando una superficie de 1,5 km^2.

Estas tres primeras simulaciones generan coladas cortas de apenas 1,5–2,5 km debido al escaso desarrollo de los flancos en esta zona. Son coladas caracterizadas por escasas bifurcaciones de los flujos debido a la carencia cauces y la configuración de la ladera como una rampa ligeramente inclinada dispuesta desde la cumbre hacia el mar. Las zonas aisladas se deben a la aparición de altos topográficos, relacionados con conos volcánicos preexistentes como Montaña del Viento o Montaña de Las Margaritas, que debido a su altura no pueden ser sobrepasados por la lava. Estos conos generan la aparición de sectores de sombra, no ocupados por las lavas, hacia el sector contrario a la dirección de los flujos.

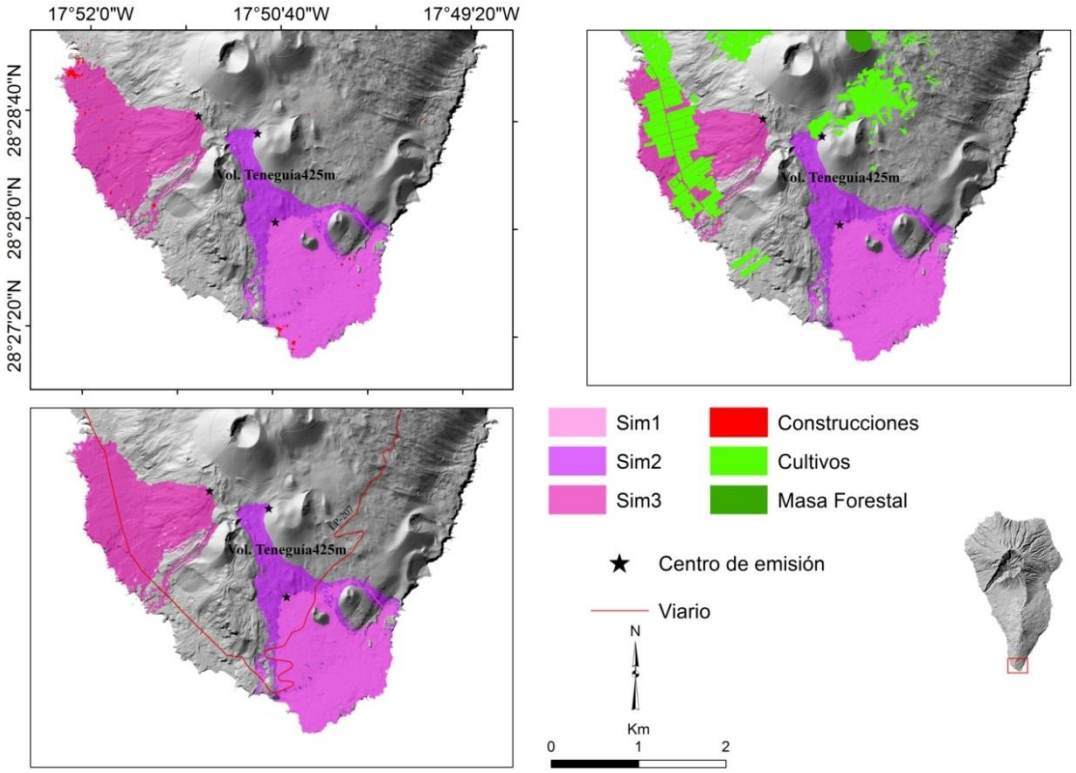


Figura 14. Escenario geográfico número 1, zona sur. Fuentes: Grafcan, IGN, Cabildo de La Palma y Mapa Forestal Nacional. Elaboración propia.

Este escenario abarcaría, por tanto, todo el extremo meridional de la isla, correspondiendo con el sector de Cumbre Vieja con menor desarrollo transversal y con una línea de cumbres poco definida. Las altitudes máximas se encuentran asociadas a los conos volcánicos que no superan los 458 m. Estos se asientan sobre una rampa tendida en dirección sur, recortada en su flanco oeste por escarpes de entre 150 y 250 m, y con pequeñas rupturas de pendientes a cuyo pie se desarrollan islas bajas que no superan los 800 m de anchura. Más concretamente todo este sector comprende un ámbito afectado por las lavas del Volcán San Antonio (1677) y por los conos y las coladas de la erupción del Teneguía. De este modo, no solo es el único sector de Cumbre Vieja donde han tenido lugar dos erupciones históricas, sino que también se trata de la zona de mayor densidad de centros de emisión (Figura11) y por tanto con mayor susceptibilidad volcánica.

La ocupación humana en esta zona es escasa, solamente se vería afectado el pequeño conjunto de casas de Punta Larga y del poblamiento diseminado de Los Quemados. A pesar de la escasa población residente, la zona constituye un atractivo turístico muy importante por lo que las zonas de uso turístico de la playa de El Faro, El Faro de Fuencaliente y el complejo turístico de las Salinas de Fuencaliente también se verían afectadas.

Debido a que este sector se encuentra cubierto directamente por lavas de erupciones históricas recientes no supone un espacio agrícola importante superficialmente y se caracteriza por la presencia de plataneras bajo invernaderos en la isla baja y cultivos de viñas en los piroclastos pertenecientes a la erupción del Teneguía, afectados en la simulación por la colada 3, junto a las infraestructuras de regadío asociadas. Por este sector discurre la carretera secundaria, LP–207, que articula todo el sector costero de Fuencaliente desde Punta del Banco hasta Playa del Faro y lo conecta con el núcleo de Fuencaliente.

Por todo ello, a pesar de que este escenario corresponde al sector de mayor grado de peligrosidad volcánica de la dorsal, es una de las áreas donde los impactos causados por las coladas serían muy locales y con muy baja incidencia territorial y socioeconómica.

4.2.Escenario nº2 (vertiente este)

En este segundo escenario se encontrarían insertas las simulaciones 7, 12 y 14 que se desarrollan solo por la vertiente este. Así pues, este segundo escenario abarcaría

toda la vertiente este de la dorsal de Cumbre Vieja. Esta vertiente se caracteriza por desarrollarse desde la línea de cumbres hasta la costa y sus altitudes máximas están relacionadas con los conos volcánicos situados en el eje de la dorsal. Su anchura aumenta progresivamente desde los 2 km de desarrollo transversal en el sur hasta 7 km en el norte donde se puede observar una red de drenaje incipiente. Su costa se encuentra acantilada con escarpes de entre 100 y 300 m, siendo escasas las islas bajas. Estas alcanzan su mayor desarrollo en el sector más septentrional de la vertiente donde aparece una pendiente tendida sin apenas rupturas de pendiente. Por otro lado, este sector solo ha sido afectado por dos de las trece erupciones históricas de la isla, la erupción de Tigalate (1646) y, en menor medida, la erupción del San Juan (1949) por ello la masa forestal, relacionada con bosque de pinar, se desarrolla en la zona de cumbre sin apenas discontinuidades espaciales.

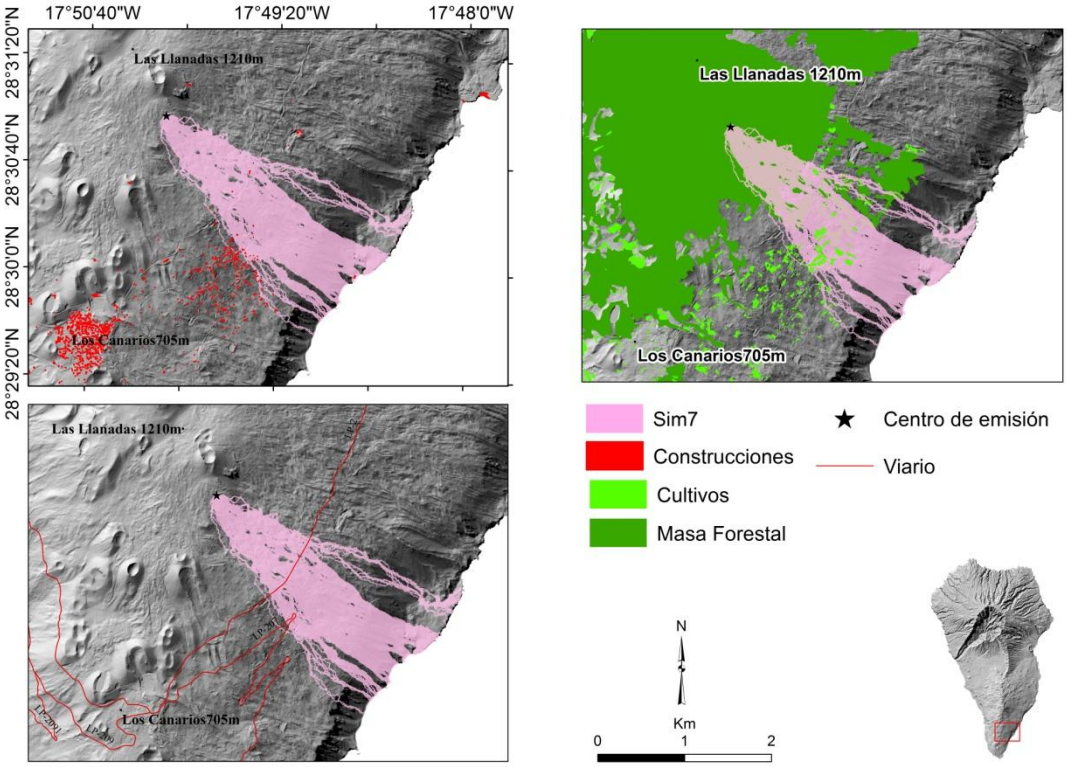


Figura 15. Escenario geográfico número 2, vertiente este, simulación 7. Fuentes: Grafcan, IGN, Cabildo de La Palma y Mapa Forestal Nacional. Elaboración propia.

La primera (Figura 15) ocupa 2 km^2, extendiéndose las coladas desde el centro de emisión, localizado a 1103 m, hasta la costa y discurriendo por un área con pendientes medias en torno al 37 %. Posee un flujo de lava principal que se derrama por las medianías y se bifurca para formar otro pequeño brazo secundario que deja un sector

aislado entre ambos. Parte de las coladas, tras saltar un acantilado de 200m, cubren una isla baja preexistente, aunque existen brazos que se descuelgan por un cantil aun activo, entrando en contacto directo con el mar. Esta simulación muestra enormes similitudes con el área cubierta y el trazado de las coladas de la erupción Martín de Tigalate de 1646 (Figura 3).

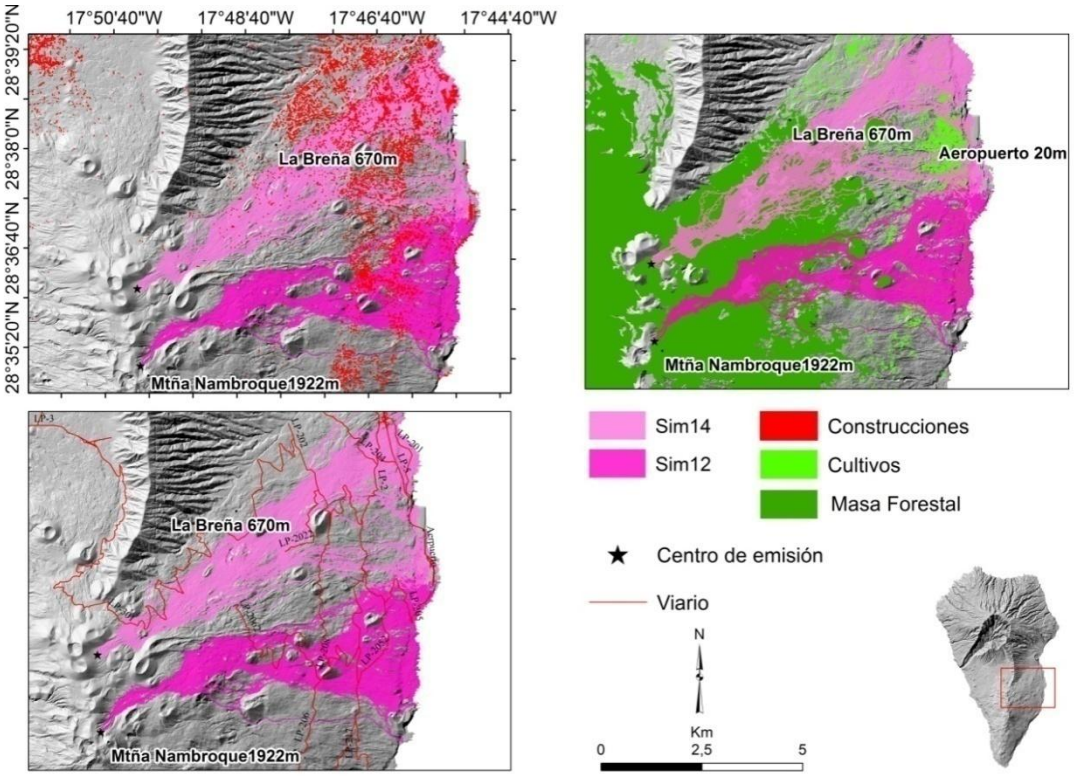


Figura 16.Escenario geográfico número 2, vertiente este, simulaciones 12 y 14. Fuentes: Grafcan, IGN, Cabildo de La Palma y Mapa Forestal Nacional. Elaboración propia.

En el sector septentrional de esta vertiente este, las coladas de las simulaciones 12 y 13 (Figura 16) muestran rasgos muy semejantes entre sí. Son las simulaciones que mayor área ocupan 8,3 km^2 y 10,2 km^2 y sus centros de emisión se encuentran a 1812 m y 1643 m de altitud respectivamente. Una y otra discurren por una pendiente de 15–20 % y no sortean importantes rupturas de pendiente, llegando a la costa donde cubren parte de las islas bajas. La presencia de conos previos rodeando las bocas eruptivas hace que el flujo en el sector de cumbres se desarrolle confinado topográficamente. Estas coladas muestran numerosos puntos de difluencia y confluencia de los flujos, dando lugar a la existencia de numerosos islotes entre ellas (once en la simulación 12 y siete en la 14). Esta cantidad de áreas aisladas entre los diferentes brazos de lava se deben a

que los flujos se encauzan en la red de drenaje y siguen su trazado dejando los correspondientes interfluvios aislados entre ellas.

Las marcadas diferencias del paisaje geográfico de la simulación 7 y las 12 y 14 permite la diferenciación en este sector de dos subunidades territoriales muy diferentes, con pocos impactos en su área más meridional y muy altos en el sector septentrional.

En este sector existe un importante grueso de población asentada de manera dispersa en la franja de medianías y que se hace más importante, desplazándose hacia la costa conforme nos acercamos al núcleo capitalino. Los municipios de Mazo y Breña Baja, dos de los seis municipios más poblados de la isla, son los que más afectados se ven por las coladas correspondientes a las simulaciones 12 y 14. Además de la población hay que tener en cuenta la existencia de otras infraestructuras críticas como son: de un lado, el aeropuerto, ya que el transporte aéreo supone la vía de comunicación más rápida entre la isla y el exterior; y de otro, la existencia de una de las zonas turísticas más importantes de la isla, donde se sitúan tanto Los Cancajos, como la Hacienda de San Jorge, así como numerosos servicios, como supermercados de grandes superficies y pequeñas zonas industriales.

En el norte de la vertiente es donde aparecen las zonas de cultivo con mayor extensión superficial. Estos están relacionados con huertos familiares y pequeños cultivos de cítricos, vid, y plataneras, abundantes por debajo de los 250 m de altitud. Sin embargo, destaca una gran superficie en abandono prolongado que deja un paisaje en forma de mosaico donde las huertas todavía cultivadas se alternan con fayal–brezal en diferentes fases de recolonización. Por otro lado, por toda la vertiente discurre la LP–2, carretera general del sur, que articula las conexiones viarias de toda la dorsal, la LP–301, carretera que conecta las Breñas con el refugio de El Pilar, y que supone una vía alternativa para la LP–3 (Carretera de La Cumbre), y junto a ellas aparecen otras vías secundarias que conectan la carretera general con la costa y cumbre.

4.3.Escenario nº3 (vertiente oeste)

Este escenario geográfico comprende las simulaciones 6, 8, 9 y 13 (Figura17 y Figura18), cuyo rasgo común es que todas ellas vierten sus lavas hacia la ladera occidental de la dorsal. Un hecho interesante de las simulaciones 6 y 8 es que pese a las diferencias de superficie - de de 4,3 y 6,1 km^2, respectivamente- y de la altura de localización de sus centros emisores -de 872 y 1246 m, respectivamente-, en ambas el

efecto que la topografía de la cumbre imprime al trazado de las coladas es similar. En estas dos simulaciones las coladas tienden a discurrir siguiendo una parte del eje de la cumbre hacia el sur, aunque sus brazos principales se derraman fundamentalmente por la vertiente oeste, dejando aislados entre ellos numerosos islotes, saltando escarpes de entre 300 y 500 m y ocupando la totalidad de las islas bajas de ese sector de la dorsal.

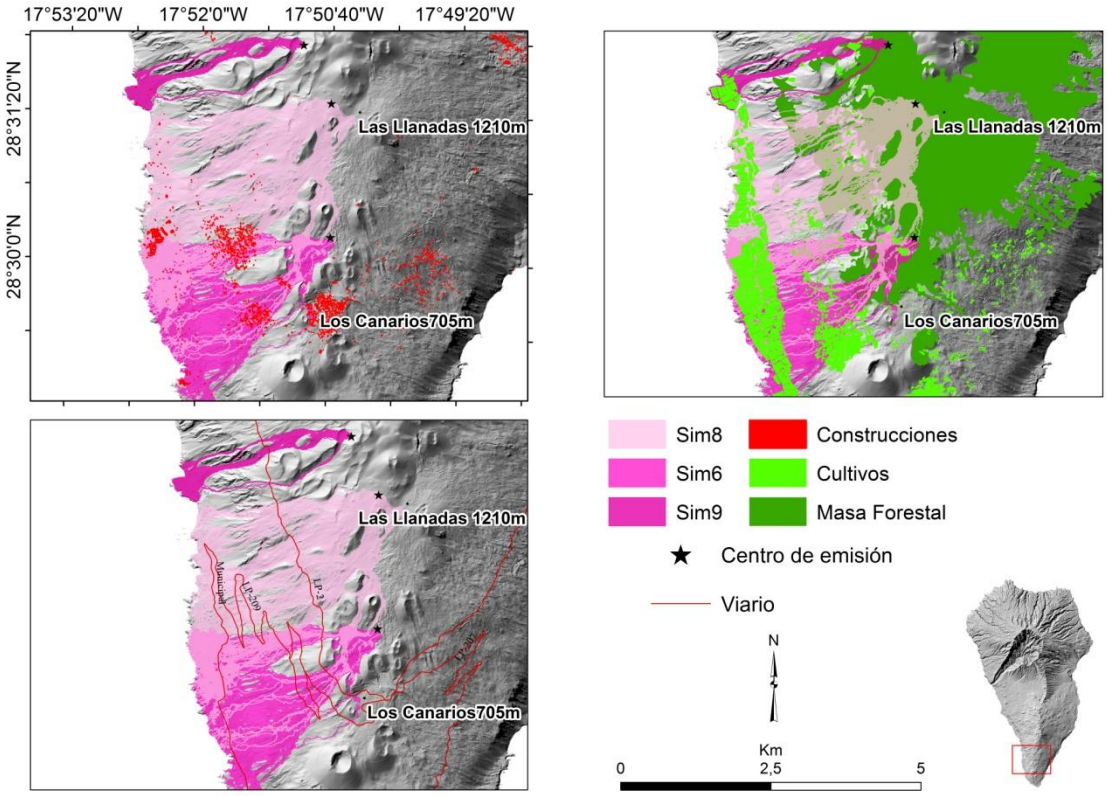


Figura17. Escenario geográfico número 3, vertiente oeste, simulaciones 6, 8 y 9. Fuentes: Grafcan, IGN, Cabildo de La Palma y Mapa Forestal Nacional. Elaboración propia.

Algo más al norte, las coladas resultantes de las simulaciones 9 y 13, con centros eruptivos situados en la ladera alta de la vertiente oeste, a 1300 y 1579 m de altitud, discurren por sectores de la ladera con una pendiente media de 43 y 24 % respectivamente, encauzándose las coladas por una red de drenaje algo más desarrollada. Ambas simulaciones desarrollan un único brazo principal que se bifurca para formar otros secundarios debido a la aparición de altos topográficos que actúan como sectores de sombra. Cabe destacar que, en la simulación 13 (Figura18), a diferencia de lo que sucede en otras simulaciones, el sector costero no se ve aislado en su totalidad por los dos flujos debido a que la colada situada al norte no llega al mar, siendo este el único flujo de las coladas que no alcanza la costa

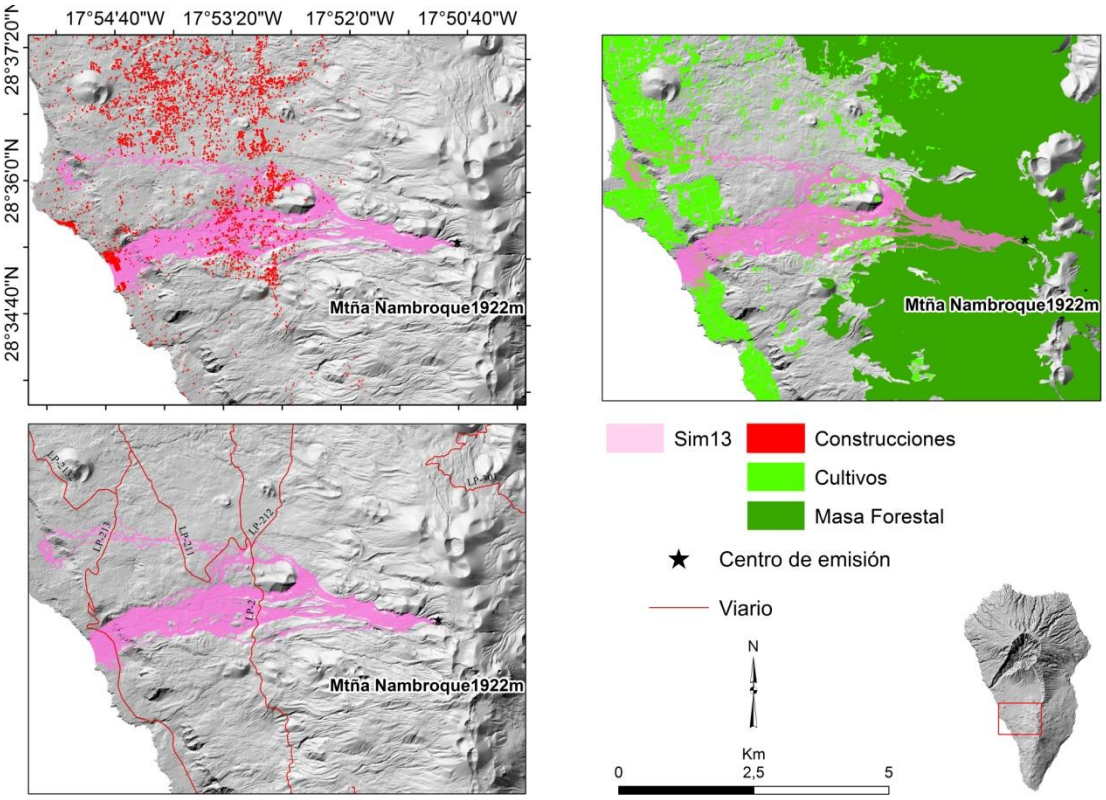


Figura18. Escenario geográfico número 3, vertiente oeste, simulación 13. Fuentes: Grafcan, IGN, Cabildo de La Palma y Mapa Forestal Nacional. Elaboración propia.

Ninguna de las simulaciones de este escenario parece afectar de lleno al sector del Valle de Aridane, pues todas discurren por el área de la vertiente en el que apenas existe ocupación humana del territorio. No obstante, la cantidad de diferencias entre las coladas 6 y 8 respecto a la 9 y 13, hace que este escenario cuente con dos subescenarios diferenciados. El del sur, correspondiente con uno de los sectores de mayores pendientes de toda la dorsal, con poco espacio entre el eje y la costa, y una ocupación humana concentrada y el del norte, con un mayor desarrollo de la ladera y una ocupación más homogénea del territorio, poblamiento disperso y mayor superficie cultivada.

En este sentido, los núcleos del sector meridional corresponden con Las Indias y Los Quemados, núcleos muy concentrados, sin apenas dispersión, pertenecientes al municipio de Fuencaliente -municipio menos poblado de la isla-; por otro lado, en el sector septentrional, aunque también disperso en las zonas de medianías y costa, el poblamiento tiende a concentrarse en torno a los principales núcleos de población de Los Llanos de Aridane, Tazacorte y El Paso. Del mismo modo, todas las instalaciones turísticas existentes entre la Punta de Las Indias y La Punta de la Cruz, entre las que se

encuentra uno de los complejos hoteleros más importantes de la isla (Teneguía Princess), se verían afectadas por la llegada de flujos lávicos a la costa.

En esta vertiente se encuentra la zona agrícola más importante de la isla caracterizada por cultivos intensivos de plataneras situados en las islas bajas y en las medianías del Valle de Aridane y vid en las medianías del sur. Respecto a la red de carreteras la LP–2, carretera general del sur que articula toda la zona meridional de la isla se vería perturbada al igual que otras carreteras secundarias de menor orden que la conectan con el sector costero. Cabe destacar, en el subescenario norte, la LP–213, que une Puerto Naos, El Remo y La Bombilla, ya que, en caso de ser afectada por un flujo lávico, tal y como pasa con la simulación 13, supondría un problema de aislamiento al solo estar conectada a la red de carreteras por uno de sus extremos.

Este es un escenario con niveles de afección medios, pues no solo se vería afectada una parte de la población, sino que también lo estarían las zonas consideradas como motor económico de la isla.

4.4.Escenario nº 4 (ambas vertientes)

En este escenario se incluyen las simulaciones 4, 5, 10 y 11. Aunque estas se desarrollen en los mismos sectores que otras simulaciones anteriores, el hecho de que las coladas se dispongan afectando a ambas vertientes hace necesario definirlo como un escenario independiente por las grandes implicaciones que la disposición de las coladas tiene, fundamentalmente, de cara a la gestión de las crisis eruptivas. Por ello, aunque en realidad las simulaciones 4 y 5 se desarrollan en un escenario geográfico completamente diferente al de las simulaciones 10 y 11, plantean problemas similares. Todas ellas generan el aislamiento de un sector de la isla frente al resto, además, el escenario más septentrional tiene un hecho añadido y es que las coladas atraviesan una buena parte de la masa forestal, lo que implicaría una gestión más problemática.

El punto de emisión de la simulación 4 se encuentra situado a 722 m y sus coladas forman cuatro brazos principales, de los cuales tres coinciden con la simulación 5 cuyo centro de emisión se encuentra situado a 632 m. Aunque predominantemente la mayor cantidad de material se derrama hacia el SE; la vertiente oeste también se ve afectada. Las áreas ocupadas aumentan sensiblemente con respecto al escenario nº 1 debido a la mayor altitud a la que se sitúan los centros de emisión, en total ocupan 6 km^2 y 4,6 km^2 respectivamente. Mirando todos los flujos en conjunto observamos como

en total hay siete islas destacables que se forman por el encauzamiento de las coladas por canales lávicos preexistentes o por la existencia de altos topográficos que hacen que los flujos se bifurquen. En este sector, los volcanes de San Antonio y Teneguía no solo constituyen obstáculos topográficos que determinan la bifurcación de las coladas, sino que constituyen puntos que actúan como zona de sombreas frente a la inundación de estos sectores por coladas de lava (Figura 19).

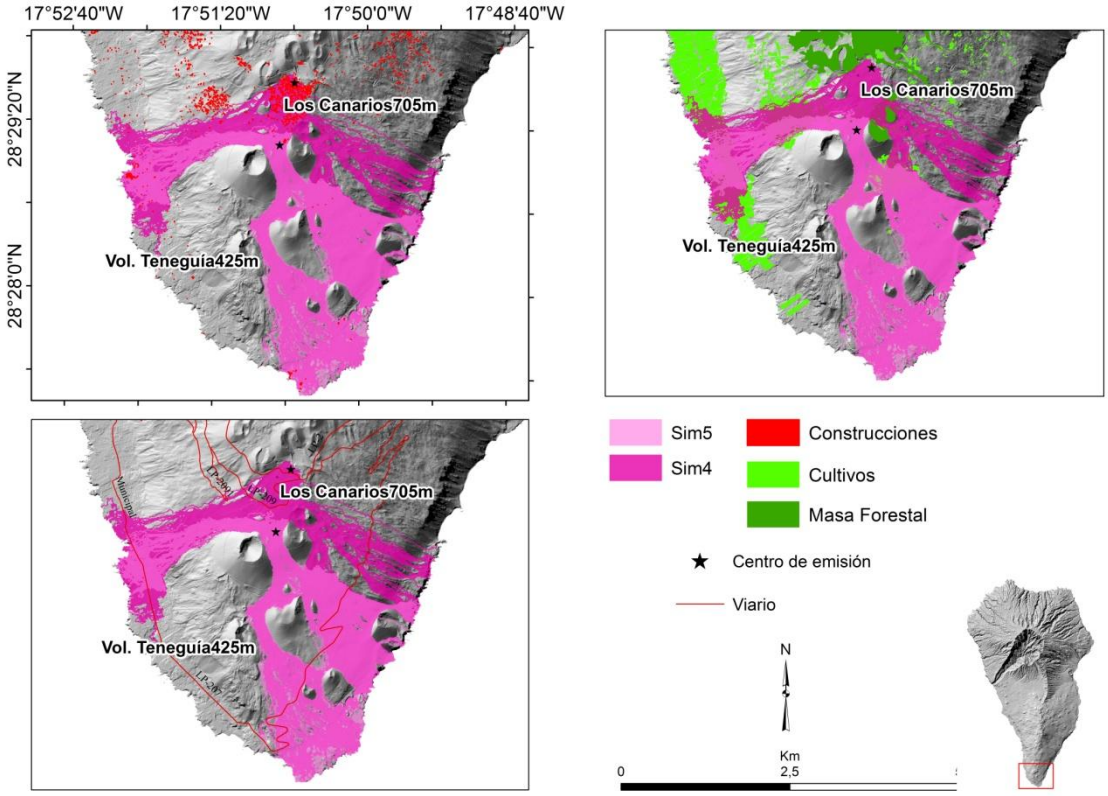


Figura 19.Escenario geográfico número 4, ambas vertientes, simulaciones 4 y 5. Fuentes: Grafcan, IGN, Cabildo de La Palma y Mapa Forestal Nacional. Elaboración propia.

Por su parte, las simulaciones 10 y 11 (Figura 20) tienen su centro de emisión a 1609 m y 1815 m de altitud y recubren un área de 2,4 km^2 y 6,2 km^2 respectivamente. Aunque se desarrollan en otro sector de la dorsal completamente distinto, y se localizan al norte de las anteriores, el diseño de las coladas determina también el aislamiento de la zona sur de Cumbre Vieja respecto al resto de la isla. La primera posee dos brazos principales que afectan a ambas vertientes de manera proporcional, mientras que la segunda derrama predominantemente hacia el este. En este sentido, el desarrollo y comportamiento de sus flujos está prácticamente determinado por la existencia de una joven red de drenaje por la que se encauzan los flujos de lava, a partir de esta red que

producen las bifurcaciones que llevan a la aparición de numerosos islotes. Ambas simulaciones, discurren por pendientes de en torno al 30-35% ocupando parte de la isla baja a la que afectan y llegando hasta el mar.

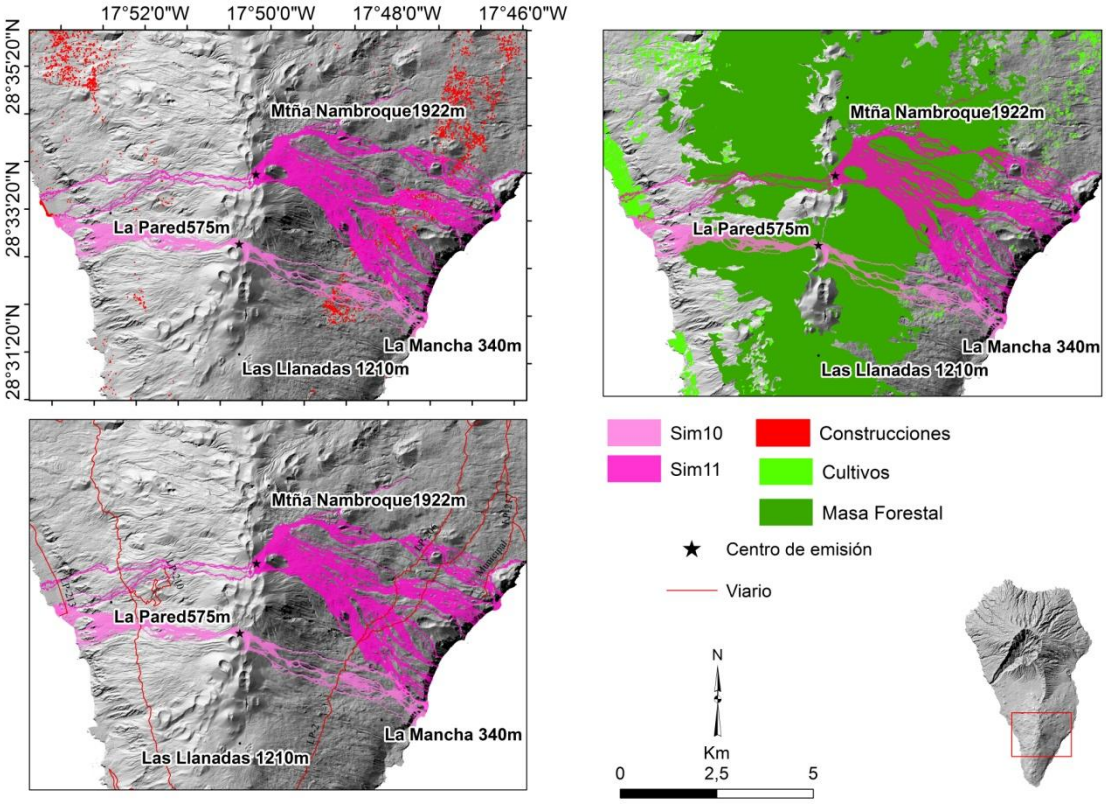


Figura 20. Escenario geográfico número 4, ambas vertientes, simulaciones 10 y 11. Fuentes: Grafcan, IGN, Cabildo de La Palma y Mapa Forestal Nacional. Elaboración propia.

Este escenario, al comprender ambas vertientes de Cumbre Vieja, desarrollándose desde el eje de la dorsal y afectando a ambos flancos de la misma, agrupa todas las características nombradas en los escenarios anteriores.

En primer lugar, cabe destacar que el punto de emisión de la colada 4 se encuentra justo encima del pueblo de Los Canarios, núcleo de población más importante del sur de la isla y del municipio de Fuencaliente. Las simulaciones 4 y 5 muestran numerosos puntos en común con el escenario nº 1, solo que al estar sus centros de emisión localizados a mayores cotas altitudinales, sus efectos serían mucho más problemáticos, al afectar al principal núcleo de población de Fuencaliente (Los Canarios) y a la zona turística (Teneguía Princess) de este municipio, incluyendo los principales sectores de cultivos y la carretera de circunvalación. No obstante, de este escenario hay que acentuar que se trata del más problemático de cara a la gestión de la

emergencia, independientemente de los posibles impactos económicos que causen el emplazamiento de las coladas de lava. En este sentido, el carácter circular de la red viaria de La Palma supondría un problema en el caso de una erupción que afecte a ambas vertientes, pues como vemos en la simulación 10 y 11, al quedar la LP–2 inutilizable un sector de la isla quedaría aislado respecto a otro, dificultando el acceso de los servicios de emergencia y las evacuaciones pertinentes. Otro ejemplo es la LP–207, que como se ve en la simulación 4 y 5, dejaría también un sector aislado respecto al resto, en este caso de menores dimensiones.

5. DISCUSIÓN

En primer lugar, cabe destacar que los resultados obtenidos en este trabajo presentan diferencias acusadas con el mapa de peligro realizado por Carracedo y Tilling (2003). El mapa de riesgo (Figura 21) de estos autores parece estar excesivamente basado en los comportamientos de las coladas en las erupciones históricas, especialmente respecto a las áreas ocupadas y al número de eventos registrados en cada zona. Por ejemplo, la zona de cumbre aparece carente de peligro cuando debería ser la zona con mayor consideración, pues en ella se abren todos los centros eruptivos y por tanto, la posibilidad de estar afectada por una colada es bastante alta, sobre todo en el caso de las simulaciones 6 y 8, cuyas coladas se derraman hacia el sur desde la misma línea de cumbre.

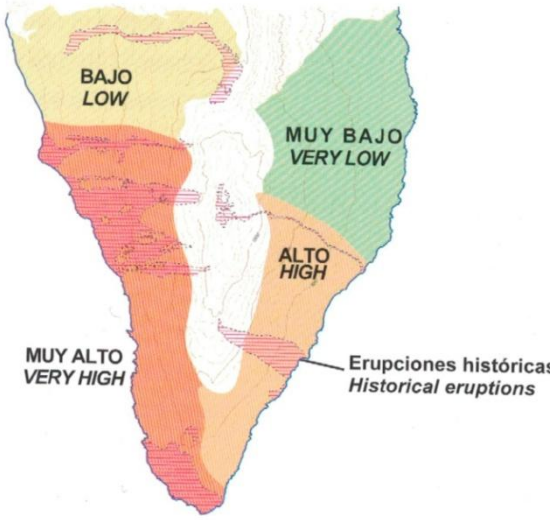


Figura 21. Mapa de riesgo volcánico en Cumbre Vieja, La Palma realizado por Tilling y Carracedo (2003) en Carracedo, 2008.

Comparándolo con el mapa obtenido de las simulaciones realizadas se pone de manifiesto que la posibilidad de que los flujos lávicos afecten a una vertiente u otra es prácticamente del 50 % pudiendo establecerse áreas con distinto nivel de peligrosidad entre ellas. A partir del análisis de los resultados de este estudio, podemos concluir que la posibilidad de que un flujo de lava afecte a una vertiente u otra depende de una variable difícil de determinar, que sería la ubicación exacta del centro de emisión respecto a la topografía de detalle del eje de la dorsal. Por ello, para establecer los niveles de peligrosidad de un flanco de la dorsal respecto a la otra sería necesario realizar mapas probabilísticos con el mayor número de centros de emisión posibles.

Por otro lado, todos los peligros asociados con una colada de lava nombrados en el apartado de "Conceptos previos" se pueden dar en cualquier erupción volcánica acontecida en Cumbre Vieja, existen matices que llevan a destacarlos más en unas zonas que en otras en función de su comportamiento. En primer lugar, al igual que sucede con todas las erupciones históricas de la isla -a excepción de la de Tacande (1430–1440?) (Romero, 2000)- todas las simulaciones que se han realizado llegan hasta el mar. De este modo, se podría afirmar que los peligros mencionados que se relacionan con el contacto de la colada con el agua tenemos que tenerlos en cuenta en todos los escenarios eruptivos. Lo mismo sucede con la destrucción de bienes inmuebles e infraestructuras, pues todas las coladas los afectan; no obstante, los escenarios geográficos situados hacia el sector sur de la dorsal parecen ser tanto menos problemáticos debido a la menor cantidad de asentamientos. Del mismo modo, la altitud determina, que sean también estos escenarios los que tienen menores posibilidades de dar lugar a incendios forestales, excluyéndose los mismos en el escenario nº1. Este hecho parece estar corroborado con lo sucedido durante las erupciones históricas, pues mientras que para las erupciones de San Antonio (1677/78) y del Teneguía (1971) no existe mención alguna a los mismos, sí que hay alusiones al desarrollo de incendios durante las erupciones de Tehuya (1585), de Martín de Tigalate (1646) y de San Juan (1949).

Las elevadas pendientes medias de la dorsal, así como la presencia de importantes rupturas de pendiente, favorecerían el desarrollo de otros peligros volcánicos como las bolas de acreción (desarrolladas en las erupciones del Volcán de Martín, del Charco y de San Antonio y Teneguía). Este tipo de peligro tiene mayor probabilidad de producirse en la vertiente oeste que en la este, debido a una pendiente

más acusada de esta ladera y a la existencia de cantiles prelitorales a lo largo de la casi totalidad de su costa. Del mismo modo, cabe recordar que esta vertiente, a diferencia de la este, está prácticamente recorrida por islas bajas de islas bajas ocupadas intensivamente por cultivos y con una mayor ocupación poblacional por lo que las bolas de acreción y los flujos piroclásticos presentarían problemas a la población.

Atendiendo a las variables humanas las coladas que hemos analizado traen consigo otros problemas que habría que sumar a los peligros ya nombrados. Si bien, la configuración orográfica de la dorsal, permite la definición clara de un escenario sur diferenciado geográficamente, no sucede lo mismo con el resto. Las coladas que vierten hacia las laderas este y oeste, no siempre discurren por ámbitos territoriales similares desde el punto de vista de la ocupación humana del territorio. En ellas es posible distinguir subunidades espaciales con diferentes rasgos. De este modo, en los escenarios 2 y 3, las simulaciones 12 y 14, en la ladera este, y la 9 y 13, en la ladera oeste, aumentan su impacto al desarrollarse en los sectores de mayor ocupación poblacional y uso del espacio agrícola. En primer lugar, la mayor cantidad de población que se vería afectada se encontraría en la vertiente este, coincidiendo con el escenario nº 2, especialmente en el norte de esta, donde se encuentran tres de los municipios más poblados de la isla (ISTAC, 2019) caracterizados por un poblamiento disperso que se desarrolla a lo largo de las medianías del flanco y que no solo implicaría más daños a la población y la economía local sino que, además, complicaría enormemente la gestión de la emergencia. En el escenario nº 2, también se ven afectados núcleos de población, principalmente en el SW. Estos núcleos, pertenecientes al municipio de Fuencaliente, se encuentran mucho más concentrados por lo que la destrucción sería mayor ya que la colada afectaría a la totalidad del poblamiento. No obstante, este municipio es el más afectado por las coladas simuladas, pero a la vez el segundo menos poblado de la isla.

El desarrollo de las coladas de lava trae consigo el aislamiento de unas zonas respecto a otras y la inhabilitación de las carreteras que atraviesan. En este sentido, teniendo en cuenta las coladas que derraman por una sola vertiente la carretera más problemática para una posible evacuación sería la LP–213 -carretera que conecta Puerto Naos y El Remo con la ciudad de Los Llanos y situada en el escenario nº 3- debido a que esta carretera solo tiene una salida y quedaría inutilizada por la simulación 13. No obstante, el mayor problema en cuanto a esto se presentaría en el caso del escenario nº4, ya que afecta a las dos vertientes. Aquí, la carretera general del sur (LP–2) quedaría

cortada en dos puntos, suponiendo el aislamiento de una parte de la isla frente a la otra y dificultando, así, la evacuación y el acceso de los servicios de emergencia.

Finalmente, conviene resaltar que los resultados obtenidos en este estudio deben ser tomados con mucha precaución ya que no se consideran una serie de variables que son de suma importancia en el desarrollo de los episodios eruptivos registrados históricamente. Por un lado, no se han tenido en cuenta la existencia de varios focos de emisión, cuando las erupciones históricas son de carácter fisural y tienen siempre entre dos y siete centros eruptivos. También, el mapa de las simulaciones parece indicar que las mayores áreas ocupadas se encuentran en el sector septentrional de la dorsal. Sin embargo, esto corresponde con la distancia del centro de emisión con la costa, mayor en dicha zona, aunque con algunas excepciones como son las simulaciones 7, 10 y 13, que al encontrarse muy constreñidas y encauzadas no ocupan áreas importantes. Por último, es necesario señalar que, en el caso de islas volcánicas, sería necesario llevar a cabo las simulaciones con los MDT de la batimetría costera, ya que como se desprende de este trabajo, solo se generan islas bajas en aquellas simulaciones en las que las lavas se derraman por plataformas lávicas existentes.

6. CONCLUSIONES

Volviendo a la hipótesis de partida, a lo largo de este trabajo ha quedado de manifiesto que el conocimiento del trazado de las coladas de lava es un paso esencial para el establecimiento de los riesgos asociados a estas y para la implantación de los posibles escenarios geográficos destinados a la planificación y la gestión de la emergencia volcánica. No obstante, como señalan algunos autores para otros contextos volcánicos (Cappello et al., 2012; Favalli et al., 2012; Pérez y Walter, 2016), en la dorsal de Cumbre Vieja pequeñas variaciones en la ubicación de los centros de emisión pueden hacer que la lava fluya en direcciones completamente diferentes. Por lo que, para dicho establecimiento e implantación se precisa de la elaboración previa de mapas de susceptibilidad volcánica muy detallados y de carácter probabilístico, debido a la alta dependencia de los resultados de la simulación con la localización de los puntos de arranque o centros de emisión de las mismas.

El escenario con menor complejidad corresponde con el situado en el extremo sur de Cumbre Vieja, es decir el escenario número 1, debido a que, aún siendo el más

susceptible de verse afectado por el desarrollo de una erupción, la ausencia de población y actividades económicas importantes disminuye el impacto de las mismas y los problemas asociados a su gestión.

Por su parte, el escenario geográfico más problemático es el número 2, correspondiente a la vertiente este. Como se ha visto, una erupción en este escenario, especialmente en el norte, es la que más problemas causaría por la presencia de importantes cantidades de población, la mayoría dispersa, y numerosos servicios y pequeñas zonas industriales y zonas turísticas.

Del mismo modo, todos los puntos de emisión utilizados para las simulaciones que se encuentran en la línea de cumbres principal de la dorsal, justo en la divisoria de aguas de ambas vertientes (simulación 4, 5, 10 y 11), son los que dan lugar a escenarios geográficos más complejos. Este escenario, que afectaría a las dos vertientes, supone el aislamiento de una parte de la isla respecto a otra, complicando la gestión de la erupción y dificultando una posible evacuación de la población y el acceso de los servicios de emergencias.

Cabe destacar que, este trabajo debe ser considerado como un simple ejercicio de análisis para establecer posibles escenarios que ayuden a la planificación y la gestión de las emergencias, no obstante en el momento de la erupción hay que tener en cuenta modelos que se adapten al escenario eruptivo de la misma y en el que también se tengan en cuenta otros tipos de peligros como aquellos relacionados con la emisión de piroclastos.

Por último, como propuesta para posteriores investigaciones, se debería contar con un modelo de batimetría que permitiera observar el aumento del perímetro costero ya que en este caso todas las coladas llegan al mar y sería interesante poder observar cuáles de ellas supone un aumento de la superficie de la isla.

7. BIBLIOGRAFÍA

Afonso, A., Aparicio, A., Hernández-Pachecho, A. Badiola, E.R. (1974). Morphology evolution of Teneguía volcano area. *Estudios Geológicos*, vol. Teneguía, 19–26.

Afonso, L. (1980). Geografía Física de Canarias. En *Geografía de Canarias.* Editorial interinsular canarias, vol. 1.

Alonso, J.J. (1986). Riesgo volcánico explosivo en Canarias. En: V. Araña (ed.) *Riesgo Volcánico*. Seminario de la UIMP, Sta. Cruz de Tenerife. p. 88–100.

Araña, V. (1988). Riesgo Volcánico en el área de Santiago del Teide. En: Memoria Geológica de la Hoja 1110–IV, Santiago del Teide (1:25.000). ITGE, Madrid. 91 pp.

Araña, V. y Fúster, V.M (1974). La erupción del volcán Teneguía, La Palma, Islas Canarias. *Estudios Geológicos*, vol. Teneguía, 15–18.

Araña, V., Felpeto, A., Astiz, M., García, A., Ortiz, R., y Abella, R. (2000). Zonation of the main volcanic hazards (lava flows and ash fall) in Tenerife, Canary Islands. A proposal for a surveillance network. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 377–391.

Barker, A. K., Troll, V. R., Carracedo, J. C., y Nicholls, P. A. (2015). The magma plumbing system for the 1971 Teneguía eruption on La Palma, Canary Islands. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170, 54.

Becerril, L. (2009). Aproximación a la peligrosidad volcánica y sus efectos en zonas costeras en las Islas Canarias. Recuperado de:https://accedacris.ulpgc.es/

Becerril, L. (2014). Volcano–structural study and long–term volcanic hazard assessment on El Hierro Island (Canary Islands). Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.

Becerril, L., Martí, J., Bartolini, S., y Geyer, A. (2017). Assessing qualitative long–term volcanic hazards at Lanzarote Island (Canary Islands). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, 17, 1145–1157.

Benitez-Padilla, S. (1952). La erupción de "Las Manchas" en La Isla de La Palma y el volcanismo canario. *El Museo Canario* 41, 51–73.

Bonelli Rubio, J.M. (1950). *Contribución al estudio de la erupción del Volcán Nambroque o San Juan (isla de La Palma) ,24 de junio a 4 de agosto de 1949*.Instituto Geográfico y Catastral, Madrid

Bravo, T. (1980): Riesgo de erupciones volcánicas en las Canarias. Univ. de La Laguna. Informe para la D.G. de Protección Civil. 6 pp.

Bryant, Edward (1991). *Natural Hazards*. Bretland: Cambridge University Press.

Cappello, A, Neri, M., Acocella, V., Gallo, G., Vicari, A. & Negro, C. Del (2012) Spatial vent opening probability map of Etna volcano (Sicily, Italy). *Bulletin of Volcanology*, 74(9): 2083–2094. DOI 10.1007/s00445-012-0647-4. 3, 18

Carracedo, J.C. (1988): El riesgo volcánico. En: *Riesgos Geológicos*. Serie Geología Ambiental. Pub. Inst. Geol. Minero de España, Madrid, 83–97

Carracedo, J.C., Soler, V., Rodríguez Badiola, E. y Hoyos, M. (1990b): Zonificación de riesgo para erupciones de baja magnitud en la isla de Tenerife. IV Reunión Nal. de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio (Gijón), 65–72.

Carracedo, J. C., Rodríguez Badiola, E., y Soler, V. (1990a). Aspectos volcanológicos y estructurales. Evolución petrológica e implicaciones en riesgo volcánico de la erupción de 1730 en Lanzarote. Islas Canarias. *Estudios Geológicos* 46(1–2), 25–55

Carracedo, J. C., y Rodríguez Badiola, E. (1991). *Lanzarote. La erupción volcánica de 1730*. Lanzarote. Cabildo Insular.

Carracedo, J.C., Badiola,. E.R. de la Nuez, J. y Pérez Torrado, F.P (2001) Geology and volcanology of La Palma and El Hierro Western Canaries. *Estudios geológicos* 57, 175–273.

Carracedo, J. C., Singer, B., Jicha, B., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Meco, J. y Láinez, A. (2003). La erupción y el tubo volcánico del Volcán Corona (Lanzarote, Islas Canarias).*Estudios Geológicos*, 59 (5–6), 277–302.

Carracedo, J. C., Guillou, H., Paterne, M., Scaillet, S., Rodríguez Badiola, E., Paris, R., y Hansen Machín, A. (2004). Análisis del riesgo volcánico asociado al flujo de lavas en Tenerife (Islas Canarias): escenarios previsibles para una futura erupción en la isla. Recuperado en: http://hdl.handle.net/10261/2328

Carracedo, J.C. (2008) *Los volcanes de las Islas Canarias. Tomo IV La Palma, La Gomera, y El Hierro.* Estación Volcanológica de Canarias, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Carracedo, J. C., y Torrado, F. J. P. (2015a). Peligros volcánicos ¿predecibles, prevenibles, mitigables? *Enseñanza de las ciencias de la tierra*: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 23(1), 5–11.

Carracedo, J.C y Pérez-Torrado, F.J (2015b). Peligros asociados a las coladas de lava. *Enseñanzas de las Ciencias de La Tierra*, 23, 49–58.

Connor, C. B., Connor, L. J., Germa, A., Richardson, J. A., Bebbington, M. S., Gallant, E., y Saballos, A. (2019). How to use kernel density estimation as a diagnostic and forecasting tool for distributed volcanic vents. *Statistics in Volcanology*, 4(1), 3.

Day, S. J. Carracedo, J. C., Guillou, H., y Gravestock, P. (1999). Recent structural evolution of the Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands: volcanic rift zone reconfiguration as a precursor to volcano flank instability? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94(1–4), 135–167.

De la Nuez Pestana, J., Ruiz, R. C., Navarro, J. R. C., Rodríguez, C. F., Lukács, R., Harangid, S., y Jourdan, F. (2018) La Palma: desde las entrañas hasta la piel de un volcán. En *La Palma agua, tierra, fuego y cielo*. Actas XIII Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, 45–82.

DeBoer, M. (2015). Understanding the heat map. Cartographic perspectives, (80), 39-43.

Expósito, T. B. (1970). Impresiones sobre el volcán" Teneguía". Estudios Canarios: Anuario del Instituto de Estudios Canarios, (16), 65–66.

Favalli, M., Tarquini, S., Papale, P., Fornaciai, A. & Boschi, E. (2012) Lava flow hazard and risk at Mt. Cameroon volcano. *Bulletin of Volcanology*, 74(2):423–439. DOI 10.1007/s00445-011-0540-6. 3, 18

Felpeto, A., Araña, V., Ortiz, R., Astiz, M., y García, A. (2001). Assessment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote (Canary Islands). *Natural hazards*, 23 (2–3), 247–257.

Felpeto A., (2009) A GIS–based tool for volcanic hazard assessment, User's Guide. Observatorio Geofísico Central, IGN.

Fernández, C., de la Nuez, J., Casillas, R., y García Navarro, E. (2002). Stress fields associated with the growth of a large shield volcano (La Palma, Canary Islands). *Tectonics*, 21 (4), 13–18.

Galindo, I., Romero, M. C., Sánchez, N., y Morales, J. M. (2016). Quantitative volcanic susceptibility analysis of Lanzarote and Chinijo Islands based on kernel density estimation via a linear diffusion process. Scientific reports, 6, 27381.https://doi.org/10.1038/srep27381

García-Rodríguez, J. L. (2013). Paisajes agrarios de Canarias. En Anales de geografía de la Universidad Complutense, Vol. 33, 1, 93–132.

Gómez, F. (2006). Cartografía de peligrosidad de la isla de Tenerife. Memoria. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Educación y Ciencia.

González, J.C (26 de abril de 2014). Análisis de la trayectoria de coladas de lava. Recuperado de http://analisisterritoriales.blogspot.com/2014/04/analisis-de-la-trayectoria-de-coladas.html

Goya, F. (2017). Fragmentos esféricos en coladas de lavas históricas (génesis y tipologías). Trabajo Fin de Grado, Universidad de La Laguna.

Harris, A.J.L., Rowland, S.K., (2001). FLOWGO: A kinematic thermo–rheological model for lava flowing in a channel. *Bulletin of Volcanology*. 63, 20–44.

Hernández Pacheco, A (1982a). Sobre una posible erupción en 1793 en la isla de El Hierro (Canarias).*Estudios Geológicos*, 38, 15–25.

Hernández Pacheco, A y Vals, M.C. (1982b) The historical eruptions of La Palma Island (Canarias). *Arquipélago Série Ciências da Natureza*, 3, 83–94 Islas Canarias: Tauro Producciones.

Klügel, A., Schmincke, H. U., White, J. D. L., y Hoernle, K. A. (1999). Chronology and volcanology of the 1949 multi–vent rift–zone eruption on La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94 (1–4), 267–282.

Klügel, A., Hoernle, K. A., Schmincke, H. U., y White, J. D. (2000). The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): Petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift zone eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3), 5997–6016.

Klügel, A., Hansteen, T. H., & Galipp, K. (2005). Magma storage and underplating beneath Cumbre Vieja volcano, La Palma (Canary Islands). *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1–2), 211–226

López, F.J y Pellicer, M.J (2014). Uso de Sistemas de Información Geográfica para el cálculo del volumen de los materiales emitidos en la erupción de 1971 del volcán Teneguía (La Palma, Islas Canarias). *Geogaceta*, 56, 59–62.

Marrero, J. M., García, A., Berrocoso, M., Llinares, Á., Rodríguez-Losada, A., y Ortiz, R. (2019). Strategies for the development of volcanic hazard maps in monogenetic volcanic fields: the example of La Palma (Canary Islands). *Journal of Applied Volcanology*, 8(1), 6.

Martel San Gil, M. (1960). *El volcán de San Juan: También llamado de "Las Manchas" y del "Nambroque", La Palma (Canarias*). Madrid, Instituto de Edafología, Sección de Petrografía Sedimentaria.

Martí, J., Araña, V., Ablay, G., Bryan, S., Mitjavila, J., Raposo, S., Pujadas, A. y Romero, C. (1994a): Caracterización de la actividad eruptiva en Tenerife durante los últimos 200.000 años. En: A. García y A. Felpeto (eds.) *In Memoriam Dr. José Luis Díez Gil*. Serie Casa de los Volcanes nº 3, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, 157–178.

Martí, J., Mitjavila, J., y Araña, V. (1994b). Stratigraphy, structure and geochronology of the Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands). *Geological Magazine*, 131 (6), 715–727.

Martí, J., y Gudmundsson, A. (2000). The Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands): an overlapping collapse caldera generated by magma-chamber migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 161–173.

Martí, J., y Felpeto, A. (2010). Methodology for the computaion of volcanic susceptibility. An example for mafic and felsic eruptions on Tenerife (Canary Islands). *Journal of volcanology and geothermal research*, 195, 69–77.

Martí, J., Sobradelo, R., Felpeto, A., y García, O. (2012). Eruptive scenarios of phonolitic volcanism at Teide–Pico Viejo volcanic complex (Tenerife, Canary Islands). *Bulletin of Volcanology*, 74 (3), 767–782.

Martí, J. (2017, September 06). Assessing Volcanic Hazard: A Review. Oxford Handbooks Online. Doi: 10.1093/oxfordhb/9780190699420.013.32

Mossoux, S., Saey, M., Bartolini, S., Poppe, S., Canters, F., Kervyn, M., (2016). Q–LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. Comput. Geosci., 97, 98–109. doi:10.1016/j.cageo.2016.09.003

Mossoux, S., Bartolini, S., Feltz, A., Poppe, S., Canters, F. and Kervyn, M.(2018).Q–lavha: a quantum gis plugin to simulate lava flows. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.09.003

Ortiz, R. (1996). *Riesgo volcánico*. Servicio de Publicaciones, Excmo. Cabildo de Lanzarote.

Ortiz , R. (2000) Introducción a la física de las lavas. En Astiz, M., y García, A. *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica.* Excmo. Cabildo de Lanzarote, Lanzarote, 61–72.

Pérez, N. M. & Walter, T. R. (2016) Lava flow hazard at Fogo Volcano, Cabo Verde, before and after the 2014–2015 eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16 (8):1925. DOI 10.5194/nhess-16-1925-2016. 18

RiesgoMap (2013). Prevención de riesgos naturales y tecnológicos en la planificación territorial y urbanística. Programa de cooperación transnacional madeira-azores-canarias, Gobierno de Canarias. Recuperado de https://opendata.sitcan.es/upload/seguridad/gobcan_riesgomap_memoria-metodologia.pdf

Romero, C. (1990): Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario. Tesis Doctoral. Gobierno de Canarias (ed.). 2 vols., 1391 pp.

Romero, C (2000) Actividad volcánica histórica en las Islas Canarias. En Mar Astiz y Alicia García (Edtres científicos) Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Serie Casa de Los Volcanes, nº 7. Servicio de Publicaciones del Excmo Cabildo Insular de Lanzarote. pag 115–128

Romero, C. (2003). *El relieve de Lanzarote*. Servicio de Publicaciones, Cabildo de Lanzarote.

Romero, C.(2016). Historia de Volcanes. Isla de El Hierro. En Arozena, E. y Romero. *Temas y Lugares. Homenaje a Eduardo Martínez de Pisón*. Publicaciones Institucionales, homenajes/7, 327–374.

Romero, J. y Bonelli, J. (1951) *La Erupción del Nambroque*. Talleres del Instituto Geográfico y Catastral, Madrid.

San Miguel de la Cámara, M., Fúster Casas, J. M., y Martel, Y. M. (1952). Las erupciones y materiales arrojados por ellas en la Isla de La Palma–Junio–Julio de 1949. *Bulletin of Volcanology,* 12 (1), 145–163.

Scaini, C., Felpeto, A., Martí, J., y Carniel, R. (2014). A GIS–based methodology for the estimation of potential volcanic damage and its application to Tenerife Island, Spain. *Journal of volcanology and geothermal research*, 278, 40–58.

Soler, V. y Carracedo, J.C. (1983). Elaboración mediante ordenador del mapa de riesgo volcánico ponderado de la isla de Tenerife. Tomo V Asam. Nal. Geod. Geof., III: 23–65.

Syavulisembo, A. M., Havenith, H. B., Smets, B., d'Oreye, N., y Marti, J. (2015). Sensibility analysis of VORIS lava-flow simulations: application to Nyamulagira volcano, Democratic Republic of Congo. Natural Hazards y Earth System Sciences Discussions, 3 (3). Doi: 10.5194/nhessd-3-1835-2015

Tilling, R. I. y Carracedo, J. C., (2003). *Geología y volcanología de islas volcánicas oceánicas: Canarias–Hawaii*. Caja General de Ahorros de Canarias.

Troll, V. y Carracedo, J.C. (2016). Chapter 3–The Geology of La Palma. En *The Geology of the Canary Islands,* 101–180.

UNISDR (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, Ginebra, Suiza.

Williams, H., y McBirney, A. R. (1979). *Volcanology*, 397 pp. Edit: Freeman, Cooper y Co.

ANEXO CARTOGRÁFICO

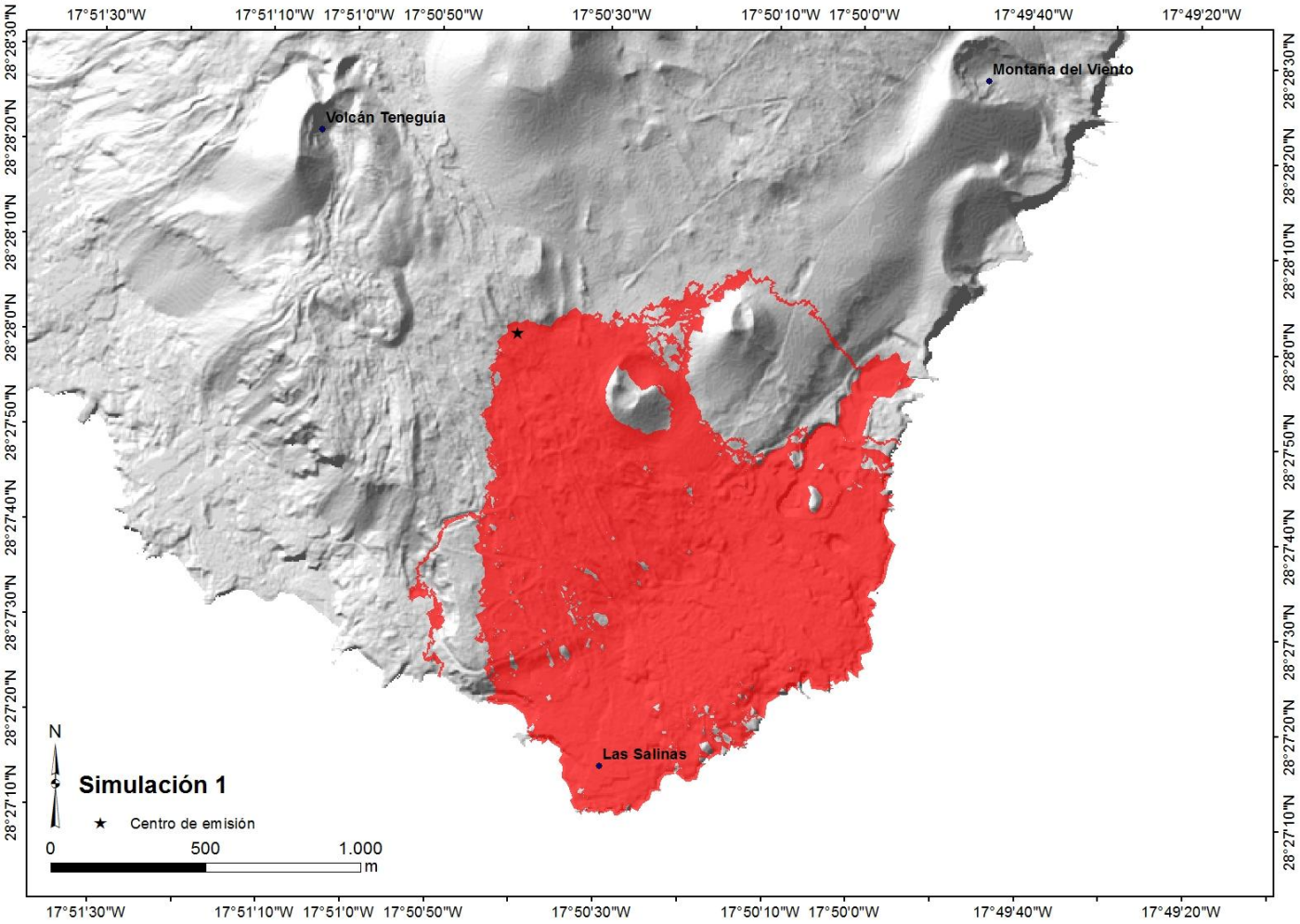


Figura22. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 1.

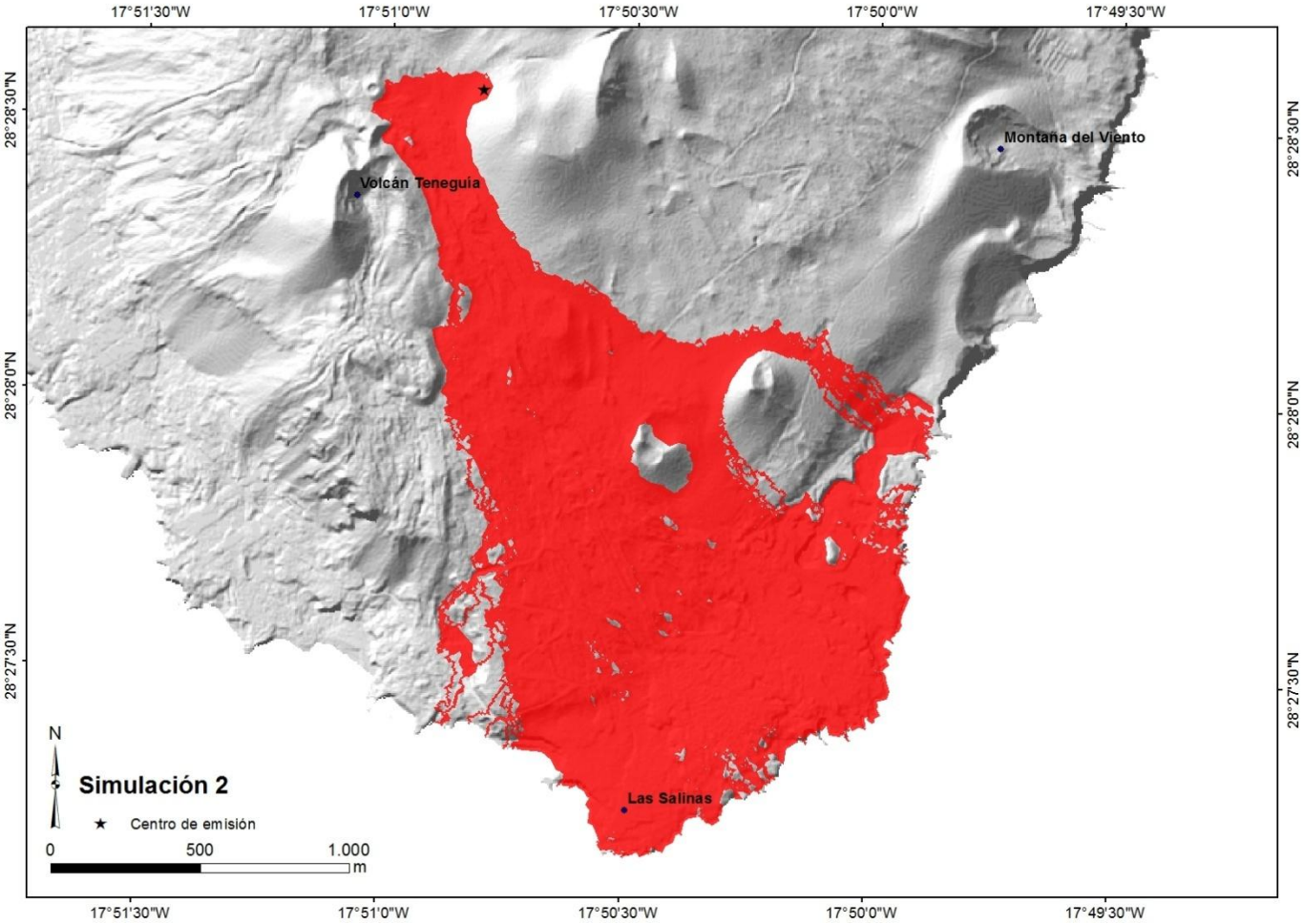


Figura 23. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 2.

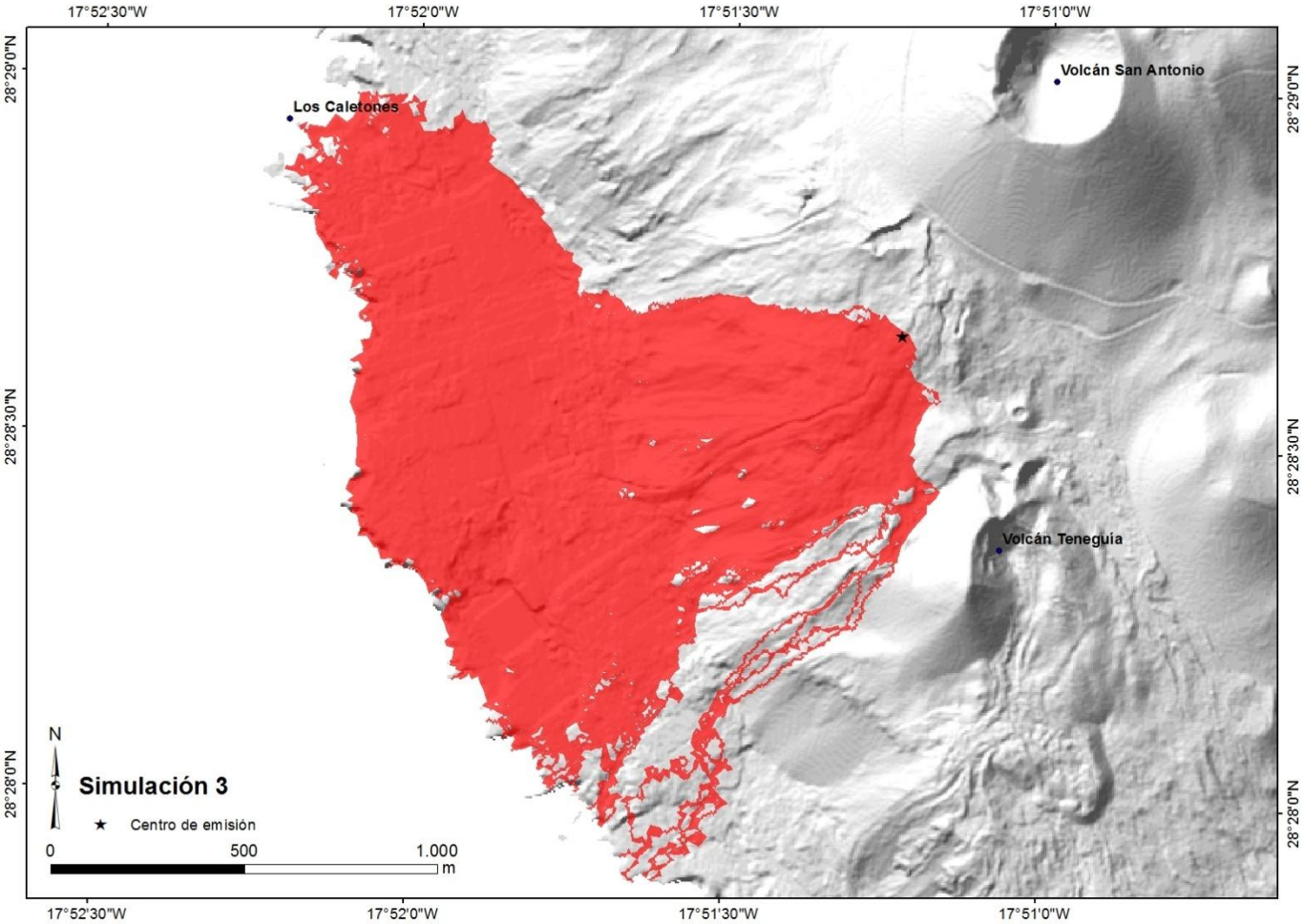


Figura 24. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 3.

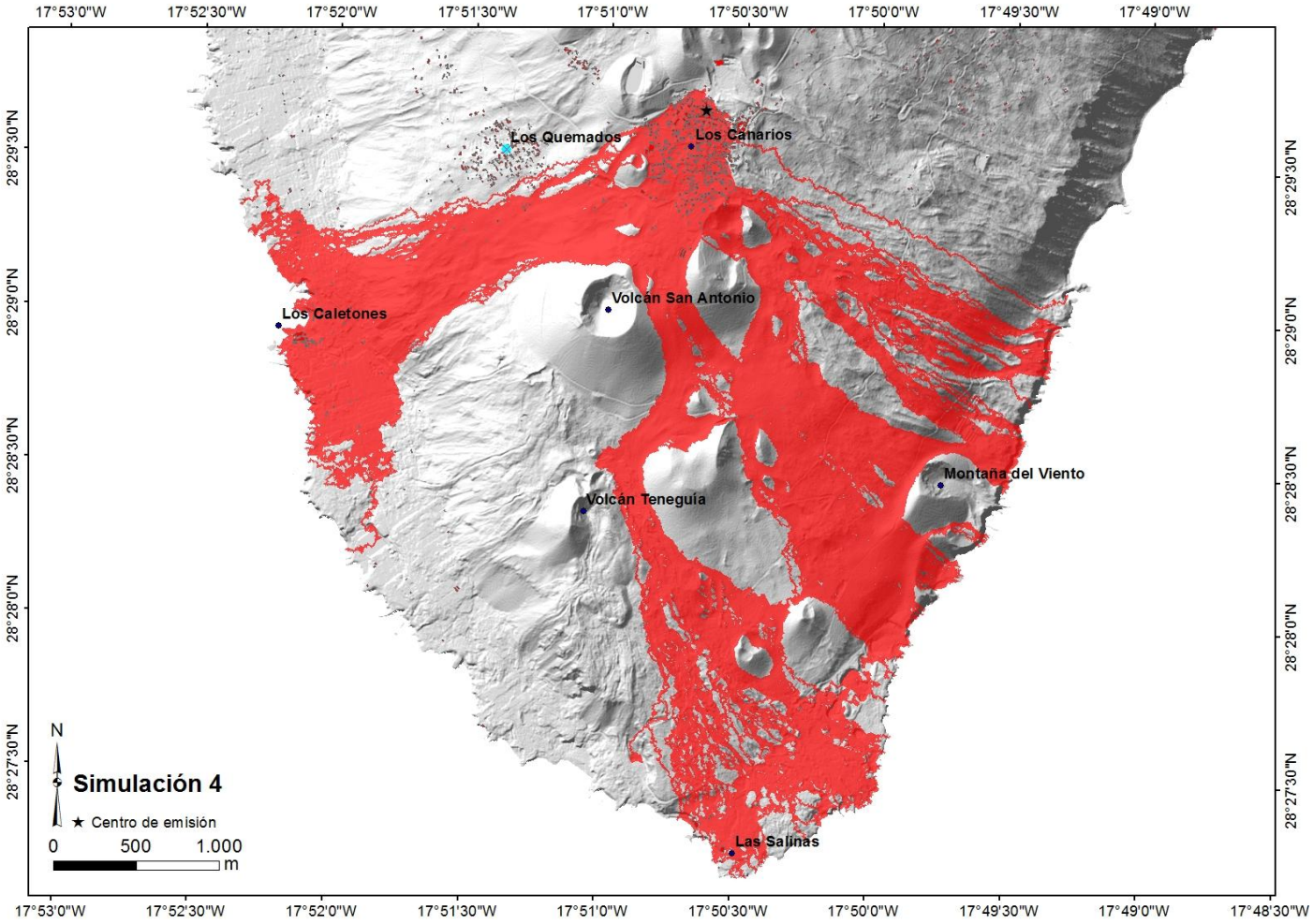


Figura 25.Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 4.

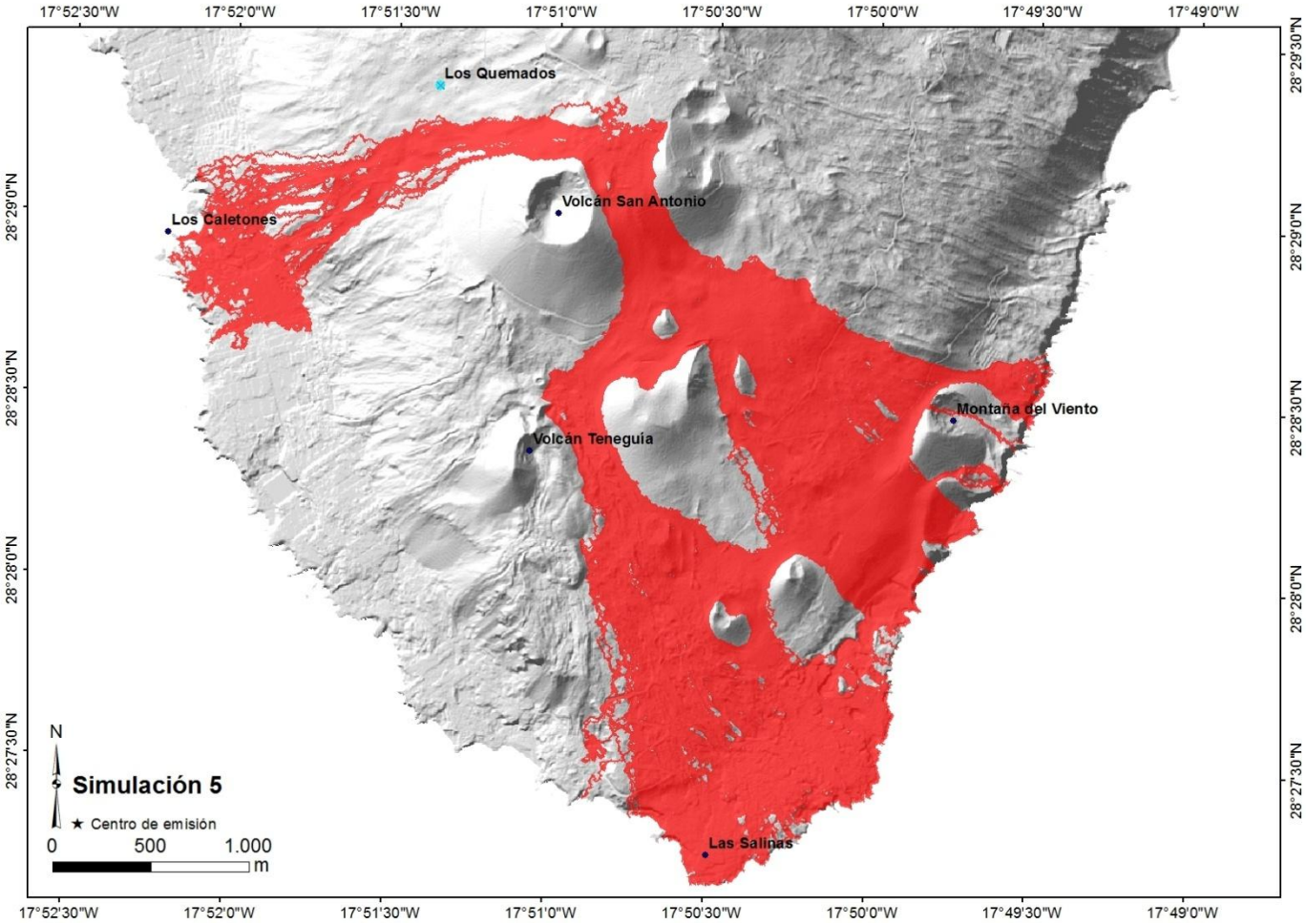


Figura 26.Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 5.

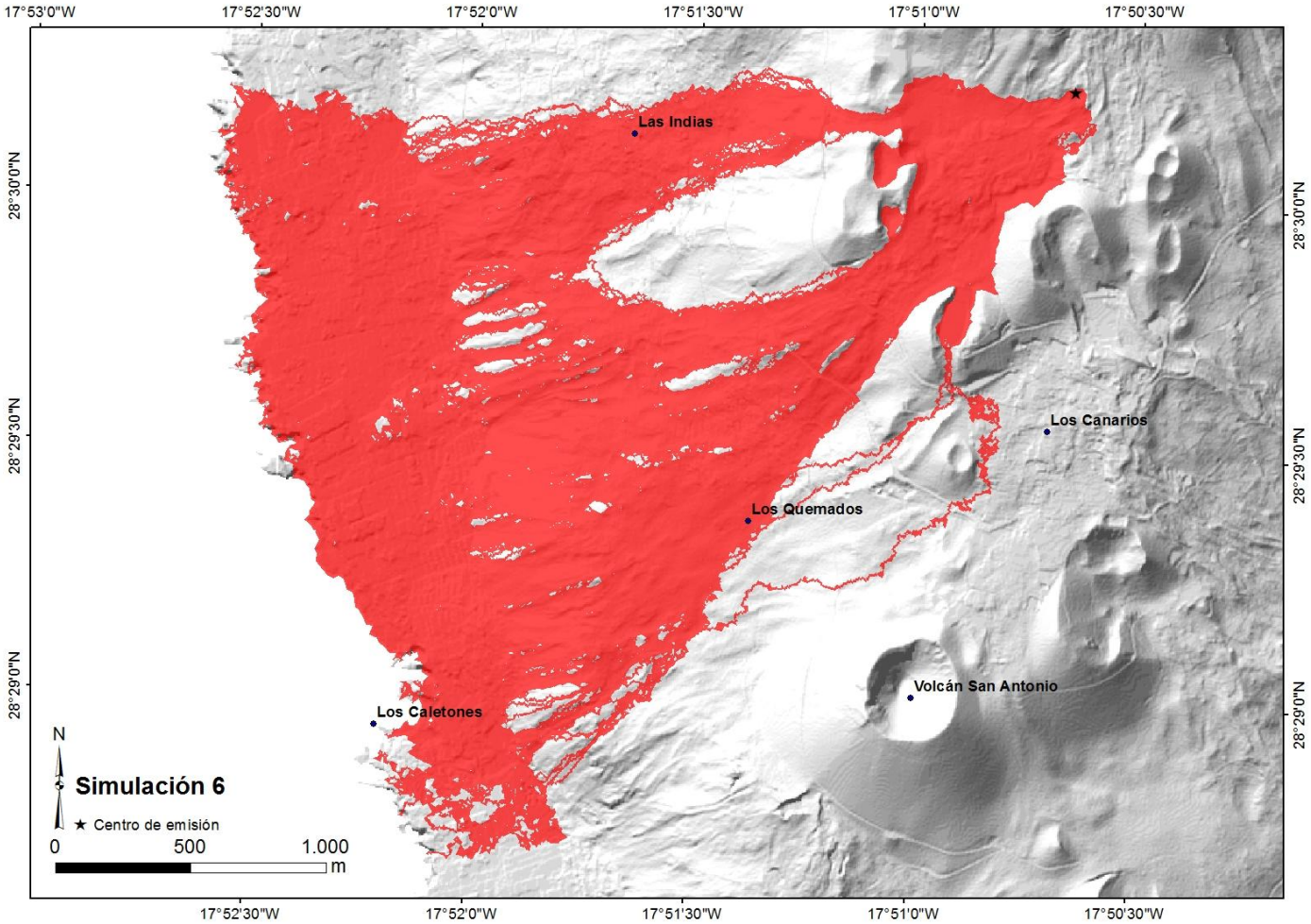


Figura 27. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 6.

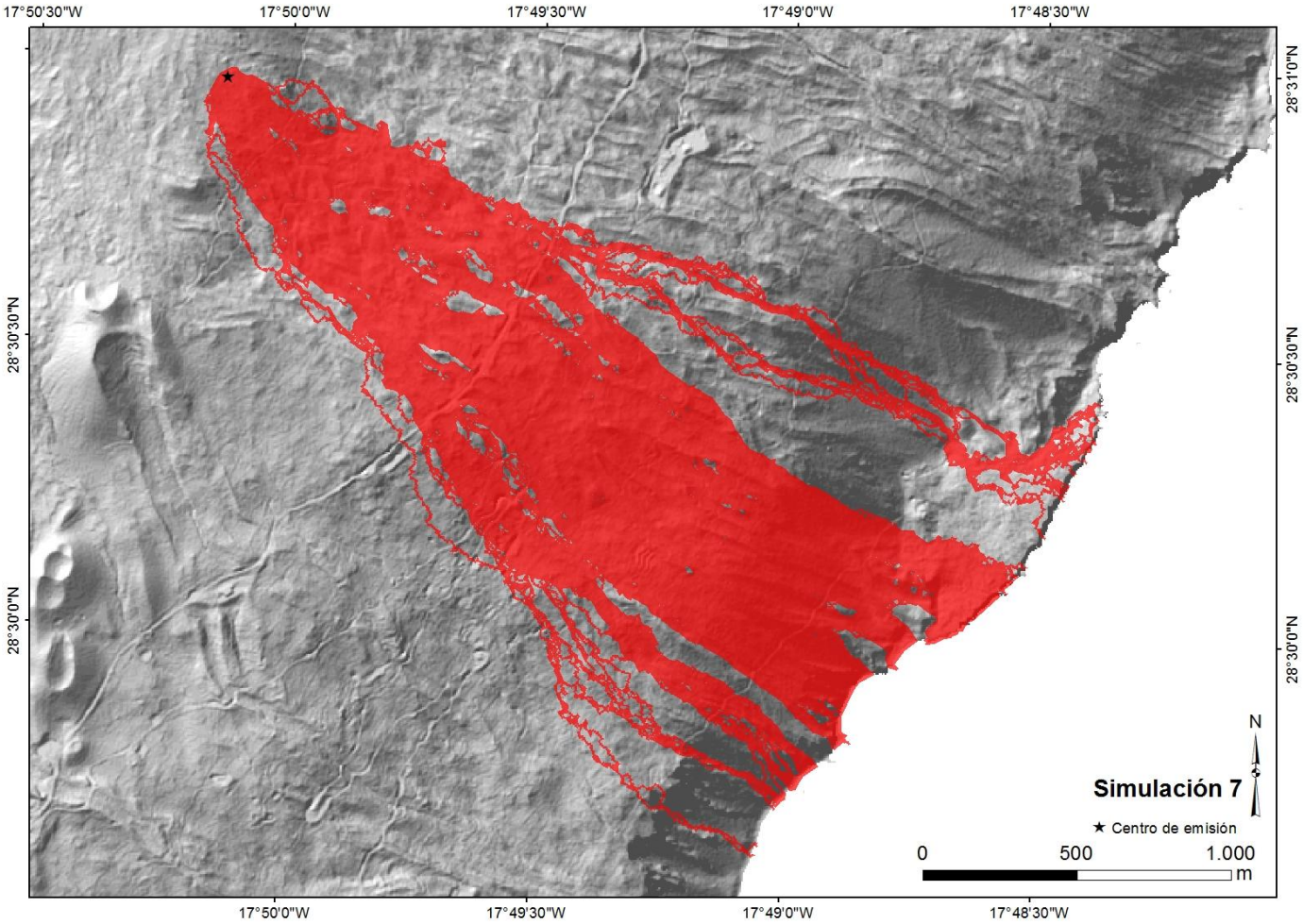


Figura28. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 7.

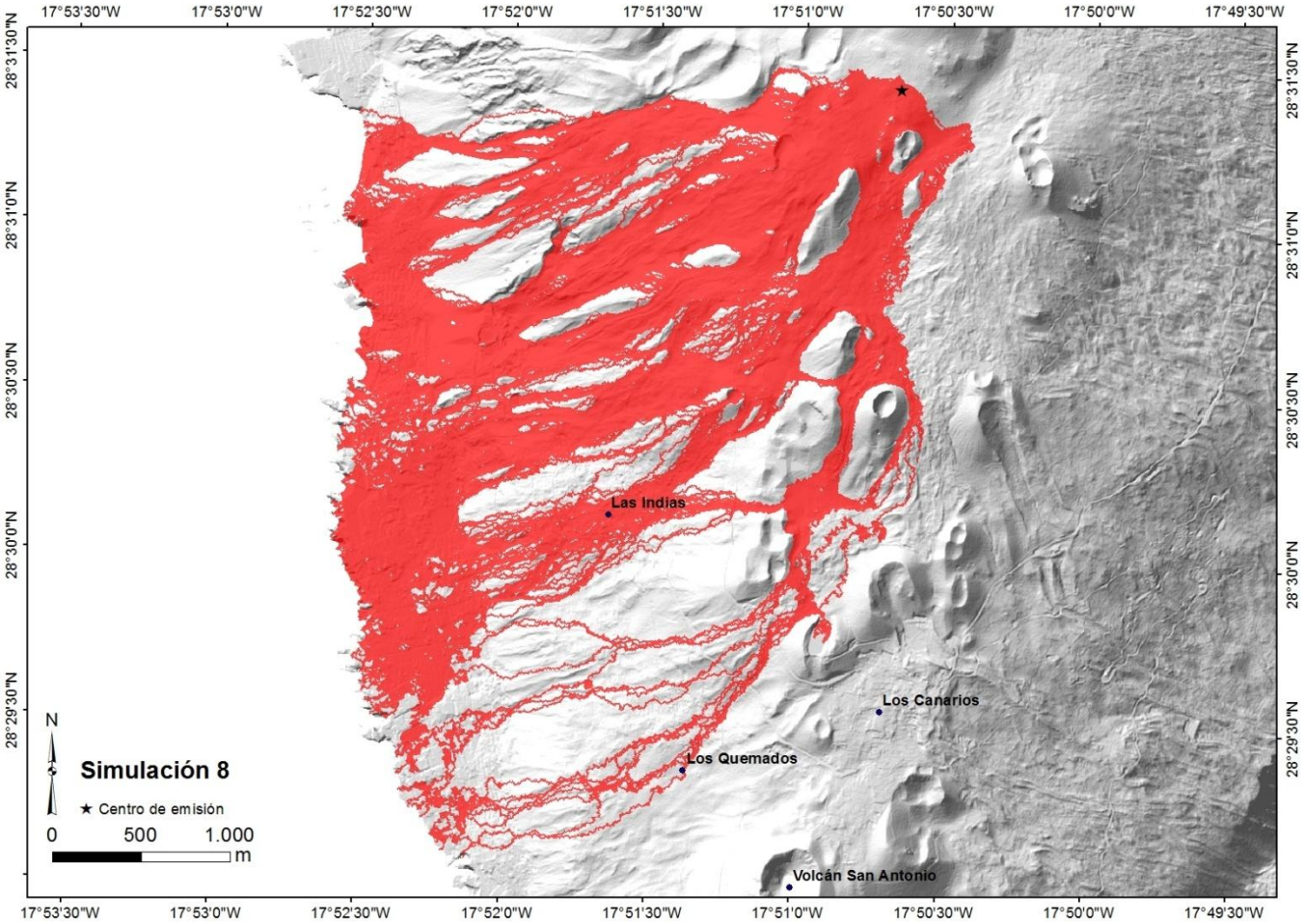


Figura29. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 8.

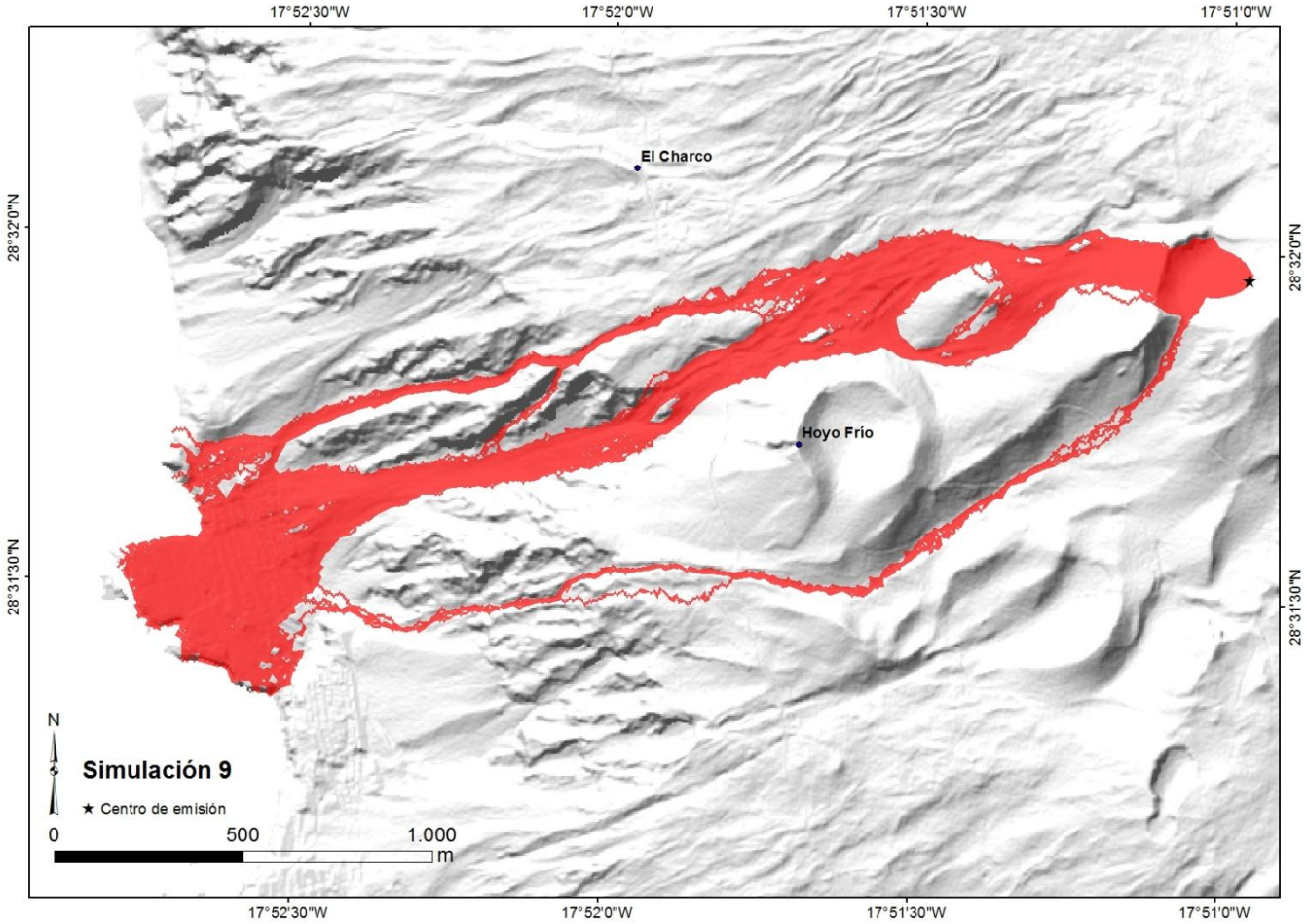


Figura30.Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 9.

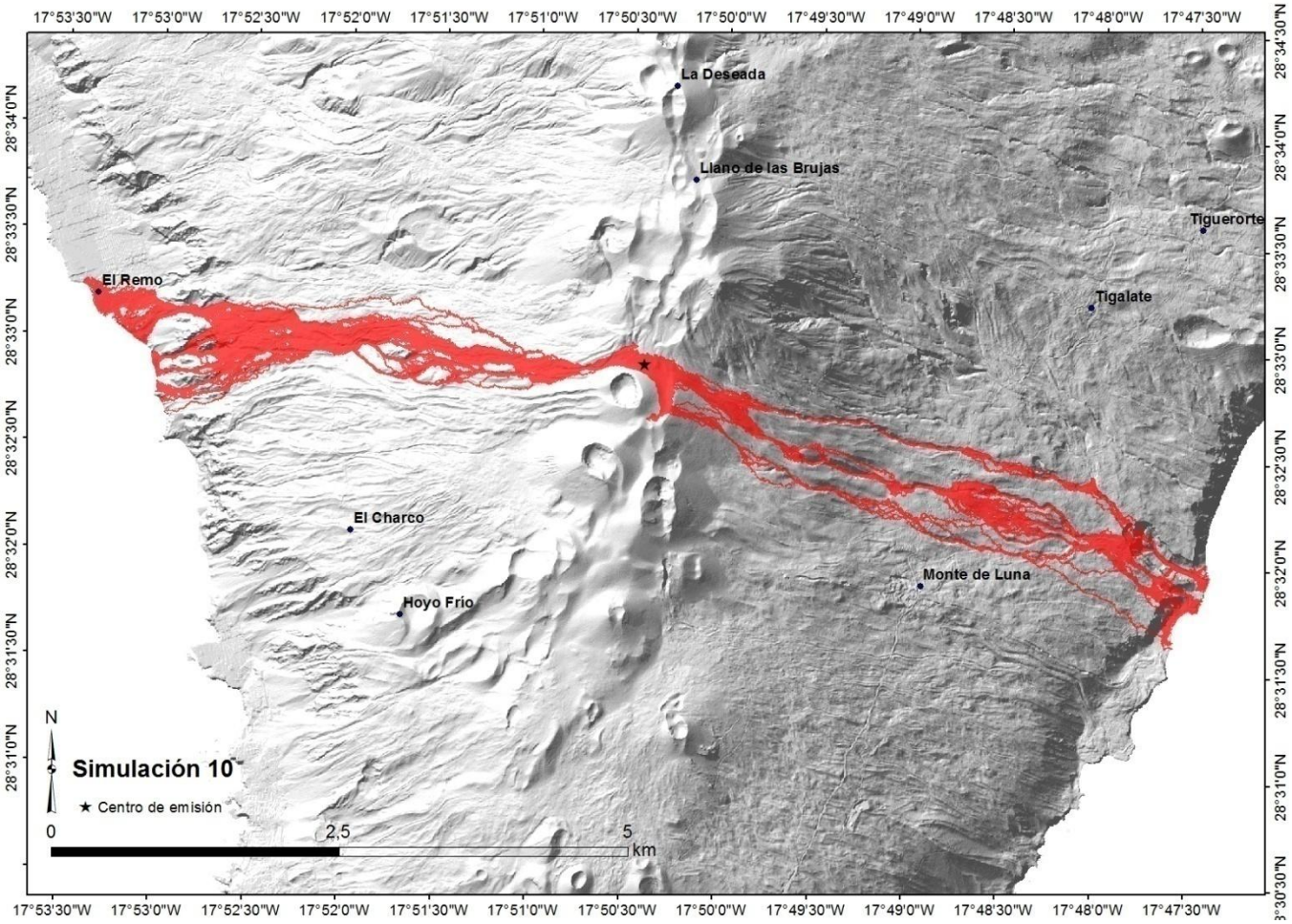


Figura31. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 10.

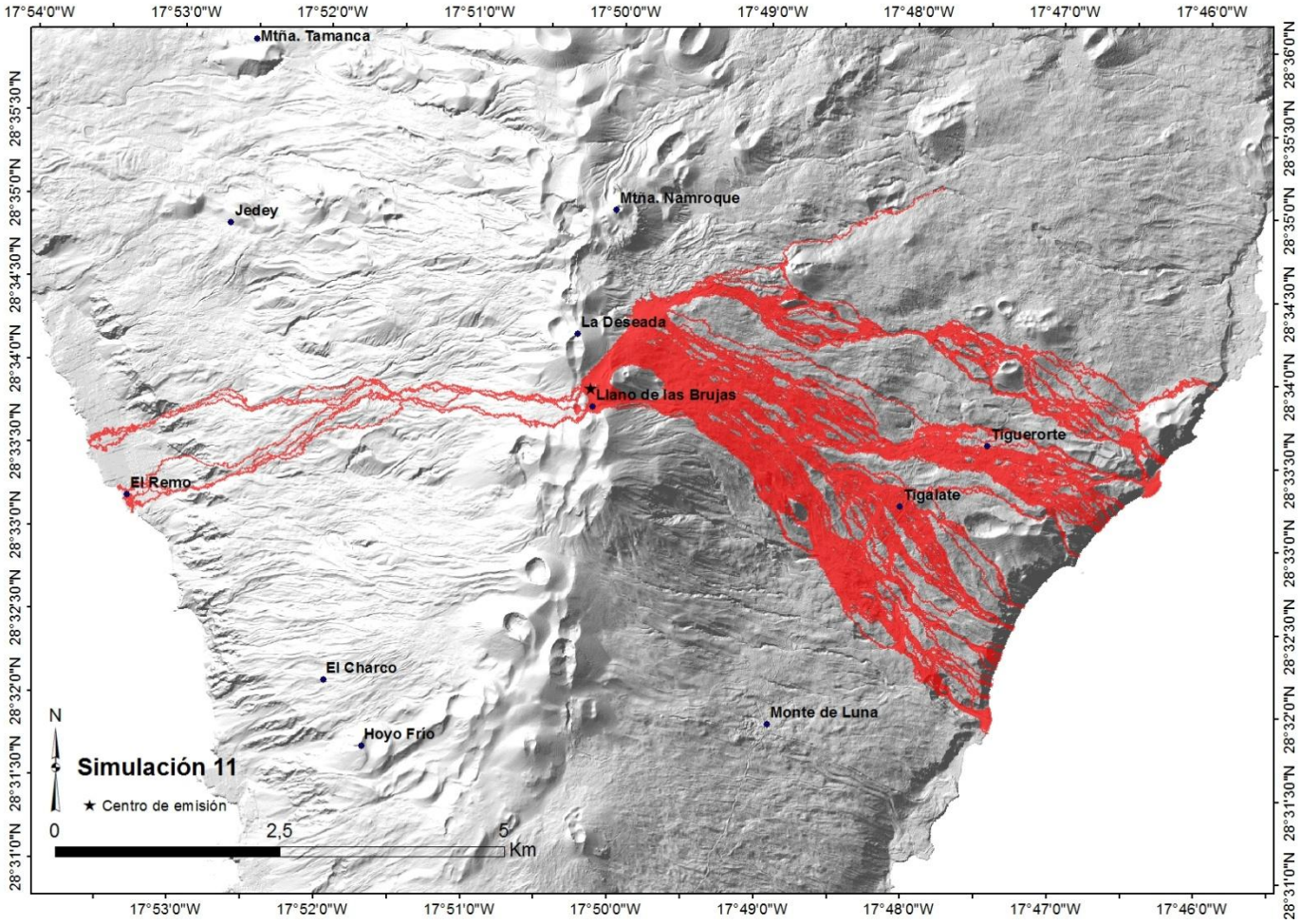


Figura32. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 11.

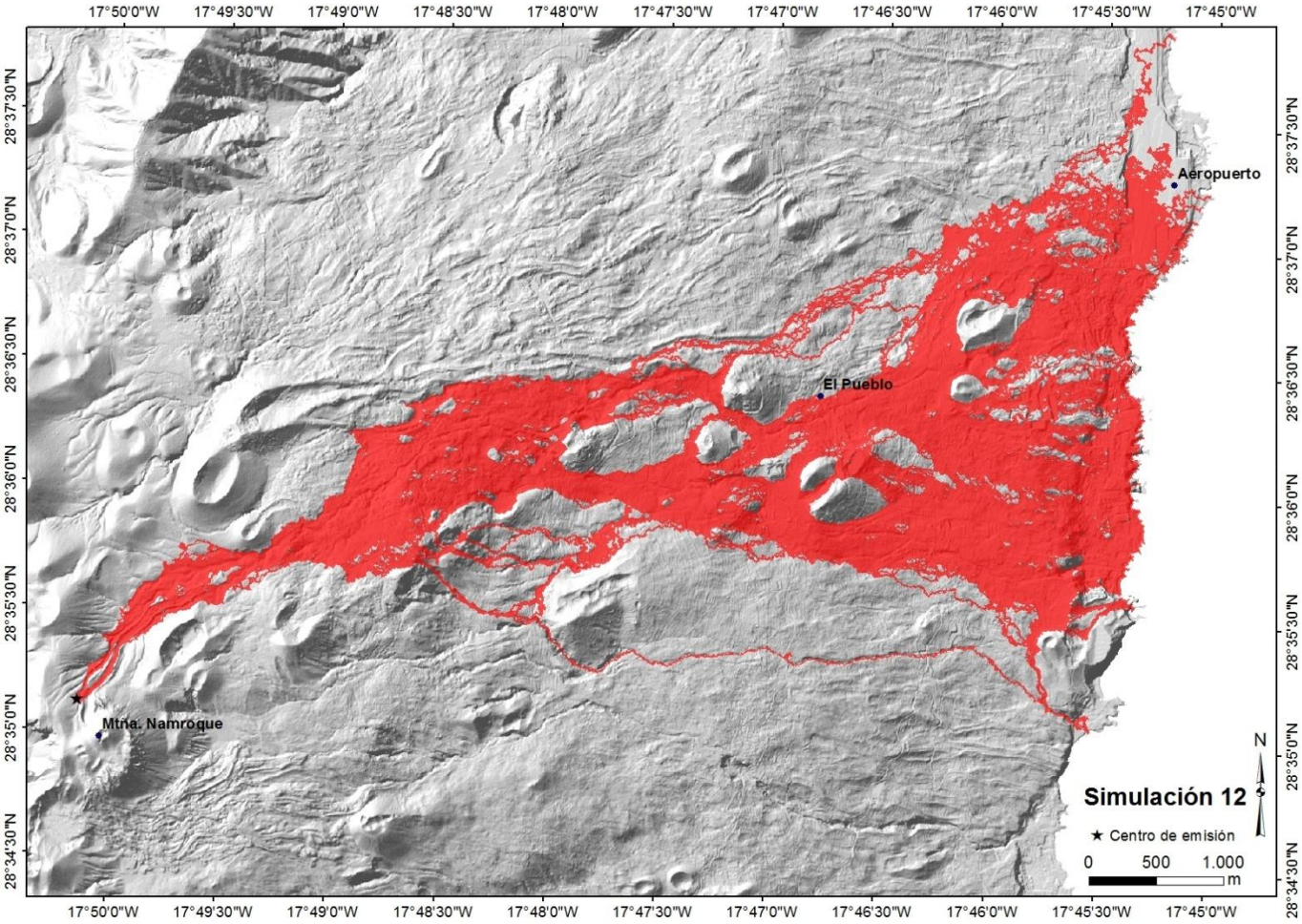


Figura 33. Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión12.

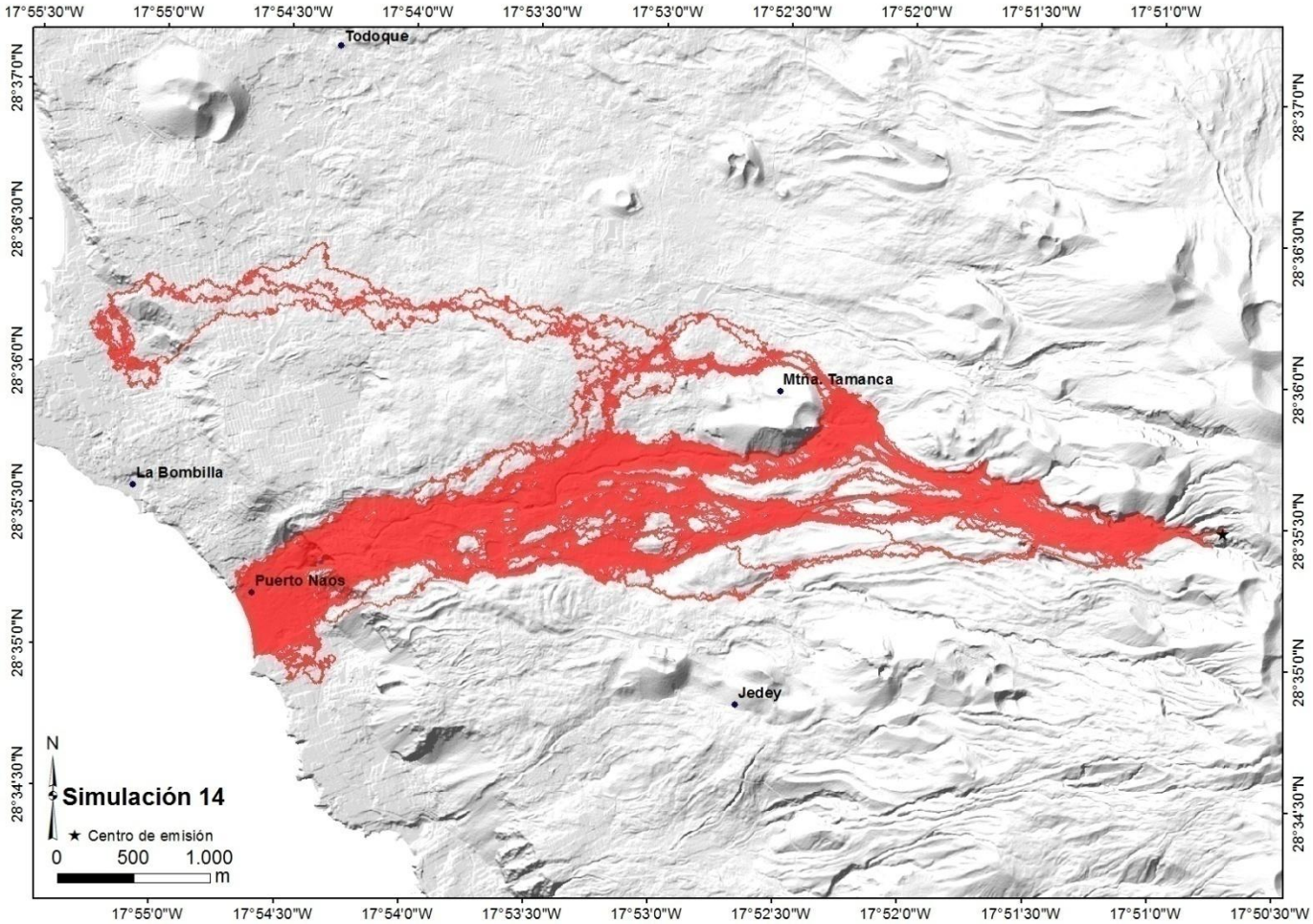


Figura34.Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión13.

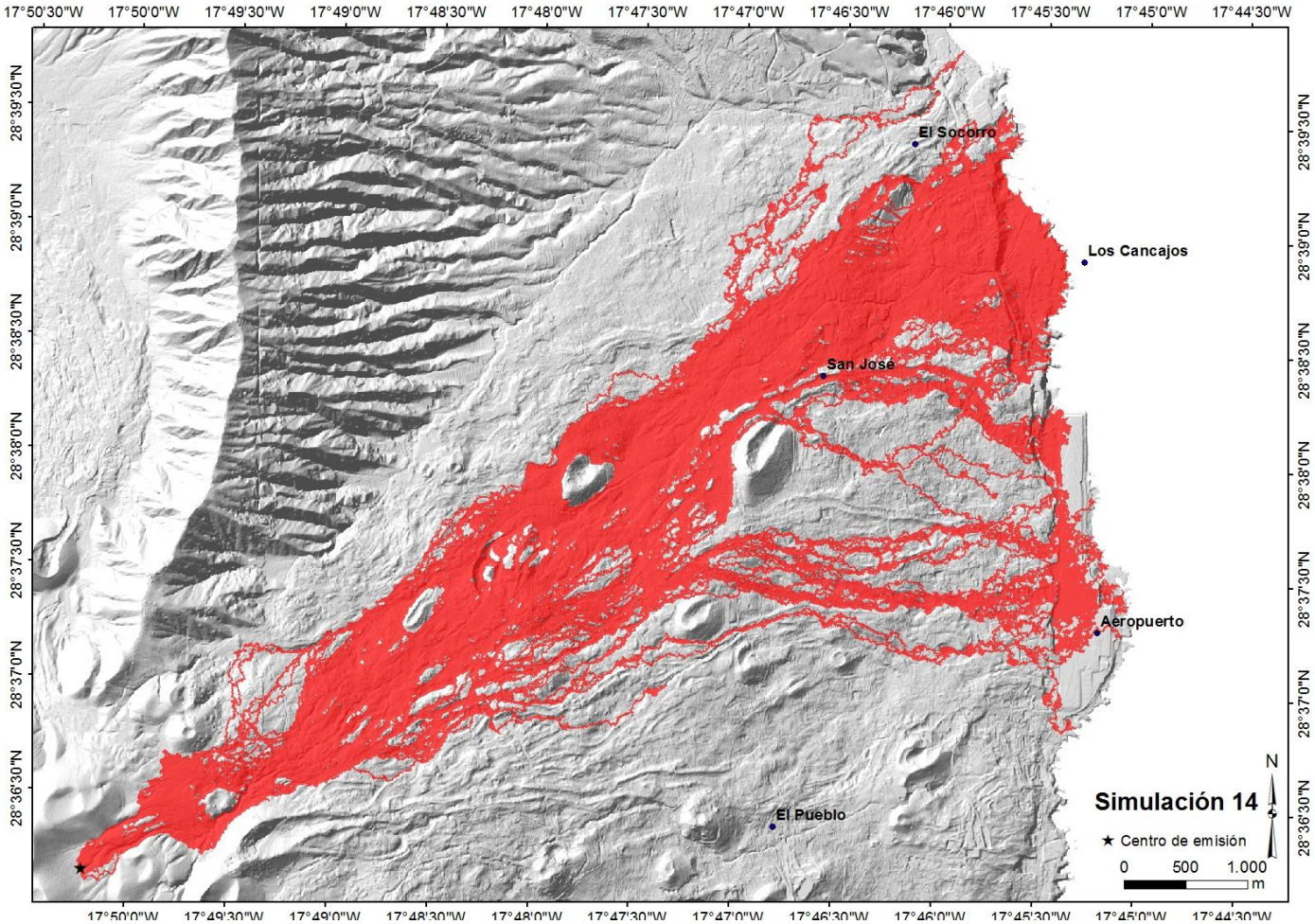


Figura 35.Resultado de la simulación correspondiente al centro de emisión 14.