

SINGULARIDADES GEOLÓGICAS DEL VOLCÁN DE LA PALMA

GEOLOGICAL SINGULARITIES OF THE LA PALMA VOLCANO

MANUEL GUTIÉRREZ CLAVEROL

Miembro correspondiente del Real Instituto de Estudios Asturianos
claverol@uniovi.es.

JOSÉ ANTONIO SÁENZ DE SANTA MARÍA

Presidente (2016-2020) del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de Asturias.
joseantonio@saenzdesantamaria.es.

RESUMEN: *Se describe la actividad volcánica reciente en Cumbre Vieja (isla de La Palma, Canarias) a lo largo de los cincuenta y tres primeros días de su desarrollo, con especial hincapié en la sismicidad, bocas eruptivas, coladas lávicas, tipología de las lavas, piroclastos y gases emitidos, sin descuidar los daños ocasionados en las infraestructuras y propiedades públicas y privadas. El contexto geodinámico parece corresponder, con pequeños matices, al modelo de vulcanismo intraplaca a partir de un “punto caliente”.*

PALABRAS CLAVE: *Geología, vulcanismo, punto caliente, La Palma, Islas Canarias*

ABSTRACT: *Recent volcanic activity in Cumbre Vieja (island of La Palma, Canary Islands) is described throughout the first fifty-three days of its development, with special emphasis on seismicity, eruptive mouths, lava flows, typology of lavas, pyroclasts and gases emitted, without neglecting the damage caused to infrastructures and public and private properties. The geodynamic context seems to correspond, with small nuances, to the model of intraplate volcanism from a “hot spot”.*

KEYWORDS: *Geology, volcanism, hot spot, La Palma, Canary Islands*

INTRODUCCIÓN

El domingo 19.09.21, a las 15,12 horas (hora local canaria), tras varias semanas de indicios difusos de actividad subterránea (enjambres sísmicos, desprendimiento de gases en el suelo, deformación del terreno), comenzó una intensa y espectacular erupción volcánica en la isla de La Palma, concretamente en Cabeza de Vaca, al sureste de esta isla canaria, algo al sur de los municipios de Los Llanos de Aridane y El Paso.

Este ámbito geológico se enmarca en el parque natural de Cumbre Vieja y está estructurado por un eje eruptivo (dorsal o “rift zone”) de dirección N-S, jalonada por casi 30 cráteres antiguos, siendo la zona más compleja y activa en volcanes de todo el archipiélago, pues allí acontecieron erupciones históricas entre los siglos XV y XVIII, XX y XXI (Tabla 1 y Figs. 1 a 5). Hace ahora 50 años entró en erupción el cráter del volcán Teneguía —con una duración de algo más de tres semanas— cuyas coladas de lava vertieron, en casi su totalidad, al mar lo que aumentó las dimensiones insulares (ALONSO & al., 1974).

En el siglo XVI, en el año 1588, el ingeniero militar italiano Leonardo Torriani escribió la obra “Descripción e historia del reino de las Islas Canarias”, elaborada para el rey Felipe II, donde dejó patente en un mapa (Fig. 1) una de las erupciones más devastadoras de La Palma, creándose un puerto de lava cerca de Tzacorte.

Tabla 1. Erupciones históricas acontecidas en la isla de La Palma.

Table 1. Historical eruptions that occurred on the island of La Palma.

Fecha de la erupción	Denominación del volcán	Duración (en días)	Volumen de materiales ($m^3 \times 10^6$)	Superficie afectada (Ha)
1480 (?)	Tacande/M. Quemada	7	—	424
20.05.1585	Tehuya/Tajuya	84	16	336
02.10.1646	Martín/Tigalate	82	29	296
17.11.1677	San Antonio	66	25	210
1677	Fuencaliente	65	—	650
09.10.1712	El Charco	56	20	441
24.06.1949	San Juan/Duraznero	47	21	323
1949	Las Manchas	—	—	—
	Nambroque	—	—	—
	Llano del Banco	—	—	—
26.10.1971	Teneguía	24	40	276
19.09.2021	Cumbre Vieja	86	200	1.227

Algunos volcanes poseen más de una denominación, caso de los ocurridos en 1949 (Fuente: HERNÁNDEZ-PACHECO & VALLS, 1982; HERNÁNDEZ-PACHECO, 1985; ROMERO, 1991; y datos propios).



Figura 1. Mapa de la isla de La Palma elaborado en 1588 por Leonardo Torriani.

Figure 1. Map of the island of La Palma drawn up in 1588 by Leonardo Torriani.

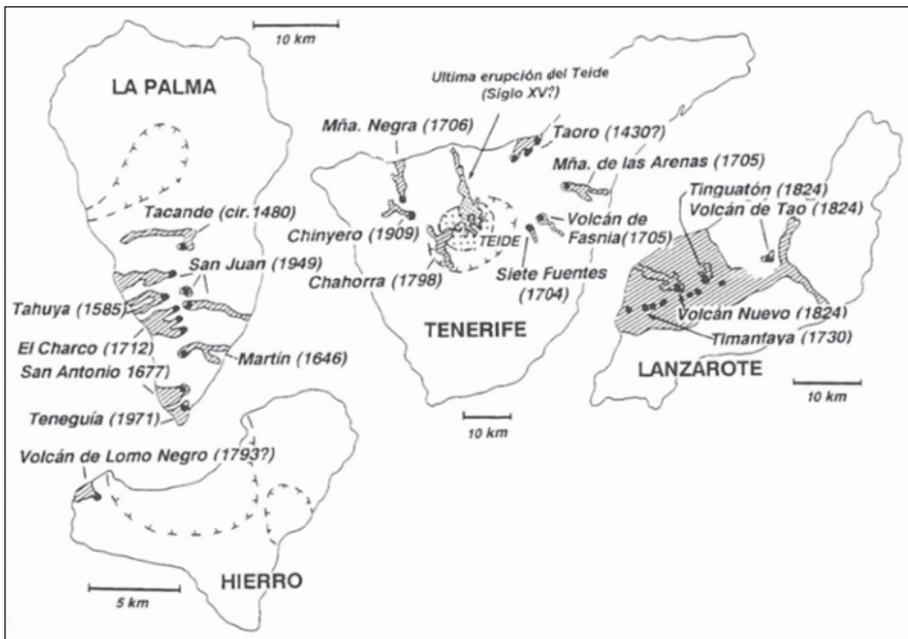


Figura 2. Esquema de una parte del archipiélago canario señalando las fechas de actividad volcánica histórica en La Palma y otras islas (en la isla de El Hierro, falta el volcán de La Restinga de 2011). Fuente: SUÁREZ & REGUEIRO, 1997).

Figure 2. Scheme of a part of the Canary archipelago indicating the dates of historical volcanic activity on La Palma and other islands (on the island of El Hierro, the La Restinga volcano from 2011 is missing). Source: SUÁREZ & REGUEIRO, 1997).

Lo que cambiaron las costumbres. Del 17 de noviembre de 1677 al 21 de enero de 1678 estuvo en erupción el volcán de San Antonio, al sur de la isla de La Palma; por entonces los procesos naturales eran un asunto divino y el Tribunal de la Santa Inquisición de Canarias informó, con el dibujo de la Fig. 3, de los acontecimientos. El inquisidor de turno bordó las bombas volcánicas, los piroclastos, las coladas llegando al mar y otros detalles efusivos.

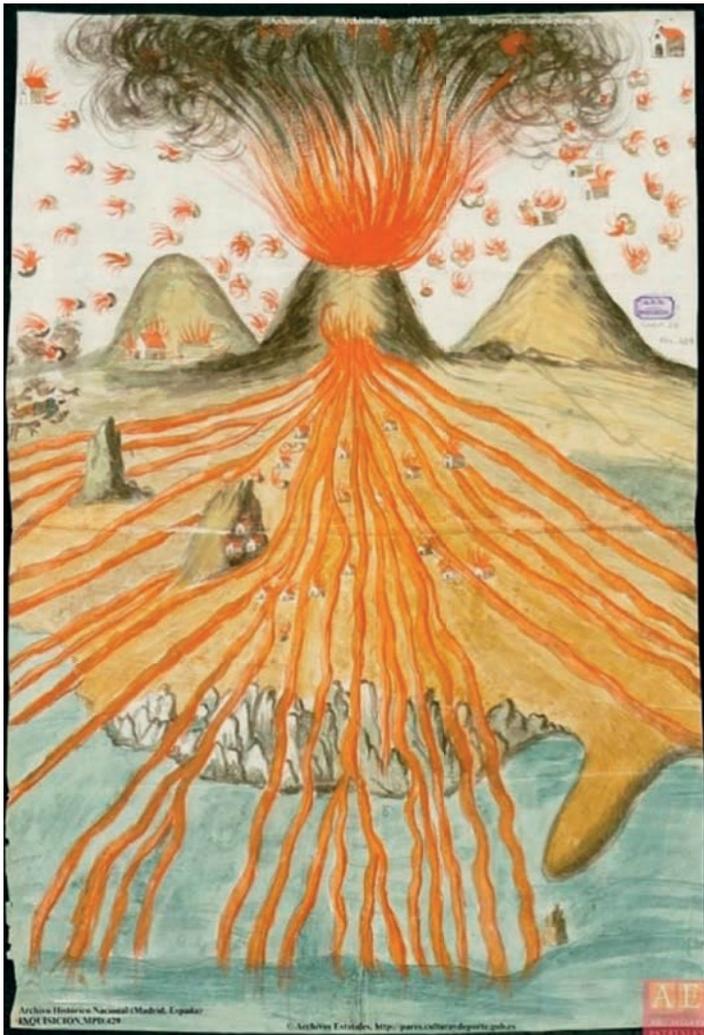


Figura 3. Dibujo del volcán de San Antonio divulgado por el Tribunal de la Santa Inquisición de Canarias. (Fuente: Archivo Histórico Nacional).

Figure 3. Drawing of the San Antonio volcano released by the Court of the Holy Inquisition of the Canary Islands. (Source: National Historical Archive).

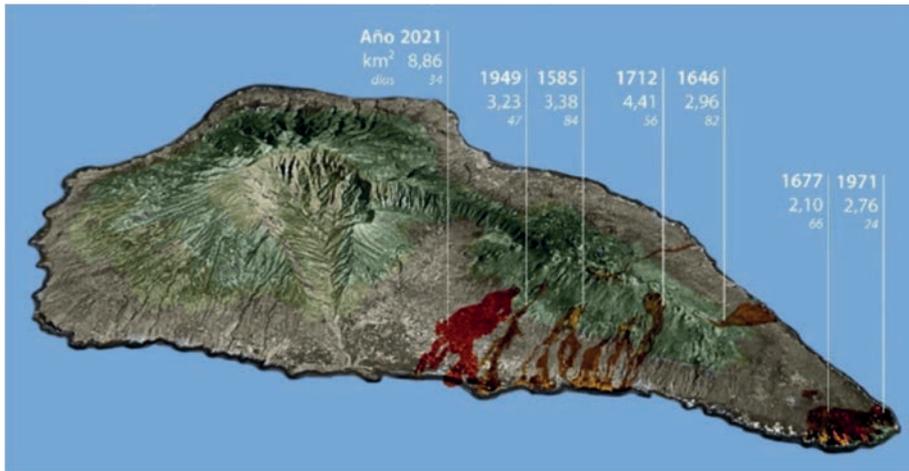


Figura 4. Evolución volcánica en el ámbito de la dorsal de Cumbre Vieja.

Figure 4. Volcanic evolution in the area of the Cumbre Vieja ridge.

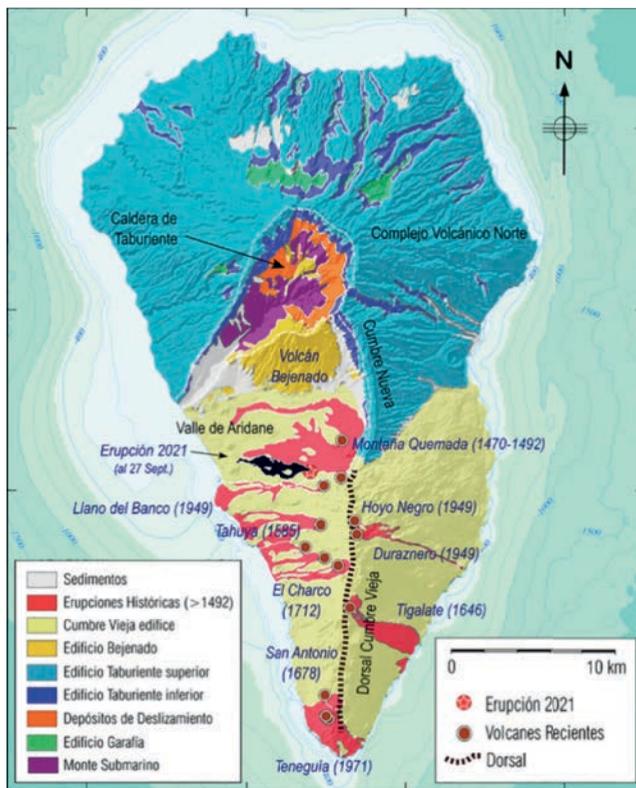


Figura 5. Distribución del vulcanismo en la isla de La Palma.

Figure 5. Distribution of volcanism on the island of La Palma.

Nada más comenzar el proceso volcánico se procedió, en un primer momento y a raíz de los avisos de los comités científicos, a la evacuación completa de la zona referida. Un total de 300 personas de los asentamientos de El Paraíso y Cabeza de Vaca fueron trasladadas a lugares seguros, junto con los vecinos con problemas de movilidad en localidades de los municipios de El Paso, Los Llanos de Aridane, Villa de Mazo y Fuencaliente. Conforme avanzaba el proceso eruptivo ha sido necesario proceder a más evacuaciones de personas afectadas.

El volcán aún carece de nombre oficial, aunque se barajan denominaciones tales como: Cumbre Vieja (es un parque natural), Cabeza de Vaca (zona donde surgió), Montaña Rajada, Tajogaite (nombre guanche) o Jedey (legendario guerrero canario).

Contexto geológico de las Islas Canarias

Las Islas Canarias, junto con Azores, Madeira y Cabo Verde, forman parte de un conjunto de islas volcánicas, conocidas como Macaronesia, situadas en el Atlántico NE próximas a la costa africana (Fig. 6). Desde un punto de vista geológico, están emplazadas en el interior de la placa Africana, que abarca la mitad oriental del Océano Atlántico y una gran porción del continente africano; esta placa tectónica limita por el oeste, en un borde de placa expansivo o dorsal, con la placa Sudamericana, de la que se separa unos 5 centímetros al año, lo que significa que el archipiélago está alejado de las zonas de subducción y expansión, las más propicias para esta tipología de eventos geológicos.

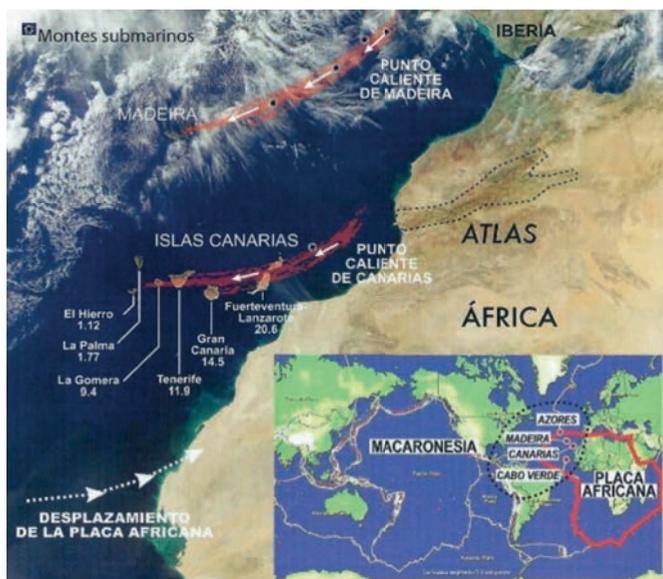


Figura 6. Imagen NASA del conjunto de la Macaronesia constituido por las Islas Canarias junto con las Azores, Madeira y Cabo Verde. Se señala el desplazamiento de la placa Africana y, con flechas, el orden de aparición de las islas (Fuente: CARRACEDO & PÉREZ TORRADO, 2008).

Figure 6. NASA image of the whole of Macaronesia made up of the Canary Islands together with the Azores and Cape Verde. The displacement of the African plate is indicated and, with arrows, the order of appearance of the islands (Source: CARRACEDO & PÉREZ TORRADO, 2008).

Las Islas Canarias presentan la singularidad de estar ubicadas sobre corteza oceánica antigua (constituida en tiempos del Jurásico Medio, es decir, entre 165 y 176 millones de años) que presenta, en general, un comportamiento extremadamente rígido. El origen de su magmatismo proviene de la fusión parcial del manto astenosférico que se supone a una profundidad superior a 35 km. Esta tipología isleña surge, de manera habitual, en el interior de los océanos, iniciando su génesis como volcanes submarinos (caso de La Restringa, en El Hierro, durante 2011) que llegan a emerger con relativa rapidez.

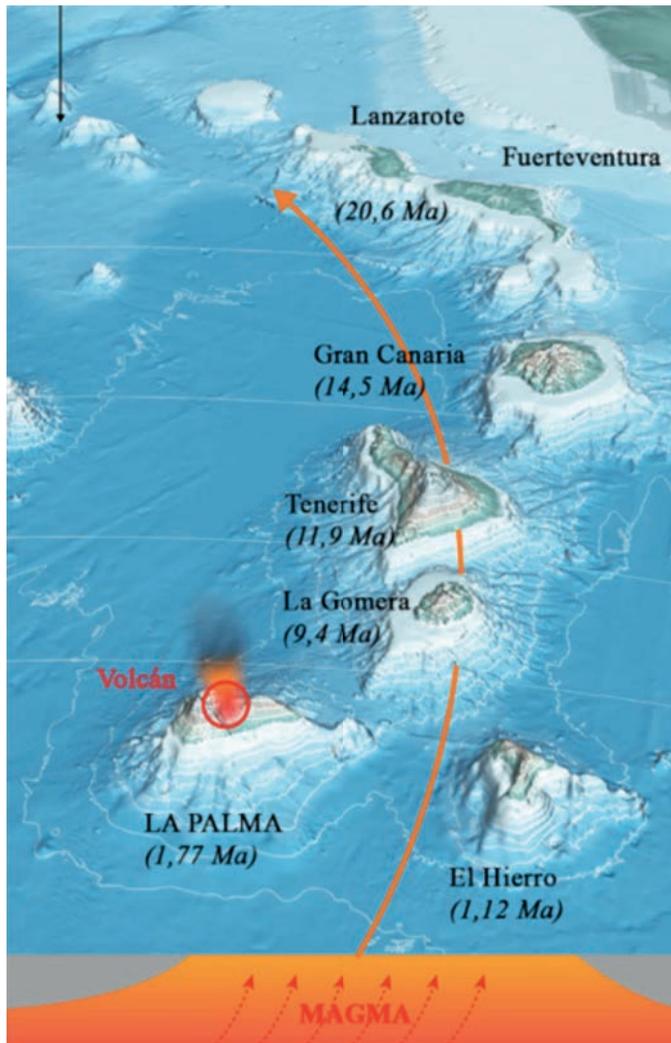


Figura 7. Situación de las Islas Canarias con una flecha dirigida a las más antiguas. Entre paréntesis, la edad estimada de cada isla en millones de años.

Figure 7. Situation of the Canary Islands with an arrow directed to the oldest. In parentheses, the estimated age of each island in millions of years.

Así pues, la historia del archipiélago comenzó en el fondo del océano cuando un magma ascendente desde el manto atravesó la rígida corteza oceánica y cristalizó en el fondo submarino formando un volcán o “seamount”. Estas elevaciones volcánicas fueron ascendiendo por acumulación de sucesivas emisiones hasta alcanzar y sobrepasar el nivel del mar, momento en el que comienza la historia subaérea de las islas.

Un hecho de extraordinario interés es que la edad de las diferentes islas —determinada con dataciones radiométricas (K/Ar y Ar/Ar) de las lavas más vetustas— aumenta en general hacia el oriente: Lanzarote y Fuerteventura fueron las primeras en crearse, luego la actividad volcánica se fue desplazando hacia el oeste y surgieron, en orden sucesivo, Gran Canaria, Tenerife y La Gomera, más tarde apareció La Palma y, por fin, la isla más occidental El Hierro (Fig. 7). El hecho de que las dos últimas citadas sean las más jóvenes del archipiélago justifica que se concentre en ellas preferentemente la actividad sismo-volcánica, como la acaecida en la isla de El Hierro en 2011 (GUTIÉRREZ CLAVEROL, 2011), con 147 días de duración en la zona submarina y en La Palma de plena actualidad.

Por tanto, las Islas Canarias presentan una extensa historia geológica que comenzó hace unos veinte millones de años y que aún perdura.

Dos hipótesis genéticas implicadas

Aunque lo habitual es que se produzcan terremotos y volcanes asociados a los bordes convergentes y divergentes de las placas (Fig. 8), en el caso canario la cosa es

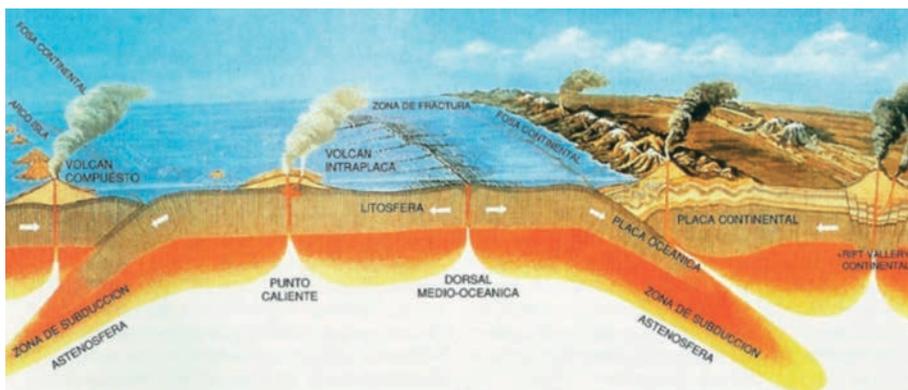


Figura 8. Sección esquemática de dos placas oceánicas con bordes convergentes (zonas de subducción) con un fuerte vulcanismo asociado. A la derecha un borde convergente entre la placa de corteza oceánica y otra de corteza continental. A la izquierda, el borde convergente se produce entre dos placas de corteza oceánica originando un conjunto de arcos-islas. En el centro, ambas placas divergen en una dorsal medio-oceánica. Existe también un “punto caliente” que genera un volcán intraplaca como los existentes en Canarias, pero en el caso que nos ocupa estaría situado a la derecha de la dorsal. (Fuente: NUHFER & al., 1993).

Figure 8. Schematic section of two oceanic plates with converging edges (subduction zones) with a strong associated volcanism. On the right a convergent edge between the oceanic crust plate and another one of continental crust. On the left, the convergent edge is produced between two plates of oceanic crust, originating a set of arcs-islands. In the center, both plates diverge on a mid-oceanic ridge. There is also a “hot spot” or intraplate volcano like those in the Canary Islands, but in this case it would be located to the right of the ridge. (Source: NUHFER & al., 1993).

diferente. Un “punto caliente” (“hot spot” en inglés) parece ser el responsable de la formación de estas islas, hasta constituir un conjunto de edificios volcánicos con tendencia lineal.

Se ha especulado mucho sobre cómo se han formado las Islas Canarias, pues su génesis se aparta sustancialmente del modelo de los bordes de la tectónica de placas, según la cual los volcanes activos aparecen relacionados con los límites de placa. Para explicar esta contradicción se han propuesto dos hipótesis:

Teoría del punto caliente o “hot spot”

La disposición alineada y con edades diferentes de los edificios volcánicos es común en otros grupos insulares gestados en similares contextos oceánicos de intra-placa. Entre los más conocidos se incluye la Cadena Hawaiana, situada hacia la mitad de la Placa Pacífica cubierta por el Océano que le da nombre. Este conjunto de islas volcánicas presenta igualmente edades diferentes (Fig. 9), siendo más arcaicas las

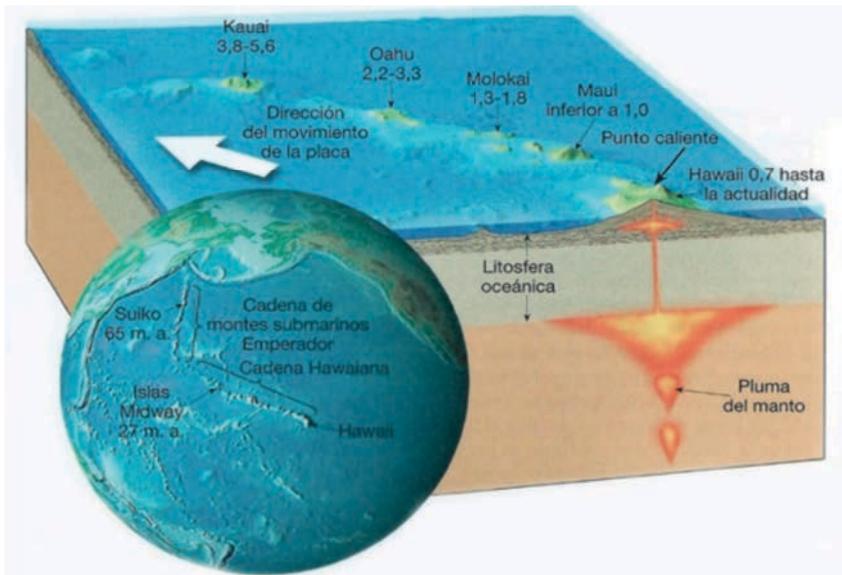


Figura 9. Archipiélago de Hawái. La datación radiométrica de las islas (edad en millones de años) disminuye hacia el sureste como consecuencia del movimiento de la placa Pacífica sobre un punto caliente, según la teoría propuesta por Tuzo Wilson en 1963 (Fuente: TARBUCK & LUTGENS, 2005).

Figure 9. Hawaiian Archipelago. The radiometric dating of the islands (age in millions of years) decreases towards the southeast as a consequence of the movement of the Pacific plate over a hotspot, according to the theory proposed by Tuzo Wilson in 1963 (Source: TARBUCK & LUTGENS, 2005).

ubicadas al NO (p. ej., Midway, con una antigüedad de 27 millones de años) y más recientes las del SE (la edad de Hawái es de 0,7 Ma). Se trata de lo que en geología se conoce como un “punto caliente” o “hot spot”, una anomalía puntual en el manto terrestre a partir de la cual ascienden por convección rocas magmáticas fundidas formando un penacho térmico o pluma. Dado que el punto térmicamente elevado permanece fijo, el movimiento de la placa tectónica sobre el mismo da lugar a que emerjan sucesivos edificios volcánicos alineados, cuyo trazado dibuja grosso modo la trayectoria de la placa y cuya edad es más joven en el sentido contrario al avance de la placa.

La disposición espacial de las islas del archipiélago canario, siguiendo una orientación cronológica de ENE a OSO, sirve de argumento para explicar su origen como debido a un “punto caliente” sobre el que se mueve progresivamente la placa Africana creando las sucesivas islas que lo conforman (véanse Figs. 6 y 7).

Teoría de la fractura del Atlas

No obstante, a pesar de que la teoría del “hot spot” es la más divulgada, no es la única, ya que las Islas Canarias no están perfectamente alineadas y existen erupciones volcánicas históricas en las más antiguas (Timanfaya en Lanzarote o pico del Teide en Tenerife) contemporáneas con otras recientes en las islas más occidentales.

Algunos autores (BLANCO-MONTENEGRO & al., 2018) relacionan las islas con fracturas NE-SO subparalelas con la gran falla del Atlas, proponiendo que las islas surgieron en un contexto tectónico de desgarre, aunque el vulcanismo no se desarrolló necesariamente durante los periodos de extensión tectónica; cuando estas fracturas intraplaca progresan y alcanzan la astenosfera el magma remonta y crea una isla.

Esta teoría surgió a partir de una investigación sobre la anomalía magnética del edificio submarino situado al noroeste de la isla de Gran Canaria, revelando la misma una gran estructura alargada según una dirección ENE-OSO, interpretada como una intrusión magmática emplazada durante el crecimiento submarino de esta isla volcánica. La forma lineal de este cuerpo sugiere la existencia de una importante zona de fractura de la corteza en la parte central del archipiélago que habría favorecido el rápido ascenso y emplazamiento del magma durante un lapso de tiempo de 0,5 a 1,9 Ma (BLANCO-MONTENEGRO & al., *op. cit.*).

La concordancia de los resultados en el indicado estudio con otros previos (gravimétricos, sismológicos y geodinámicos) apoya la idea de que la génesis de las Islas Canarias estuvo condicionada por un marco de tectónica de desgarre (Fig. 10). Por otro lado, existe una continua actividad sísmica submarina contrastada en el canal entre las islas de Tenerife y Gran Canaria que apoyaría la existencia de esta fractura cortical.

En realidad, los datos expuestos no contradicen la teoría del “hot spot”, ya indicada para explicar el origen del magmatismo canario, pero sí introducen el papel esencial de la tectónica cortical regional para aclarar dónde y cómo estos magmas alcanzaron la superficie y construyeron los edificios volcánicos. Una combinación de ambos mecanismos podría ser, quizá, más ajustada para explicar la génesis del archipiélago.

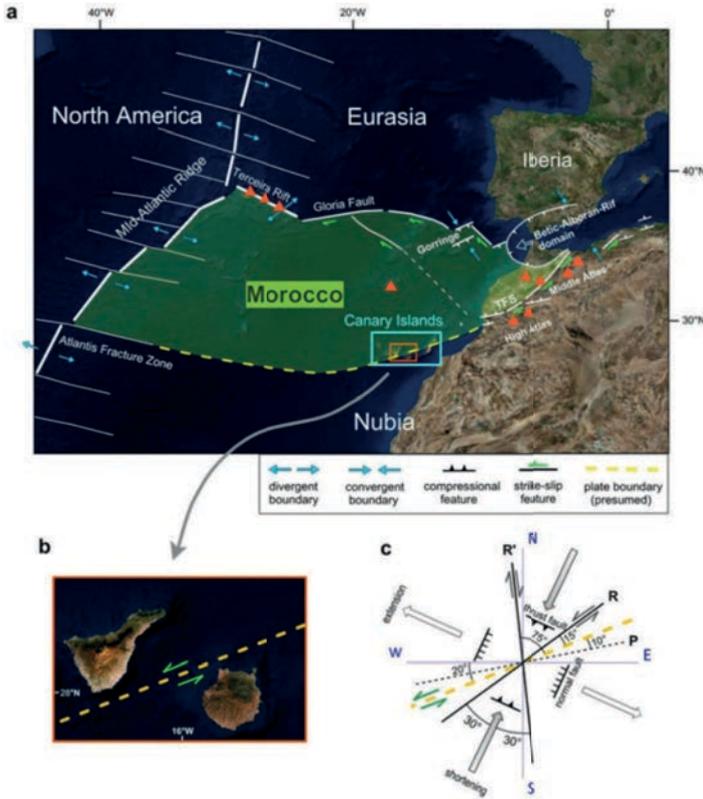


Figura 10. Teoría que relaciona el nacimiento de las Islas Canarias con la zona de fractura del Atlas, una gran falla transformante que secciona la dorsal Centroatlántica. a) Esquema tectónico simplificado que muestra la microplaca de Marruecos. b) Detalle de la parte central del archipiélago canario, señalando la falla con desplazamiento sinistral que pasa entre Tenerife y Gran Canaria. c) Sistema de fracturación Riedel, según el cual el sistema de cizalla R corresponde a un desplazamiento en dirección sinistral. La dirección R' corresponde con el eje N-S de la dorsal volcánica de La Palma, en la que se desarrolla el volcán. (Fuente: BLANCO-MONTENEGRO & al., 2018).

Figure 10. Theory that relates the birth of the Canary Islands with the Atlas fracture zone, a great transforming fault that cuts the Central Atlantic ridge. a) Simplified tectonic diagram showing the Moroccan microplate. b) Detail of the central part of the Canary archipelago, indicating the fault with sinistral displacement that passes between Tenerife and Gran Canaria. c) Riedel fracturing system, according to which the shear system R corresponds to a displacement in the sinister direction. (Source: BLANCO-MONTENEGRO & al., 2018).

Diferencias geomorfológicas entre islas

Es de interés la observación de las características geomorfológicas y paisajísticas de las diferentes islas. En las más jóvenes (La Palma y El Hierro) —con fuertes relieves que retienen la humedad de los vientos alisios NE-SO— predomina un carácter abrupto y escarpado y carecen de playas extensas, dado que se encuentran en un momento juvenil. Por el contrario, las orientales se encuentran en una etapa destruc-

tiva o de desmantelamiento (Fig. 11), más o menos avanzada, con orografías más suavizadas por los agentes erosivos y, por ende, con mejores arenales y el subsiguiente carácter desértico derivado de la no retención del agua atmosférica.

En la génesis de este arquetipo de islas se detectan varias etapas: volcánica, reposo eruptivo y erosión, prosiguiendo con una nueva acción efusiva. La primera coincide con una notable acción magmática, al situarse la futura tierra emergida en la vertical del “punto caliente” o “pluma”, creándose el grueso del edificio insular, en buena parte de origen submarino; un ejemplo de este período son La Palma y El Hierro.

Pasado el tiempo, al alejarse progresivamente la isla en gestación del “punto caliente”, la actividad efusiva comienza a declinar. Inicia entonces una etapa erosiva que elimina lo edificado, como acontece en La Gomera sin vulcanismo significativo desde hace 4,2 millones de años.

Por último, después de ese tiempo de reposo se reinician las erupciones; tal es el caso de Tenerife y Gran Canaria —respectivamente, en fases post-erosivas temprana y tardía— y de Fuerteventura y Lanzarote —en fases seniles de avanzado desmantelamiento— a pesar de los dos episodios eruptivos acontecidos en Timanfaya durante los siglos XVIII y XIX.

Como resumen, la tipología isleña canaria surge en el interior del océano Atlántico donde la corteza oceánica basáltica es relativamente delgada y flexible. Las islas empiezan su crecimiento como volcanes submarinos (recuérdese la erupción bajo el mar de El Hierro en 2011 que no llegó a emerger), pudiendo llegar a aflorar finalmente. De manera habitual, el grandioso peso de los edificios insulares puede flexionar la corteza y provocar el hundimiento de los mismos pudiendo llegar hasta su desaparición. Este proceso de subsidencia es muy acusado en el archipiélago hawaiano y más liviano en el canario, dado que, al estar emplazado sobre corteza oceánica más antigua, gruesa y rígida, la tasa de subsidencia es mucho menor.



Figura 11. Fases evolutivas de las Islas Canarias. Las más occidentales (El Hierro, La Palma y La Gomera) están en una etapa de crecimiento, mientras que las orientales (Gran Canaria, Lanzarote y Fuerteventura) se encuentran en un periodo senil, con un desmantelamiento erosivo en las dos últimas (Fuente: CARRACEDO & PÉREZ TORRADO, 2008).

Figure 11. Evolutionary phases of the Canary Islands. The westernmost (El Hierro, La Palma and La Gomera) are in a growth stage, while the eastern ones (Gran Canaria, Lanzarote and Fuerteventura) are in a senile period, with erosive dismantling in the last two (Source: CARRACEDO & PÉREZ TORRADO, 2008).

Características del volcán de Cumbre Vieja

Como es habitual, los procesos efusivos vienen precedidos de terremotos y otras señales que, de alguna manera, alertan sobre el suceso eruptivo que va a ocurrir; en el presente caso la erupción fue anunciada por un “enjambre sísmico” de miles de microsismos acaecidos durante la semana precedente. Debe señalarse que el primer enjambre sísmico de La Palma data de 2017 en el que se produjeron los primeros temblores seriados.

Los seísmos se iniciaron con hipocentros profundos y luego se fueron manifestando más superficiales, hasta que por fin se produjo el episodio telúrico: una gran explosión con apertura de una grieta en el terreno, a la que siguió una enorme columna de gas y expulsión de lava y fragmentos sólidos de basalto (piroclastos). Además, los científicos habían detectado un abombamiento previo del terreno, de entre 15 y 20 cm, consecuencia de la presión ejercida por el magma en su ascenso hacia el exterior (GUTIÉRREZ CLAVEROL, 2021).

En un principio se calculó un reservorio magmático del orden de once millones de metros cúbicos, pero más recientemente se ha estimado la existencia de dos reservorios, uno superficial y otro más profundo, que alimentan a la propia erupción. El magma se acumula durante años debajo de la isla e intenta avanzar ejerciendo presión hacia la superficie, pero no lo hace de una manera continua, sino que utiliza distintas profundidades de acumulación.

Al comienzo, el ascenso magmático provocó que fluyese la lava por dos bocas diferentes, pero pronto se convirtieron en nueve, mostrando una marcada orientación N-S a lo largo de la fractura generada. La emisión presenta características del tipo fisural (las coladas surgen por fisuras abiertas debidas a la propulsión del magma) y logran frentes de hasta 30 o 50 m de altura), con actividad de tipo estromboliano, o sea, caracterizada por ser explosiva, provocada por la burbuja de gases liberados, con intervalos de calma. La roca fluida salía a una temperatura de 1.075 °C y avanzaba a unos 700 metros por hora, con parones intermitentes, arrasando todo lo que encontraba a su paso; la columna de cenizas alcanzó grandes alturas, entre 2 y 5 km.

La isla de La Palma mide desde el fondo del mar 6.500 m, casi tanto como el Aconcagua (6.962 m), la mayor elevación de los Andes. La erupción producida en Cumbre Vieja, sin duda la más destructiva de la historia reciente de España, es a la vez un fenómeno destructivo y creador, pues sin sus volcanes no existiría el archipiélago de Canarias.

Esbozo geológico de la isla de La Palma

Antes de entrar en los detalles inherentes al volcán de Cumbre Vieja parece conveniente sintetizar los rasgos geológicos de la conocida como “isla Bonita” (Fig. 12). Se distinguen dos dominios volcánicos: Taburiente y la Dorsal.

El “dominio de Taburiente”, ubicado en la zona septentrional, presenta una morfología troncocónica con grandes relieves (2.426 m en Roque de los Muchachos) y una gran depresión de origen erosivo debido a un colapso gravitacional (la Caldera de Taburiente). Su génesis corresponde a una superposición de volcanes que se han sucedido en el mismo lugar, de ahí la forma semicircular que presenta su planta.

El “dominio de la Dorsal” se encuentra en la mitad meridional de la isla y está estructurado por un eje eruptivo orientado N-S de forma alargada que discurre desde Taburiente hasta el extremo meridional (véase Fig. 16). Se distinguen dos sectores:



Figura 12. Mapa geológico de la isla de La Palma. *Leyenda esquemática:* Al N de la isla, en azul, edificio Taburiente (Pleistoceno Inf.-Medio); en morado, complejo basal (Plioceno). Al S de la isla, en verde, erupciones formando acantilados (Pleistoceno Sup.); en negro y rojo, erupciones históricas. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional).

Figure 12. Geological map of the island of La Palma. Schematic legend: North of the island, in blue, Taburiente building (Lower-Middle Pleistocene); in purple, basal complex (Pliocene). To the S of the island, in green, eruptions forming cliffs (Upper Pleistocene); in black and red, historical eruptions. (Source: National Geographic Institute).

Cumbre Nueva, al norte y Cumbre Vieja, al sur. Esta última es un “rift zone” de 21 km de longitud donde se produjeron seis erupciones volcánicas históricas, las dos últimas en el pasado siglo (véase Tabla 1) y donde se encuadra el volcán ahora activo.

Sismicidad

Los terremotos que se producen en esta zona se relacionan con la fusión parcial en los niveles inferiores de la corteza, el empuje ascendente de los magmas y con la circulación de fluidos dentro del edificio efusivo, los cuales pueden ser muy variables: magma, gases disueltos, combinaciones de gas más agua o gas más cenizas. Por tanto, no tienen nada que ver con los sismos de origen tectónico, singularmente causados por el movimiento de las fallas.

Se venían registrando miles de microsismos, en el entorno de Cumbre Vieja, desde el 11 de septiembre, inapreciables por la población. El enjambre sísmico — muy bien controlado por la red sísmica de Canarias (solo en La Palma hay ocho estaciones fijas)— se fue desplazando ligeramente dentro de ese ámbito.

Los hipocentros comenzaron a más de 30 km de profundidad y paulatinamente fueron acercándose a la superficie hasta situarse a unos cinco kilómetros, describiendo el movimiento ascendente del magma fundido. En esta fase se llegaron a registrar más de 300 terremotos al día, alguno de ellos con magnitud superior a tres que no generaron daños importantes, pero sí pudieron ser sentidos por las personas; finalmente se desarrollaron numerosos terremotos muy superficiales que preludiaban una posible futura erupción, como así fue.

Una vez producido el inicio de la emisión lávica se redujo notablemente la actividad sísmica, volviendo a incrementarse ésta hasta el 30 y 31 de octubre cuando ocurrieron dos terremotos de magnitud cinco en la escala sismológica mbLg¹, los de mayor intensidad desde que comenzó la erupción. Desde entonces se nota, con altibajos, un descenso en el número de sismos, dibujando grosso modo una campana de Gauss (Fig. 13).

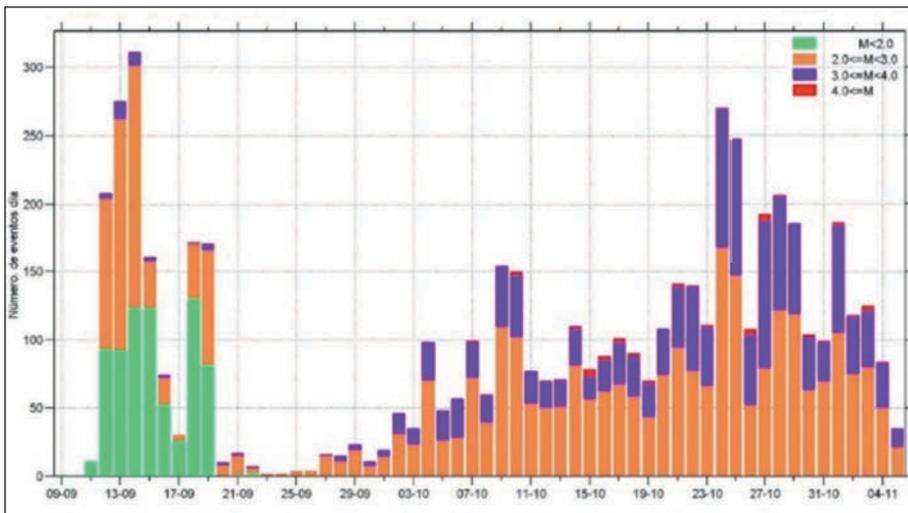


Figura 13. Histograma de sismos relacionados con el volcán de Cumbre Vieja, actualizado a 05.11.21. Durante los últimos 58 días ocurrieron 5.505 terremotos. El máximo número de eventos aconteció el 12 y 13 de septiembre y el 24 y 25 de octubre; el mínimo tuvo lugar los días cercanos a la erupción. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional).

Figure 13. Histogram of earthquakes related to the Cumbre Vieja volcano, updated to 05.11.21. During the last 58 days, 5,505 earthquakes occurred. The maximum number of events occurred on September 12 and 13 and October 24 and 25; the minimum took place the days around the eruption. (Source: National Geographic Institute).

1 La escala de magnitud regional de un sismo mbLg mide la amplitud de las ondas Lg de periodo corto (aproximadamente 1 segundo), una forma compleja de la onda superficial de Love.

En la Fig. 14 se puede observar que existen dos niveles de producción y almacenamiento de magmas a unos 35 y 12 km de profundidad, el primero, probablemente, se sitúa en la base de la corteza oceánica. Se observa también, por la distribución, que las cámaras magmáticas tienen un desarrollo N-S que coincidiría con los rasgos tectónicos de la dorsal de Cumbre Vieja. El magma circula en dirección ascendente y prácticamente en vertical entre estas dos zonas. A partir de los 12 km de profundidad los seísmos migran en dirección NNO haciéndose más superficiales, hasta la salida definitiva del edificio volcánico. Esto indica que los conductos de alimentación no son verticales, sino que tienen una inclinación de unos 65° .

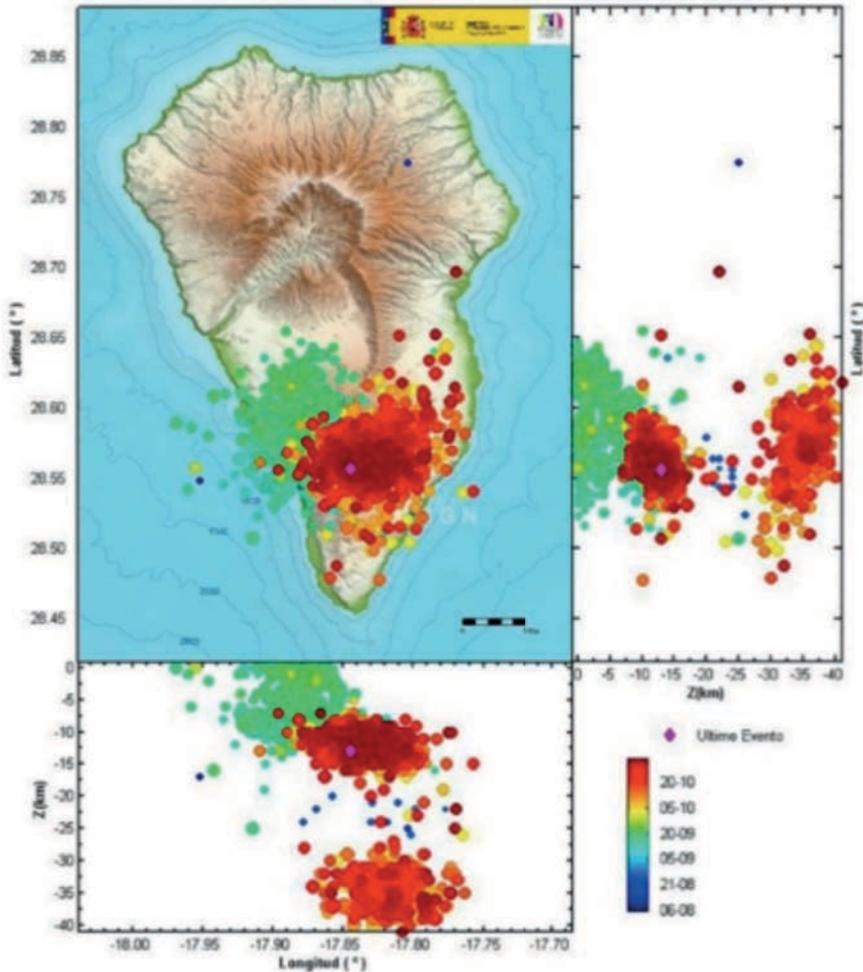


Figura 14. Sismicidad en la isla de La Palma en los últimos 90 días (desde el 8 de agosto al 5 de noviembre de 2021). Se produjeron 5.508 eventos, el de máxima magnitud 5,0 mbLg el 30 de octubre. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional).

Figure 14. Seismicity on the island of La Palma in the last 90 days (from August 8 to November 5, 2021). 5,508 events occurred, the maximum magnitude 5.0 mbLg on October 30. (Source: National Geographic Institute).

Lo que sí parece evidente es que la sismicidad es generada por la marcha del magma y no al revés.

Bocas eruptivas

La erupción primigenia fluyó por dos bocas diferentes, pero de inmediato se convirtieron en nueve, cifra que va variando a lo largo del proceso (Fig. 15) hasta el momento presente que son siete.

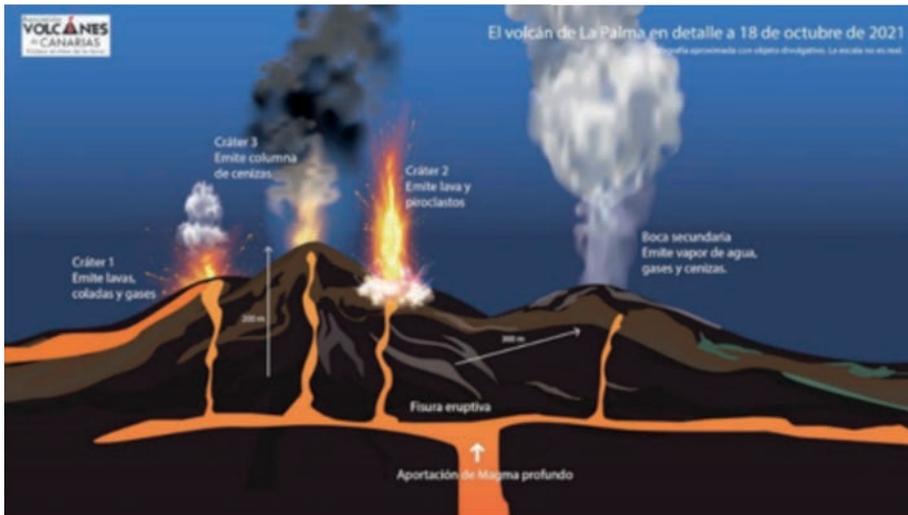


Figura 15. Disposición geológica esquemática del edificio volcánico de La Palma (18.10.21), mostrando la cámara magmática, los conductos de emisión, diversos cráteres, como adventicio y tipos de emisiones.

Figure 15. Schematic geological arrangement of the volcanic building on La Palma (18.10.21), showing the magmatic chamber, the emission ducts, various craters, adventitious cone and types of emissions.

El 16.10.21 se observa una neta alineación de las bocas eruptivas, lo que ha sido interpretado como una especie de dique relacionado con una grieta por donde escapa el magma que alimenta a las bocas. Una prueba de que la erupción del volcán es de tipo fisural.

Es clásica la disposición alineada que manifiestan los antiguos cráteres en el parque natural de Cumbre Vieja, testigos indelebles de pasados episodios efusivos (Fig. 16) y que, de alguna manera, se repiten en la erupción actual.

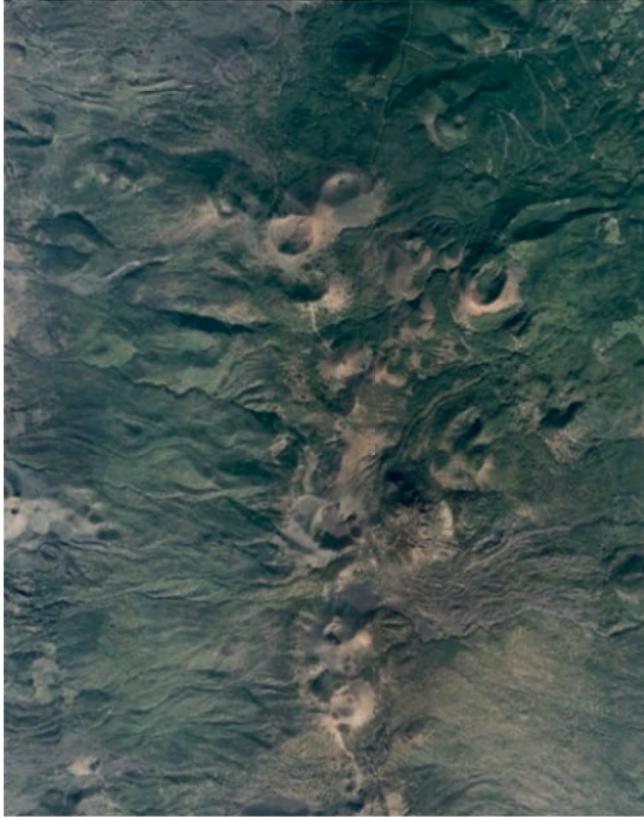


Figura 16. Alineación de cráteres antiguos (N-S) en el entorno de la dorsal de Cumbre Vieja. (Fuente: Google Earth).

Figure 16. Alignment of ancient craters (N-S) around the Cumbre Vieja ridge. (Source: Google Earth).

A medida que el edificio volcánico va creciendo puede derrumbarse por su propio peso y tapar la boca, lo que provocaría que el magma buscara otras vías más fáciles. De hecho, ocurrieron varios colapsos del cono los días 9, 23, 25 y 27 de octubre, con el consiguiente problema que suscitaron los desvíos de las coladas de lava.

Coladas lávicas

Durante la primera semana el volcán emanó un magma poco fluido, acumulado en el reservorio más superficial, a unos 12 km de profundidad. Luego surgió lava más líquida y caliente procedente del reservorio existente por debajo de los 30 km. Cambios en la composición química, viscosidad y temperatura de las lavas permiten hacer esta aseveración.

Los flujos de lava, así como los caminos recorridos, fueron cambiando con el tiempo (Fig. 17), llegándose a contabilizar hasta 11 coladas diferentes (Fig. 18). Resulta habitual que las últimas se derramen sobre las anteriores.

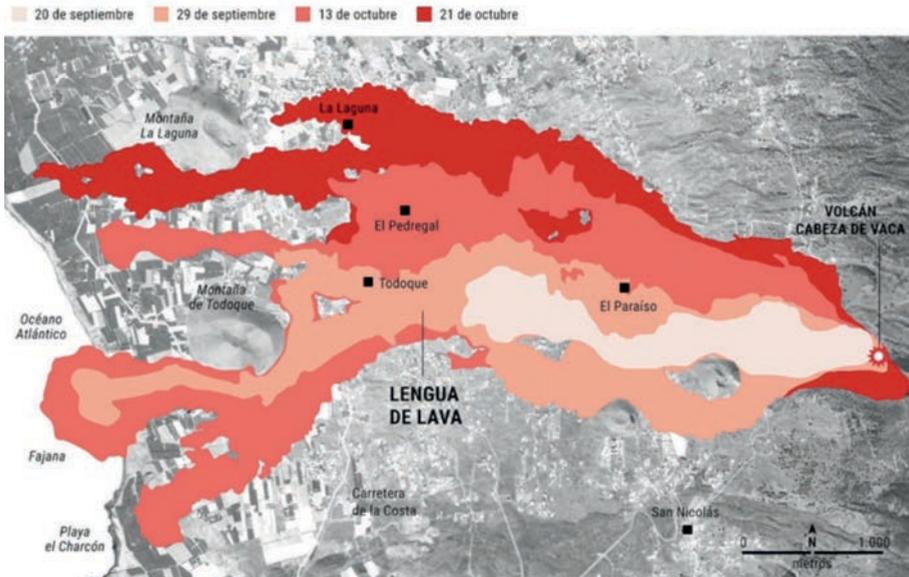


Figura 17. Distribución de las lenguas de lava el 21.10.21, con indicación de los núcleos de población afectados.

Figure 17. Distribution of the lava tongues on 10/21/21, indicating the affected population centers.

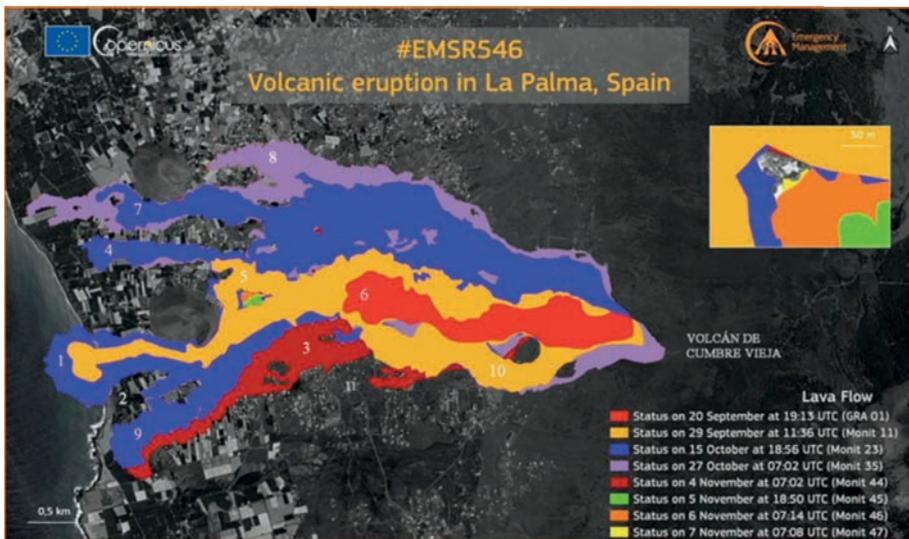


Figura 18. Yuxtaposición de las coladas de lava hasta el día 7.11.21. Se ha añadido la numeración de las once coladas. (Fuente: satélite Copernicus).

Figure 18. Juxtaposition of lava flows until day 7.11.21. The numbering of the eleven washes has been added. (Source: Copernicus satellite).

Según el desarrollo volcánico, especialmente motivado por la velocidad o el cambio de rumbo, preocupaban determinadas coladas. Así, finalizando el mes de octubre, la atención se centraba en la nº 3 que fluía sobre la nº 9 avanzando por el sur (véase la situación de las coladas en Fig. 18); sin embargo, los primeros días de noviembre alarmaba la nº 11, también en la zona meridional, que amenazaba con destruir la única vía de acceso a Puerto Naos. En ese momento, alguna colada había sobrepasado un espesor de 30 m de altura y con posterioridad los 50 m.

Ocasionalmente, fue muy ostensible en imágenes mostradas el 7 de octubre y 2 de noviembre, la colada se desborda en varios canales que alimentan lo que se conoce como un “tubo volcánico” que permite una conexión directa entre el centro emisor y el mar, lo que ayuda a impedir el ensanche de las coladas. Estos tubos se producen al solidificarse la lava que entra en contacto con el aire, mucho más frío y se forma una costra mientras que en el interior sigue fluyendo la colada. En la isla de La Palma es famoso el tubo volcánico de la cueva de Las Palomas creada en el pasado, entre Las Manchas y Todoque y que es explotada turísticamente.

Al alcanzar la colada el mar se forma una acumulación de rocas volcánicas denominada plataforma lávica o delta lávico, aunque también se conoce con la denominación canaria de “fajana”. Ocurrió el 28.09.21 cuando la colada nº 1 llegó a la costa a la altura de playa Nueva (municipio de Tazacorte) —en la misma zona de Las Hoyas creada por el volcán de San Juan en 1949— consiguiendo una superficie que supera 40 Ha.



Figura 19. Estado en la madrugada de 10 de noviembre de la creación de la nueva fajana en la playa de Los Guirres, a la izquierda se aprecia la primitiva. Se observan varios conos lávicos derramando como una catarata incandescente lava por el acantilado.
(Fuente: Salvamento Marítimo Canario).

Figure 19. State in the early morning of November 10 of the creation of the new strip on the beach of Los Guirres, the original one can be seen on the left. Several lava cones are observed pouring lava like an incandescent waterfall down the cliff.
(Source: Canarian Maritime Rescue).

A fecha 7.11.21 se midieron más de 900 Ha ocupadas por las coladas volcánicas. Esto, unido al delta lávico (unas 40 Ha) y al edificio cónico creado por la erupción, permite hablar de una superficie total ocupada de unas 1.100 Ha y unos 150 millones de metros cúbicos de material volcánico expulsado, lo que representa la segunda erupción histórica más importante después de la de Timanfaya (Lanzarote).

Con posterioridad, el 09.10.21, la colada nº 2 ha avanzado el medio centenar de metros que le restaban hasta el acantilado para precipitarse a la playa de Los Guirres (una de las preferidas por los surfistas), un desborde de lava incandescente y fluida tras transitar por conductos subterráneos (tubos volcánicos), uniéndose los frentes de las coladas 1 y 2 que llevaban prácticamente un mes sin recibir aporte visible, hecho que provoca otra fajana inmediatamente al sur de la primera (Fig. 19).

Tipología de la lava

Los materiales emitidos en otras coladas anteriores en La Palma fueron definidos como basaltos alcalinos, basanitas, traquibasaltos y tefritas.

La petrología de las recientes lavas (en concreto de la colada que se había detenido ante la iglesia de Todoque, antes de su destrucción), según datos del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), son basanitas con textura porfídica, conteniendo vidrio, clinopiroxenos, augita y opacos, probablemente magnetita y/o ilmenita en una matriz feldespática (Figs. 20 y 21). En análisis químico revela un 9% de FeO.

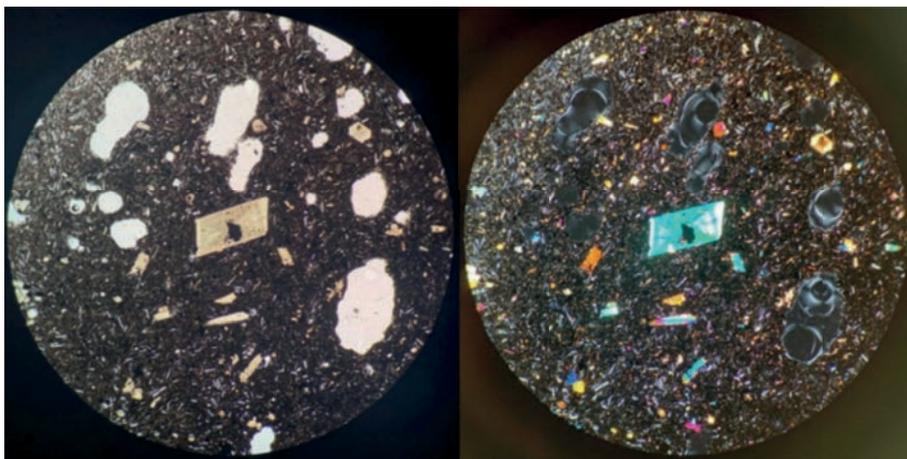


Figura 20. Lámina delgada de la lava vista con microscopio petrográfico. A la izquierda imagen con luz natural, a la derecha con nicoles cruzados. Los colores más grises y blanquecinos se corresponden con plagioclasas, mientras que los más vivos son clinopiroxeno (Fuente: Jane H. Scarrow, Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada).

Figure 20. Thin sheet of lava seen with a petrographic microscope. On the left image with natural light, on the right with crossed nicols. The grayer and whitish colors correspond to plagioclase, while the most vivid are clinopyroxene (Source: Jane H. Scarrow, Department of Mineralogy and Petrology. University of Granada).

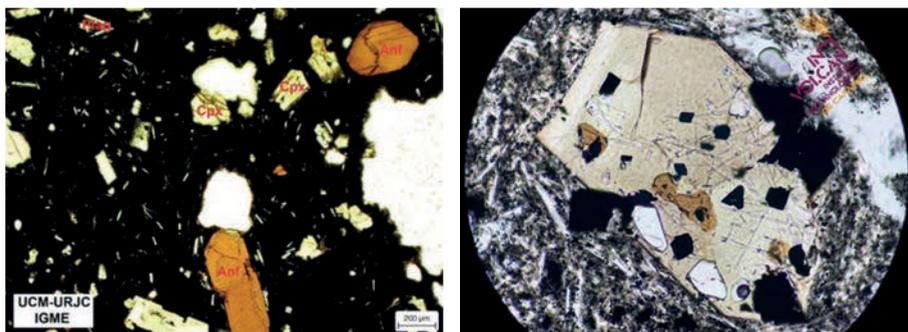


Figura 21. Observación microscópica de la lava de La Palma. Izquierda: Mineralogía de la lava que engulló la iglesia de Todoque. Leyenda: plag = plagioclasas, Cpx = clinopiroxeno y Anf = anfíboles (Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad Complutense de Madrid). Derecha: Cristal de clinopiroxeno con agujas de apatito e inclusiones de óxidos (Fuente: INVOLCAN).

Figure 21. Microscopic observation of lava from La Palma. Left: Mineralogy of the lava that engulfed the Todoque church. Legend: plag = plagioclase, Cpx = clinopyroxene and Anf = amphibole (Department of Mineralogy and Petrology of the Complutense University of Madrid). Right: Clinopyroxene crystal with apatite needles and oxide inclusions (Source: INVOLCAN).

Según un informe elaborado por Eumenio Ancochea para el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) la lava analizada corresponde a una basanita con una composición formada por vidrio volcánico junto con cristales de piroxeno, anfíbol, olivino, óxidos de hierro o titanio y microcristales de plagioclasas. Añade el estudio que “Se trata de una masa vítrea con bastantes cristales, muy similar a la de otras erupciones históricas en la isla, como la del San Juan”.

Al tratarse de una basanita poco evolucionada, las lavas tienen menos gases y sus erupciones son menos explosivas. Este tipo de rocas son propias de coladas poco viscosas y, por lo tanto, fluyen a mayor velocidad.

Otro estudio realizado por el INVOLCAN con la colaboración de las Universidades de Granada y la Laguna o el CNRS francés, coincide en buena parte con el anterior. El responsable de este segundo informe es Matt Pankhurs, geólogo de la Universidad de Leeds (Reino Unido), sobre muestras tomadas al día siguiente de la erupción.

Las coladas lávicas pueden adoptar dos tipologías: “aa” y “pahoehoe”. La “colada aa” —término de origen hawaiano que significa “áspera”— adopta una superficie irregular, rugosa, con bloques (de centimétricos a métricos) de forma irregular y lados afilados, constituyendo lo que se conoce como un malpaís (Fig. 22). La “colada pahoehoe” —del hawaiano “suave”— es habitualmente basáltica y presenta rugosidades que se asemejan a cuerdas (de ahí el nombre de cordadas como también se conocen); son debidas al movimiento muy fluido de la lava bajo una corteza que se va coagulando. No es infrecuente que un tipo se solape con el otro, avanzando sobre él.



Figura 22. Dos imágenes del barrio de Todoque. Arriba, antes de la erupción, abajo, totalmente cubierto de lava formando un malpaís. (Fuente: Radio Televisión Canaria).

Figure 22. Two images of the Todoque neighborhood. Above, before the eruption, below, completely covered in lava forming a bad country. (Source: Radio Televisión Canaria).

Los piroclastos

Se conoce como piroclasto o tefra cualquier fragmento sólido de material volcánico, de dimensiones variables, proyectado al aire durante una erupción volcánica. Según la granulometría de estos fragmentos, se distinguen tres tipos: ceniza (partículas inferiores a 2 mm de diámetro, llegan a ser microscópicas), lapilli (fragmentos comprendidos entre 2 y 64 mm) y bombas volcánicas (tamaño superior a 64 mm de diámetro) formadas por lava compacta expulsada en el curso de una erupción y que se puede redondear al rodar ladera abajo (como ocurrió con frecuencia a finales del mes de octubre) o mostrar una morfología fusiforme al haber completado su consolidación girando en el aire.

Los piroclastos de tamaños apreciables se acumulan en el área próxima al cráter y van paulatinamente construyendo el cono del edificio volcánico. Los de dimensiones inferiores pueden ascender con el movimiento convectivo de los gases y el aire calientes que forman la pluma volcánica y permanecer en suspensión en la atmósfera durante un tiempo considerable y depositarse a grandes distancias del foco de emisión, provocando una lluvia de cenizas —la orientación del viento es esencial— o incluso alcanzar la estratosfera.

En determinados momentos (p. ej., desde el 31 de octubre hasta los primeros días de noviembre) se produjo una potente lluvia de cenizas que cubrió las carreteras y las edificaciones (Fig. 23), obligando a cerrar el aeropuerto el 1 de noviembre. Esta



Figura 23. Evidente testimonio de la lluvia de cenizas del volcán de La Palma.

Figure 23. Evident evidence of the ash fall from the La Palma volcano.

situación se complicó enormemente cuando la alta intensidad de material volcánico, expulsado por los diferentes conos, dificultó la llegada de los rayos de sol a los municipios de Los Llanos de Aridane y El Paso, generando asimismo importantes acumulaciones de cenizas.

Asociadas a las cenizas se han llegado a detectar partículas (inferiores a 4 micras) del polimorfo del cuarzo, cristobalita (SiO_2) — mineral frecuente en rocas volcánicas —, cuya inhalación puede producir una neumoconiosis.

Pasados unos días de la erupción se observó la presencia de “rayos volcánicos”, originados por la fricción entre partículas piroclásticas, en ocasiones muy persistentes (a modo de ejemplo, el 31.10.21 se registraron 16). Estas radiaciones indican una explosividad alta.

Los gases

Las bocas volcánicas emiten, además de las lavas y los piroclastos, grandes volúmenes de gases que constituyen la fracción volátil de la segregación magmática. Entre ellos sobresalen los siguientes: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) ácido sulfúrico (H_2SO_4), Cl, F y vapor de agua. Componentes que, en su mayoría, impurifican el aire, ocasionalmente de manera preocupante.

Las toneladas de emisiones de SO_2 —unas 17.700 diarias— son un indicador de la situación volcánica. Se llegaron a sobrepasar las 50.000 t de SO_2 , cifra muy elevada pues tendría que bajar hasta un orden de magnitud de 100 t para pensar que la erupción está finalizando. El 1 de noviembre se registraron 21.996 t, un dato que rompe la tendencia a la baja, rondando los 10.000 ocho días después (Fig. 24).

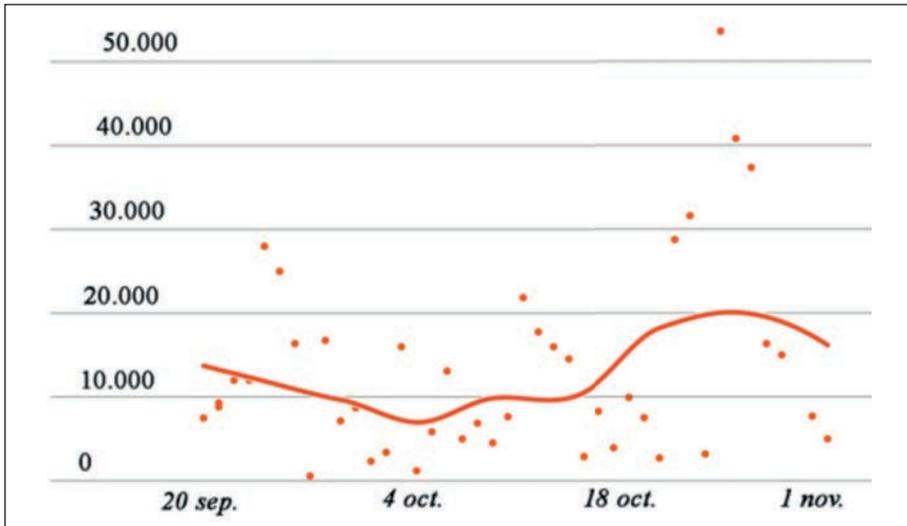


Figura 24. Emisiones de SO_2 en diferentes momentos de la actividad volcánica en el Cumbre Vieja. (Fuente: ZAFRA & al., 2021).

Figure 24. SO_2 emissions at different times of volcanic activity at Cumbre Vieja. (Source: ZAFRA & al., 2021).

A finales de octubre la calidad del aire empeoró de manera preocupante, con índices altos de PM_{10} ².

El dióxido de azufre es el gas que más preocupa pues en contacto con el agua de las nubes puede formar aerosoles ácidos peligrosos (sulfúrico, etc.), que al precipitarse en forma de lluvia ácida puede causar problemas respiratorios, especialmente en personas con enfermedades pulmonares, amén de dañar la vegetación y los cultivos.

Los gases del volcán de La Palma se rastrean hasta en 600 puntos geolocalizados, recogiendo también muestras procedentes del suelo. Este muestreo permite predecir el inicio de una erupción y también el comportamiento del volcán durante la misma. Cuando se remata este artículo aún se detectan 14.000 t diarias del problemático SO_2 , con picos de 22.000 t. A comienzos de noviembre la emisión difusa de CO_2 en la dorsal de Cumbre Vieja era de 1.750 t diarias.

Por otro lado, el choque entre las coladas de lava y el agua salada (rica en NaCl y otras sales de yodo, potasio, etc.) produce peligrosas reacciones químicas. Cuando las partículas de azufre más pequeñas o el ácido sulfúrico (H_2SO_4) de la lava se combinan con el cloro natural del agua del mar, se produce en la reacción cloruro de hidrógeno (HCl , ácido clorhídrico), gas tóxico de olor picante, muy soluble en el agua generando una disolución acuosa.

² Se denomina PM_{10} (partículas menores de 10 micras) a pequeñas partículas sólidas de polvo o cenizas, consideradas contaminantes, dispersas en la atmósfera. Se expresa en mg/m^3 .

Daños producidos

La superficie cubierta por las diversas coladas abarca una superficie de unas 1.000 Ha (994,6 Ha el 09.11.21) y ha producido daños, algunos irreparables, en poblaciones como El Paraíso, El Pedregal, La Laguna y, sobre todo, en Todoque, que quedó sepultado por la lava. No ha habido daños personales, centrándose las destrucciones en edificaciones de todo tipo, infraestructuras y agricultura (Tabla 2).

A la fecha de 11 de noviembre, los datos facilitados por el Catastro indican que se han visto arrasadas por las coladas 1.456 edificaciones, de las cuales: 1.179 de servicio residencial, 149 agrícola, 67 industrial, 33 de ocio y restauración, 13 de disfrute público y 15 de otros usos. Además de 65 km de carreteras.

Tabla 2. Principales daños producidos por el volcán de La Palma.

Table 2. Main damage caused by the La Palma volcano.

Tipología	Instalación afectada
EDIFICACIONES	Campo de fútbol de La Laguna
	Centro de Salud de Todoque
	Colegio de Educación Infantil y Primaria Los Campitos (Todoque)
	Colegio de Educación Infantil y Primaria Todoque
	Colegio de Educación Infantil y Primaria La Laguna
	Iglesia de San Pío X en Todoque
	Sede de la Asociación de Vecinos en Todoque
	2.708 edificaciones, de las cuales 2.562 han sido destruidas (31 oct.)
INFRAESTRUCTURAS	Carretera LP-2 del sur de La Palma, en Taguya
	Carretera LP-211 de Todoque
	Carretera LP-212 de Tacante, en El Paso
	Carretera LP-213 de Puerto Naos
	Carretera LP-215 de Tazacorte a La Laguna, en Llanos de Aridane
	Carretera LP-2132 de Tazacorte por la Costa, en Todoque
AGRICULTURA	Afectadas alrededor de 300 explotaciones agrícolas (plataneras, aguacateros, etc.)

Valoración de las últimas señales del volcán

En los últimos días se detectan algunos signos que parecen señalar un descenso del poder telúrico, aunque lo cierto es que un día suben y otro bajan. Para la redacción de este epígrafe resultó de interés la publicación de ZAFRA & al. (2021) donde se recoge la opinión de destacados expertos.

Fundamentalmente son tres los factores que condicionan la estabilización del volcán: emisión de gases, sismicidad y deformación del terreno.

Los primeros días de noviembre los científicos han comenzado a observar signos positivos que parecen acercarnos al final del proceso eruptivo. Tras 50 días de un enérgico magmatismo se produjo una tendencia a la baja en la emisión de gases

y en el crujido que provoca el magma (tremor volcánico), sin embargo otros parámetros, tales como la sismicidad y la deformación del suelo, manifiestan cierta estabilidad.

Emisión de gases

La emanación de SO₂ provocado por la columna volcánica continúa siendo importante, mostrando valores altos. En el volcán de Cumbre Vieja se observa un cierto decrecimiento, aunque se dibujan dientes de sierra (ver Fig. 24) pues el 24.10.21 se alcanzaban 52.000 t, una semana después disminuyó la cantidad por debajo de 5.000 t diarias y el 5 de noviembre volvió a ascender a 30.000 t. Las tasas de emisión de SO₂ el 8 de noviembre oscilaban entre 16.000 y 23.100 t/día, mientras que el CO₂ mantenía su tendencia ascendente.

La experiencia en otros volcanes indica que el descenso se produce normalmente de manera paulatina, lo que no es el caso pues aún aparecen altibajos en la gráfica de emisiones de SO₂.

La emisión de este tipo de gas se considera un factor determinante de la marcha del proceso eruptivo, ya que su procedencia es puramente magmática. No ocurre lo mismo con el CO₂ o el vapor de agua, que se emiten en mayor cantidad, pues su génesis puede estar relacionada con otras fuentes más superficiales.

Se considera que el volumen de SO₂ presente en el magma es fundamental en el proceso efusivo pues representa su fuerza motriz y tiene una implicación directa en la erupción. Cuando se produce una desgasificación el magma pierde fuerza.

Así pues, la bajada de la emisión gaseosa podría apuntar a un remate del proceso. No obstante, más que considerar los datos de manera aislada es aconsejable observar las tendencias.

Sismicidad

Los terremotos son otro de los signos de control del proceso volcánico. En Cumbre Vieja se detectaron a dos niveles, unos a 10 km de profundidad y otros en torno a los 30 km (véase Tabla 3). Los más superficiales se interpretan como debidos a cambios de presión producidos por el magma que fluye hacia arriba, los más profundos se producen como consecuencia del vaciado del reservorio magmático.

La persistencia de sismos por debajo de los 30 km podría ser indicativo de que el magma ya ha escapado hacia zonas más superficiales y que se está despresurizando el sistema. En consecuencia, los cambios de presión y los reajustes dan lugar a esos terremotos profundos que se detectan últimamente; no se descarta que éstos, algunos de ellos con magnitud 5 mbLg, justifiquen un ajuste de la actividad eruptiva.

Deformación del terreno

El empuje del magma no sólo provoca terremotos, sino también un abombamiento del suelo de la isla, causado por el enorme empuje de la masa fundida en su camino ascendente dentro de la corteza.

Unos días antes de la erupción se había producido una deformación ascendente del suelo de unos 10 cm en el entorno de Cumbre Vieja, aumentando a 15 cm cuando se produjo la erupción y consiguiendo valores de hasta 28 cm. En la actualidad, en las estaciones de medida se observa una ligera deflación de carácter regional, importante

en la cercana al volcán de Jedey, donde se redujo a 12 cm, después de haber alcanzado las mayores deformaciones.

El Instituto Geográfico Nacional ha detectado el 05.11.21, en la estación más cercana al centro eruptivo, una leve deformación vertical en el terreno. No es comparable a la deformación súbita de 10 cm detectada hace 10 días y que se interpretó como un indicio de un aumento del canal de lava o la apertura o cierre de algún punto de emisión (persisten siete bocas eruptivas).

La ligera subsidencia que se detecta, sobre todo en las zonas más alejadas de la zona eruptiva, es significativa y proporcional al descenso de la presión del reservorio, o sea, se emite más magna desde los 10 km de profundidad del que entra desde el almacén situado a 30 km. Esta reversión no es solo local, sino que afecta a toda la isla, lo que es un signo favorable.

Otras señales predictoras

Se atenúan las vibraciones volcánicas prolongadas que se relacionan con la circulación de gases y magma en el edificio volcánico. Se produjo un pico del tremor a finales de octubre y con posterioridad la señal parece mitigarse, lo que indicaría una tendencia positiva. No obstante, PEVOLCA insiste que los parámetros asociados al volcán deben lograr niveles aún más bajos para que se acerque al final.

Según informó INVOLCAN, el 05.11.21 aparecen, por primera vez, depósitos de azufre elemental. Una reacción con el H₂S para formar azufre implicaría que la componente magmática del gas está bajando y aumentando la emisión de sulfhídrico. Este hecho no implica un final de la erupción, pero sí un cambio claro de su dinámica.

Sin embargo, la única medida directa de la actividad volcánica es la emisión de lava y ésta no cesa, ya lleva más de siete semanas fluyendo (Tabla 3). La esperanza es que la actividad volcánica cese pronto después de 53 días de erupción.

Tabla 3. Principales eventos relacionados con el volcán de La Palma.

Table 3. Main events related to the La Palma volcano.

Fecha	Acontecimientos
19 septiembre	Comenzó la erupción a las 15:13 (hora local) en el municipio de El Paso.
20 septiembre	Se produjeron tres coladas de lava, con un grosor de 6 m.
21 septiembre	La colada principal, a una velocidad de 120 m/h alcanzó el barrio de Todoque. Estaban en actividad cuatro bocas.
22-23 septiembre	Existían nueve bocas con coladas avanzando con bastante lentitud.
24 septiembre	Aparecieron dos bocas más. Se intensificó la actividad explosiva.
25 septiembre	Se derrumba la zona occidental del cono principal y se abrió una nueva boca emitiendo lava fluida que discurría sobre la primera. La columna de gases y cenizas alcanzó una altura de 6 km. Hasta ese momento se habían expulsado unos 25 millones de m ³ de ceniza y lava.
26 septiembre	Se reactivó la última colada de lava (100 m/h) atravesando Todoque y derrumbando la iglesia.

Fecha	Acontecimientos
27 septiembre	Parón volcánico que se reanudó por la tarde con lava más fluida que aumentó la destrucción de edificaciones. Se llevaban vertidos 46,3 millones de m ³ de magma.
28 septiembre	Tras arrasar plataneras la colada llegó al mar en el municipio de Tazacorte, diez días después de comenzar la erupción.
29 septiembre	Continuó la ganancia de terreno al mar y hacia el mediodía se formó una fajana de unos 500 m de ancho.
1 octubre	A unos 400 m al norte de la boca principal se abrieron otras dos bocas, separadas por unos 15 m, con una nueva colada que discurría paralela a la primigenia. La fajana alcanzaba una distancia de 475 m de la línea de costa y su profundidad era de 30 m. El contacto lava-mar producía un penacho gaseoso.
7 octubre	Con epicentro en la Villa de Mazo se registró un terremoto de magnitud 4,3 mbLg –el más fuerte hasta ese instante– a una profundidad de 25 km y luego otros dos seísmos de magnitud 3,8 en escala mbLg a 36 km y de 3,4 a 12 km. La colada principal se desgajó a la altura de la montaña de Todoque acercándose a la playa de El Charcón.
9 octubre	Derrumbes en la ladera norte del cráter provocando que la colada se desparrame en varias direcciones. La sismicidad creció algo, con hipocentros a 20 km.
10 octubre	La colada sepultó los últimos edificios de Todoque. Tras tres semanas de erupción la lava había cubierto 525 Ha y afectando a unas 1.200 construcciones.
14 octubre	Se produjo un terremoto de magnitud 4,5 en la escala mbLg a 37 km de profundidad en Villa de Mazo.
15 octubre	Se abrió una nueva boca al SO del cráter, emitiendo piroclastos y gases.
16 octubre	Dos seísmos de magnitudes 4,3 y 4,5 mbLg respectivamente a 37 y 34 km.
20 octubre	La colada, formada por dos leguas, atraviesa el barrio de La Laguna. Terremoto de magnitud 4,8 en escala mbLg con hipocentro a 39 km.
23 octubre	Nuevo derrumbe del cono principal, desbordándose la lava por una boca secundaria.
24 octubre	Se alcanzó una emisión de SO ₂ de unas 52.000 t.
25 octubre	Derrumbe parcial del cono principal, creando desbordamiento de lava y bloques gigantes de roca.
26 octubre	El Instituto Geográfico Nacional detecta una elevación de la isla 10 cm. Se originaron 184 terremotos en las últimas 24 horas.
27 octubre	Se produce otra ruptura del cono principal del volcán. La erupción cubre 911,6 Ha. Emisión de 6.000 a 9.000 t de SO ₂ .
28 octubre	El volcán expulsa enormes bloques de rocas volcánicas. Un terremoto de magnitud 4,6 mbLg a 38 km de profundidad.

Fecha	Acontecimientos
29 octubre	Surge una nueva colada del flanco noroeste del cono principal que se mueve hacia el SO sobre coladas previas (n° 1 y 2) desplazándose sobre terreno no afectado.
30 octubre	Se registra en Villa de Mazo un terremoto de magnitud superior a 5 en escala mbLg, a 35 km de profundidad.
31 octubre	Otro sismo en la misma población de igual magnitud, con hipocentro a 38 km. Se registraron 16 rayos volcánicos.
1 noviembre	Es muy evidente la alineación de los centros de emisión. La incesante lluvia de ceniza obliga a cerrar el aeropuerto de La Palma. Los valores de SO ₂ bajaron de 5.000 t.
2 noviembre	Terremoto de magnitud 4,1 mbLg, a 12 km de profundidad, registrado en Fuencaliente, el de mayor magnitud en profundidades intermedias. La calidad del aire en Los Llanos de Aridane (PM10 ≥151 mg/m ³) es extremadamente desfavorable; la nube de ceniza afecta la operatividad del aeropuerto de La Palma. La colada vuelve a alimentar nuevos tubos lávicos. Están cubiertas por la lava 987,9 Ha.
3 noviembre	Después de 41 sismos durante la noche, tuvieron lugar dos terremotos casi simultáneos de magnitud 5 y 4,8 mbLg, a una profundidad de 36 km al SO del municipio de El Mazo. Emisión de 30.000 t de SO ₂ . El abundante volumen de ceniza y la lava que sale del volcán alimenta las coladas existentes, sin avances significativos. La superficie cubierta subió a 997,9 Ha.
4 noviembre	Los valores de SO ₂ (29.400 t) y CO ₂ (1.850 t) disminuyen algo, aunque se mantienen elevados. El total de la superficie cubierta por las coladas roza los 10 km ² . La lava ha destruido 283,25 Ha de cultivo (158,79 corresponden a plataneras, 59,48 a viñedos y 24,02 a aguacates).
5 noviembre	La columna de la nube de cenizas alcanzó una altura de 3,5 km. El volcán expulsó bombas volcánicas. Se observa una playa en la fajana. Se detecta, por primera vez, azufre elemental.
6 noviembre	Escasa emisión de lava que demuestra cambios de intensidad. Se produjo un terremoto de magnitud 4,5 mbLg. Preocupa el avance de la colada n° 11.
7 noviembre	INVOLCAN hace público la presencia de cristales verdosos del nesosilicato olivino en las lavas más recientes. Aumenta la emisión lávica que rellena oquedades en las coladas e incrementa la altura de las mismas. Decae la emisión de SO ₂ y crece la de CO ₂ . Terremoto de magnitud 4,6 a 37 km de profundidad.
8 noviembre	La lava discurre sobre coladas antiguas. Mala calidad del aire. Captan en la Caldera de Taburiente agua burbujeante con ³ He. Parece aflojar el sistema de realimentación de la erupción.
9 noviembre	La lava alcanza la playa de los Guirres (municipio de Tazacorte), al sur de la montaña de La Laguna, en un lateral de la fajana creada por la colada principal. Magma más superficial. Emisión de más de 10.000 t de SO ₂ .

Fecha	Acontecimientos
10 noviembre	El frente de la colada nº 2, tras precipitarse como una catarata incandescente con tres aportes, ha desembocado en el mar. Se produjo un seísmo de magnitud 4,8 mbLg a una profundidad de 38 km.
11 noviembre	Repunta la sismicidad con un terremoto de magnitud 5 mbLg a 37 km de profundidad. Están a punto de unirse las dos fajas y engullir la playa de Los Guirres, formándose columnas de gases tóxicos (HCl). El volcán lanza grandes bombas esféricas. La emisión de SO ₂ sufre un repunte, situándose entre 31.000 y 43.000 t. La superficie cubierta por las lavas alcanza las 1.000 Ha.

Un potente equipo científico de control

Es notoria la importancia que han tenido las disciplinas científicas (geología, hidrogeología, geofísica, geotecnia, geodesia, física, astrofísica, química, ingeniería...) para predecir el fenómeno volcánico, evitando así una catástrofe humana (SÁENZ DE SANTA MARÍA BENEDET, 2021).

Además de la incipiente manifestación de microsismos, también se obtuvo información muy útil a partir de los datos e imágenes proporcionadas por los satélites Sentinel pertenecientes al Sistema de Observación Terrestre Europeo “Copernicus”, de la Agencia Espacial Europea. Dotados de sofisticados sensores y ondas radar, detectaron un abombamiento del terreno en Cumbre Vieja.

En esta situación, los científicos responsables del seguimiento consideraron necesario advertir a las autoridades de la situación, del posible desarrollo de un acontecimiento volcánico y de su evolución. Era muy probable que el domo observado se fracturara a corto plazo y que por las fisuras salieran lavas, gases y piroclastos inaugurando así una erupción. La situación precisa de estas fracturas no se podía determinar aunque, afortunadamente, se formaron en la ladera de Cumbre Vieja y no en las zonas habitadas próximas a la costa.

Se establecieron entonces todas las actuaciones previstas en el Plan de Emergencias Volcánicas de Canarias (PEVOLCA). Se entró en alerta amarilla, se notificó a la población, se publicaron mensajes sobre las actuaciones a realizar por los vecinos y se alertó a las fuerzas de seguridad y a protección civil.

Iniciada la erupción se ordenó la evacuación de la población, que ya estaba advertida con antelación de las zonas más peligrosas, según criterios técnicos. En breve plazo, se consiguió completar esta evacuación de los vecinos afectados sin que hubiera que lamentar la pérdida de vidas humanas. La vigilancia de la erupción, la monitorización e instrumentación, la toma de muestras para análisis de gases y fluidos volcánicos, los trabajos geológicos de campo, la cartografía de las coladas, los cálculos volumétricos, etc., continúan desde entonces y aportan datos de gran importancia para mantener a salvo a la población.

¿Cómo es posible este gran éxito? Se debe a la presencia en Canarias de numerosas instituciones que realizan ciencia básica sobre vulcanología. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME, organismo geológico centenario), el Instituto Geográfico Nacional (IGN, responsable de las redes sísmicas y de la geodesia), INVOLCAN (institución joven dedicada al conocimiento volcanológico en las islas), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), la Agencia Espacial Euro-

pea (que controla los satélites), las Universidades canarias y otros centros universitarios españoles implicados, etc. han dado lugar a una masa crítica de científicos de diferentes ramas que trabajan e investigan en el conocimiento del comportamiento efusivo isleño. Paralelamente, una instrumentación cada vez más sofisticada (con frecuente utilización de drones), ha permitido obtener un conocimiento muy preciso de lo sucedido y de lo que, previsiblemente, acontecerá. Este conocimiento ha salvado muchas vidas de nuestros compatriotas. Como punto de comparación, durante la erupción del volcán Teneguía solo existía una estación sísmica en todas las Islas Canarias, colocada en Tenerife. Por último, es reseñable la presencia en la isla del buque oceanográfico “Ramón Margalef”, del Instituto Español de Oceanografía, cuyo objetivo es estudiar la evolución de las coladas una vez alcancen el mar.

El trabajo de los investigadores y la monitorización constante permite obtener datos de gran interés que aumentarán el conocimiento sobre las erupciones canarias y mejorarán las previsiones futuras, permitiendo completar y ampliar los mapas de riesgos volcánicos de las islas, así como modificar el trazado e implantación de las nuevas infraestructuras y los futuros usos del suelo. Todos los científicos implicados merecen nuestro agradecimiento por su dedicación al estudio y al trabajo en el campo, no siempre cómodo. La investigación en ciencia básica tiene, por tanto, una rentabilidad a largo plazo altísima, casi infinita, máxime cuando, como en este caso, la pérdida de vidas humanas hubiera sido irreparable.

CONCLUSIONES

La génesis de las Islas canarias se adapta al modelo del “punto caliente” aplicado en el archipiélago hawaiano, al que habría que añadir una cierta implicación estructural, dado que se encuentran en un contexto geotectónico en relación con fallas de desgarre con desplazamiento sinistral que limitan por el sur la microplaca de Marruecos.

A fecha 11 de noviembre, el volcán palmero continúa su evolución normal. Se han generado varias bocas que han expulsado grandes cantidades de gases de distinto tipo y piroclastos. El cono se ha fracturado y reconstruido varias veces y las coladas de lava han discurrido ladera abajo ocupando 1.005 Ha de terreno (según información facilitada por el Cabildo de La Palma el 11 de noviembre) y el perímetro de esta superficie es de 56,23 km. El volumen de magma expulsado a la fecha 07.11.21 se estima en unos 150 millones de metros cúbicos. Hasta la fecha (11 de noviembre) han sido afectadas 1.456 edificaciones e infraestructuras; en el caso de las carreteras quedaron destruidos 65 km.

El volcán de Cumbre Vieja se muestra como el segundo más destructivo detrás del Timanfaya que, desde 1730 a 1736, cubrió de lava la cuarta parte de Lanzarote, con unas 20.000 Ha arrasadas.

Es característico el comportamiento estromboliano cambiante del volcán, con ascensos y descensos de los parámetros que controlan la erupción. Alternan episodios efusivos, con caudalosas coladas de lavas, con otros más explosivos eyectando gases y abundantes piroclastos de diferentes tamaños y enormes volúmenes de cenizas. Todo ello constituye un gran espectáculo de la Naturaleza que tiene, como contrapartida, las pérdidas materiales de la sociedad isleña.

No se trata de un desastre del medio ambiente, como se ha llegado a señalar por algunos medios, pues se trata de procesos constructivos que, una vez terminados, acrecentarán la isla y darán pie al retorno de la vida y a la creación de nuevos ecosistemas.

En el fondo, los volcanes son la forma que tiene el planeta de transferir su calor interno al espacio exterior. Si no fuera por este proceso, que ha dado lugar a un enfriamiento suficiente del planeta y a la creación de una corteza superficial muy delgada (casi como la cáscara de un huevo) no sería posible el medio ambiente y la vida en cualquiera de sus formas sobre la faz de la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

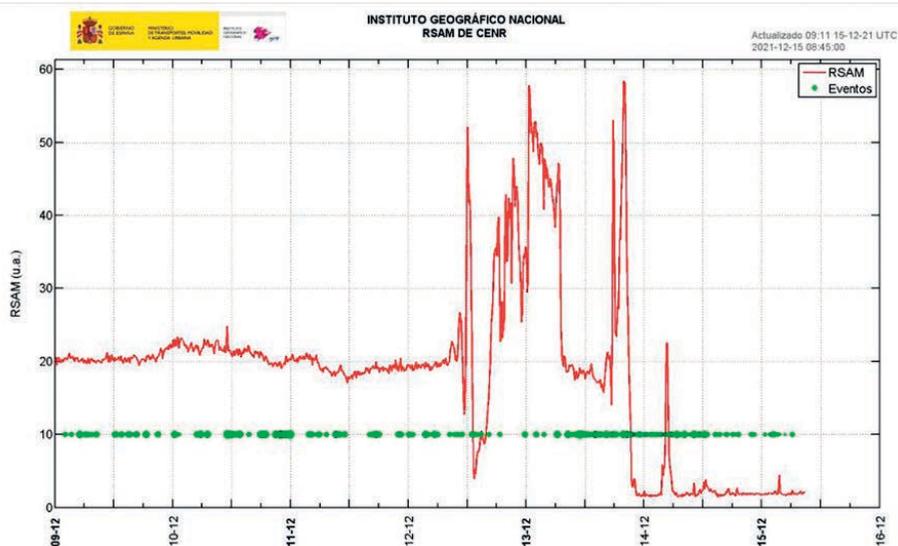
- ALONSO, A.; APARICIO, A.; HERNÁNDEZ-PACHECO, A. & RODRÍGUEZ BADIOLA, E., 1974. Morphology evolution of Teneguía Volcano área. *Estudios geológicos*: 19-26 (número monográfico).
- BLANCO-MONTENEGRO, I.; G. MONTESINOS, F. & ARNOSO, J., 2018. Aeromagnetic anomalies reveal the link between magmatism and tectonics during the early formation of the Canary Islands. *Scientific Report*, 8 (42), Nature Publishing Group.
- CARRACEDO, J.C. & PÉREZ TORRADO, F.J., 2008. Marco geológico del complejo volcánico del Teide. En: *El volcán Teide. Volcanología, interpretación de paisajes e itinerarios comentados*. VII Congreso Geológico de España, Caja Canarias, 3 tomos.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M., 2011. La isla de Hierro, un punto caliente singular. *La Nueva España*, Siglo XXI, 16 de octubre: 6.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M., 2021. Vulcanismo en La Palma. Argumentos geológicos de lo que acontece en la isla canaria. *La Nueva España*, Tribuna, 22 de septiembre: 27.
- HERNÁNDEZ PACHECO, A. & VALLS, M.C., 1982. The historic eruptions of La Palma Island (Canaries). *Archipiélago. Revista da Universidade dos Açores*, n.º III: 83-94.
- HERNÁNDEZ PACHECO, A., 1985. El vulcanismo histórico en las Islas Canarias. En: *Síntesis de la actividad volcánica de las Islas Canarias*. Instituto de Estudios Canarios: 28-38, La Laguna.
- NUHFER, E.B.; PROCTOR, R.J. & HOSER, P.H., 1993. Riesgos derivados de los Procesos Geológicos. Volcanes. En: *The Citizens Guide to Geologic Hazards*. The American Institute of Professional Geologists. Versión española por SUÁREZ, L. & REGUEIRO, M. (1997: *Guía Ciudadana de los Riesgos Geológicos*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España.
- ROMERO, C., 1991. *Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario*. Consejería de Política Territorial del Gobierno de Canarias, t. I: 695, Tenerife.
- SÁENZ DE SANTA MARÍA BENEDET, J.A., 2021. La ciencia se reivindica en Cumbre Vieja. *La Nueva España*, Tribuna, 29 de septiembre: 28.
- SUÁREZ, L. & REGUEIRO, M., 1997. *Guía Ciudadana de los Riesgos Geológicos*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España: 79-96.
- TARBUCK, E.J. & LUTGENS, E.K., 2005. *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Pearson. Prentice Hall.
- ZAFRA, M.; SALAS, J. & SEVILLANO-PIRES, L., 2021. El volcán al desnudo: cómo interpretar las señales de la erupción de La Palma. *El País*, 6 de noviembre.

Adenda

Ahora, día 15 de diciembre, que el volcán de Cumbre Vieja muestra importantes signos de agotamiento, parece pertinente hacer algunas precisiones sobre lo expuesto en el resto del artículo, concluido el 11 de noviembre.

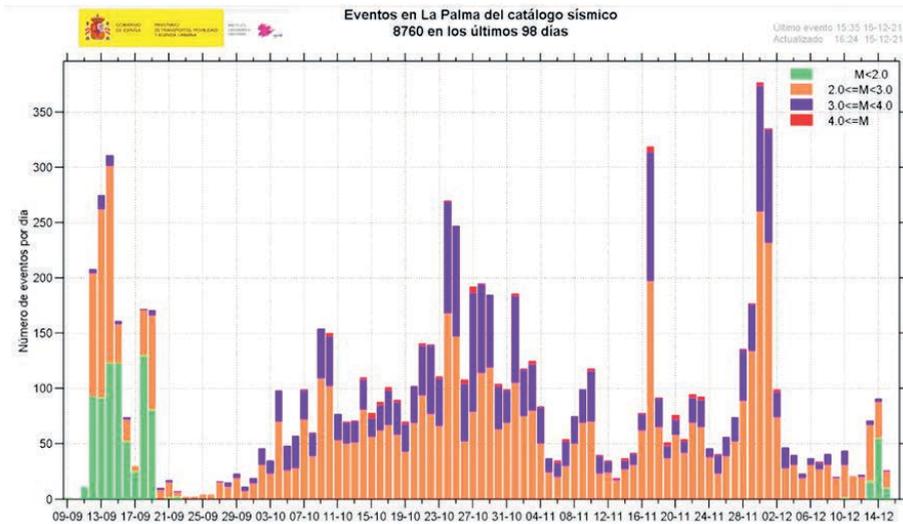
Desde esa fecha y después de múltiples fluctuaciones en la explosividad, expulsión lávica y de piroclastos, formación de nuevas fajas, modificaciones en la morfología del cráter, creación de nuevos tubos lávicos, etc., el tremor y la elevación del terreno tienden a cero, la sismicidad apenas es perceptible y se detecta una disminución importante del volumen de emisión y de los gases expelidos (SO_2 y CO_2). Este parón parece indicar el inicio de una fase de letargo y/o un claro principio del fin del proceso volcánico el cual se convierte en el más largo de los históricos de la isla de La Palma, tras expulsar más de 200 millones de metros cúbicos de materiales volcánicos y arrasando un total de 1.227 Ha de terreno³.

La observación de los gráficos actualizados es bastante elocuente para justificar, por lo menos, la atenuación de la actividad eruptiva.

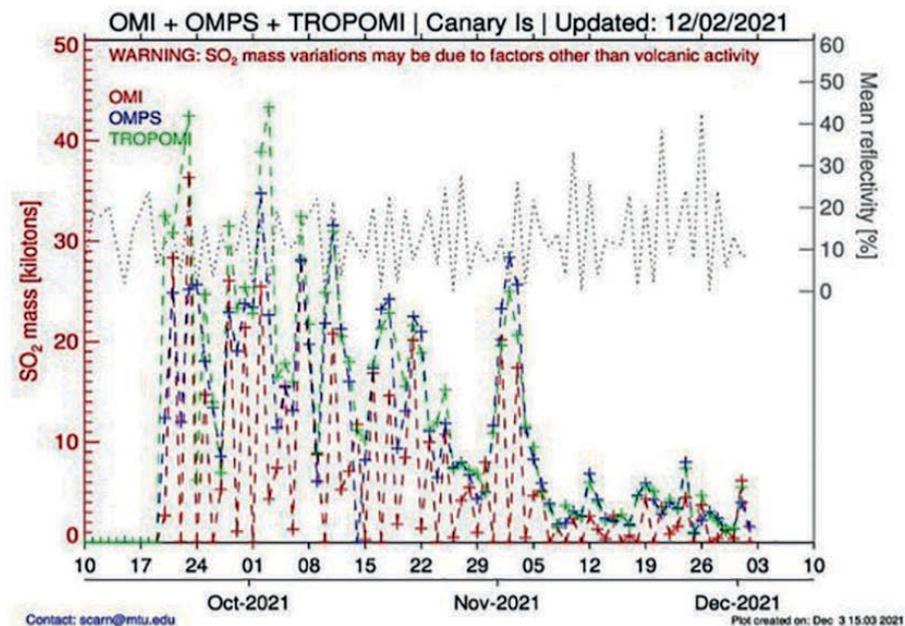


Tremor en el volcán Cumbre Vieja entre el 9 y 15 de diciembre de 2021, expresado en el indicador RSAM (Real-time Seismic Amplitude Measurement) —sistema de medida de la amplitud sísmica en tiempo real—, medido en una estación sísmica cercana a la erupción. El tremor volcánico, causado por el movimiento del magma, está directamente relacionado con la explosividad del volcán y la cantidad de magma que sale. (*Fuente: Instituto Geográfico Nacional*).

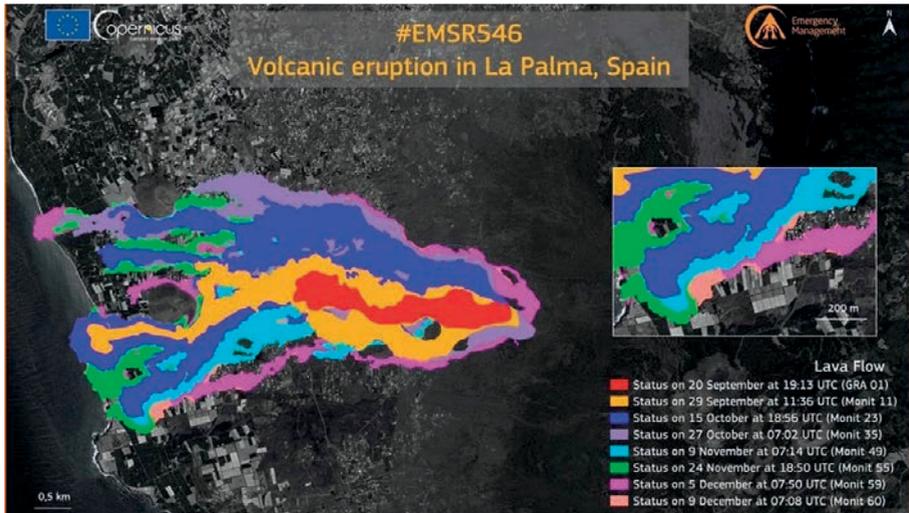
3 Después de varios días sin apenas dinamismo, el Gobierno de Canarias anunció el 13 de diciembre el final de la erupción, tras 85 días y ocho horas de actividad. El tercer episodio volcánico histórico más largo registrado en el Archipiélago Canario.



Histograma de sismos hasta el 15 de diciembre, señalando su amplitud con diferentes colores. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional).



Variación de las emisiones de SO₂, con un descenso muy notable desde comienzos de diciembre, alcanzando en la actualidad 5 t diarias, cuando se llegaron a superar las 50.000 t.



Situación de las coladas el 9 diciembre de 2021, imagen obtenida por el satélite Copernicus.