Medina, F.M. *et al.* (2023). El destino de la biodiversidad durante la reciente erupción volcánica de Tajogaite, La Palma: investigando un evento natural catastrófico. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*, pp. 117-151. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz. 234 pp. ISBN 978-84-09-45782-1

3. El destino de la biodiversidad durante la reciente erupción volcánica de Tajogaite, La Palma: investigando un evento natural catastrófico

Félix Manuel Medina[a], María Guerrero-Campos[b,c], Joaquín J. Quirós Priego[d], Rafael García Becerra[e], Silvia Fajardo[f], Patricia Marrero[b] y Manuel Nogales[c]

[a] *Unidad de Biodiversidad, Consejería de Medio Ambiente, Cabildo de La Palma, S/C de La Palma, Islas Canarias.*

[b] *Área de Medio Ambiente, Gestión y Planeamiento Territorial y Ambiental (Gesplan, S.A.), Tenerife, Islas Canarias.*

[c] *Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA-CSIC), La Laguna, Tenerife, Islas Canarias.*

[d] *Servicio de Prevención de Riesgos Laborales (SPRL-CSIC), Delegación Institucional del CSIC en Andalucía y Extremadura, Sevilla.*

[e] *C/ El Pilar 8, 38700 S/C de La Palma, Islas Canarias.*

[f] *Servicio de Biodiversidad, Gobierno de Canarias, Tenerife, Islas Canarias.*

El 19 de septiembre de 2021 tuvo lugar el inicio de la erupción del volcán de Tajogaite en la vertiente oeste de la dorsal de Cumbre Vieja en la isla de La Palma. Después de 85 días de actividad, ésta ha sido la erupción histórica más larga en la isla y la octava que ha tenido lugar en periodo histórico, después de los volcanes de Tacande (1480), Jedey (1585), Martín y El Búcaro (1646), Fuencaliente (1677), El Charco (1712), San Juan, Hoyo Negro y Duraznero (1949) y Teneguía (1971). Ha sido uno de los volcanes mejor monitorizados desde el punto de vista geológico, pero los efectos de una erupción volcánica sobre la biodiversidad nunca habían sido estudiados simultáneamente al evento eruptivo. La

mayoría de los trabajos científicos en esta materia se han dirigido a conocer cuáles son los procesos de regeneración de la vegetación y de la sucesión ecológica una vez finalizadas las erupciones volcánicas. Por ello, el objetivo de este estudio es detallar cómo se plantearon los métodos de seguimiento de la biodiversidad en unas condiciones ambientales adversas como las producidas por la erupción de un volcán. Asimismo, se trató de responder algunas cuestiones relativas a sus efectos sobre las especies de la flora y fauna insular: ¿Están las especies insulares «adaptadas» a los factores de estrés provocados por el volcanismo? ¿Hay algunos tipos funcionales de plantas vinculados a ellos? El estudio de las escalas temporales y espaciales de esos patrones ayudará a conocer en qué medida estos eventos naturales catastróficos constituyen ventanas de oportunidad para que se produzcan o aceleren los procesos evolutivos que tienen lugar en la biota de islas oceánicas.

Introducción

La Palma es una de las islas más jóvenes del archipiélago canario, con unos 2 millones de años de antigüedad, y más activa en términos geológicos; en ella han tenido lugar la mitad de las erupciones volcánicas históricas acaecidas en Canarias (Carracedo, 2008). Desde la segunda mitad del siglo pasado, se han llevado a cabo en la isla numerosos estudios geológicos, muchos de ellos relacionados con la actividad volcánica de la dorsal de Cumbre Vieja (Carracedo, 2008). En las últimas décadas, en esta dorsal se han realizado seguimientos específicos de los procesos geoquímicos de desgasificación difusa del dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), radón (^{222}Rn) y helio ($^{3}He/^{4}He$) (Padrón *et al*., 2015, 2022; Pérez *et al*., 1988, 2022), así como de la actividad sísmica y de las deformaciones del terreno (Fernández *et al*., 2021), los cuales se consideran fundamentales en la vigilancia volcánica.

La erupción del volcán de Tajogaite (Fig. 1) ha sido una de la más y mejor monitorizada en Canarias (Carracedo *et al*., 2022; González, 2022), tanto desde sus estados precursores, pasando por los momentos de mayor actividad (Romero *et al*., 2022; Sicard *et al*., 2022) y posterior finalización, el 13 de diciembre de 2021. El seguimiento de la erupción volcánica se llevó a cabo mediante la medición continua de gases (Palanco *et al*., 2022; Pérez *et al*., 2023; Rizzo *et al*., 2022), y el uso de nuevas y novedosas tecnologías como la espectroscopía láser (Palanco *et al*., 2022), drones (Civico *et al*., 2022; Román *et al*., 2022) o imágenes satelitales (De Luca *et al*., 2022; Plank *et al*., 2023; Walter *et al*., 2023). La aplicación de estos métodos científicos específicos permitió a las Administraciones Públicas dotarse de la

información básica que le permitiera establecer las medidas adecuadas para intentar minimizar, en lo posible, los daños sobre la población (Carracedo *et al*., 2022; Martín-Raya *et al*., 2023).

Fig. 1. Erupción del volcán de Tajogaite en la vertiente oeste de la dorsal de Cumbre Vieja en la isla de La Palma.

Sin embargo, las lavas finalmente cubrieron una superficie total de 1241 hectáreas, afectando a unas 3000 construcciones de distinta índole (Fig. 2). La destrucción de más de 1300 casas supuso que más de 2300 personas perdiesen sus hogares y su futuro inmediato. A este respecto, fue mucho lo que se publicó, sobre todo en redes sociales, acerca de los sentimientos encontrados que suponía enfrentarse a una erupción volcánica: la gran espectacularidad de un evento natural frente a la destrucción de bienes humanos (viviendas, infraestructuras, cultivos o industrias) de suma importancia para la actividad económica de los habitantes de esa zona de la isla. Caben destacar algunas publicaciones en las que quedaron reflejados los sentimientos que se tenían hacia el volcán como origen de todo el sufrimiento ocasionado por las pérdidas materiales y emocionales (Bleyhl, 2021; Frey, 2021; García Hernández, 2021; González, 2021; ILove the World, 2021, Jarabo Lorenzo, 2002; Nave & Ferrero, 2022). De igual manera, se expresó el agradecimiento y reconocimiento hacia las muestras de solidaridad

demostradas por los habitantes de la isla, del archipiélago y del resto de nuestro país, así como de todas las personas que llegaron de fuera, para ayudar a aquellos que lo necesitasen. Un año después de la erupción y abordados desde diferentes perspectivas, se analizaron algunos de los avances conseguidos en el conocimiento científico (Afonso-Carrillo, 2023).

Fig. 2. Efectos de las coladas de lava del volcán de Tajogaite en áreas urbanizadas y agrícolas de la comarca oeste de la isla de La Palma (Foto: TICOM Soluciones, S.L.).

No ajenos a esta pérdida, el evento natural que estaba teniendo lugar supuso una oportunidad única para estudiar sus efectos sobre la rica biodiversidad de una isla oceánica de origen volcánico, como La Palma (Nogales & Medina, 2021, 2022). Es la primera ocasión en la que se realiza un seguimiento sistemático de la flora y fauna al mismo tiempo que se produce una erupción volcánica. La mayoría de los estudios previos realizados en relación a los efectos de las erupciones volcánicas sobre la biodiversidad se han basado en seguimientos posteriores a la erupción, con el fin de estudiar, principalmente, los procesos de recolonización de los nuevos hábitats creados y la regeneración de la vegetación. Algunos de los ejemplos más conocidos son los estudios de la sucesión ecológica tras la

erupción del volcán Ksudach en Kamchatka (Grishin *et al*., 1996) y el de la isla de Krakatoa (Whittaker *et al*., 1999), sobre la recuperación de la vegetación cubierta por material volcánico (tefra) del Monte St. Helens (Zobel & Antos, 1997), y las dinámicas de regeneración vegetal en volcanes de Japón como el Usu (Tsuyuzaki, 1989) o el Monte Koma (Tsuyuzaki & Hase, 2005).

En el presente trabajo se expondrá cómo fueron los primeros momentos en los que tuvimos que afrontar el estudio y seguimiento de la flora y fauna en una situación de emergencia, como es el de una erupción volcánica. Por otro lado, se pretende investigar los procesos ecológicos y evolutivos que podrían estar asociados a las erupciones acaecidas en una isla oceánica. Asimismo, se analizarán algunos de los resultados más relevantes obtenidos durante el trabajo de seguimiento; y, por último, se comentarán aspectos relacionados con cómo el mantenimiento de la misma metodología de seguimiento, una vez finalizada la erupción, permitirá obtener resultados sobre la recuperación de la biodiversidad afectada por el volcán.

Ante todo… Seguridad

La erupción del volcán de Tajogaite se clasificó como una erupción fisural basáltica dominada por actividad estromboliana, con episodios de pulsos freatomagmáticos y moderadamente explosiva (Carracedo *et al*., 2022), que dio lugar a un edificio de 34 Mm^3 de volumen y unos 200 metros de altura, y que emitió más de 200 Mm^3 de material piroclástico y lava (Carracedo *et al*., 2022; PEVOLCA, 2021). Afectó casi a un 2% de la superficie total de la isla, acumulándose ceniza volcánica en prácticamente toda la isla y produciendo la emisión de, aproximadamente, 185 mil toneladas de dióxido de azufre (SO_2) (Weiser *et al*., 2022).

Durante la erupción, la emisión continua de lava, piroclastos, cenizas y gases complicó en gran medida cualquier trabajo que se quisiese realizar en las zonas afectadas (Fig. 3). Las lavas discurrían a velocidades variables dependiendo de su viscosidad y de la evolución de la propia erupción, oscilando entre 1 m/min y 30 km/h (Carracedo *et al*., 2022). Según estos autores, las bombas y lapilli expulsados con trayectorias balísticas, no cayeron a más de 1 km del cono. En base a estas premisas, el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA), impuso unas restricciones y normas de obligado cumplimiento para el desarrollo de los trabajos de seguimiento alrededor del volcán. En lo que respecta al seguimiento de la biodiversidad, se estableció la prohibición de acercarse a menos de 200 metros alrededor de las coladas de lava y a no menos de 1 km del cráter.

Realizar la actividad preventiva a pie de campo en el contexto de una erupción volcánica es una tarea con pocos precedentes en España. Para poder

llevarla a cabo, hay que tener en cuenta el conjunto de riesgos derivados de los productos emitidos por los volcanes y que pueden ser perjudiciales para la salud humana (Horwell *et al.*, 2015; Mueller *et al.*, 2020). En el caso de La Palma, las principales lesiones de tipo traumático serían las causadas por la caída de piroclastos (aplastamiento, golpes, arrastre, asfixia simple o ahogamiento). Por otro lado, las lesiones térmicas (quemaduras) estarían provocadas por las emisiones volcánicas calientes como coladas o flujos piroclásticos que están compuestos de gas, ceniza y rocas a temperaturas de 700 a 1200ºC y velocidades de hasta 550 km/h (Martí Molist, 2011; Mueller *et al.*, 2020). Un impacto menos conocido es el eléctrico, causado por relámpagos generados por la fricción de las partículas en la pluma de ceniza (Mueller *et al.*, 2020).

Fig. 3. Emisión de gases y tefra del volcán de Tajogaite durante su erupción en la isla de La Palma (19 de septiembre – 13 de diciembre de 2021).

Los efectos toxicológicos de la contaminación atmosférica producida por la emisión de gases y aerosoles, tanto durante la erupción como en el posterior proceso de desgasificación, pueden dañar los sistemas respiratorio y cardiovascular (Stewart *et al.*, 2015; Torres, 2020). La acumulación en concentraciones letales de gases asfixiantes como, por ejemplo, el dióxido de

carbono (CO_2) es más probable que ocurra en las pendientes de un volcán, dentro de un cráter o cerca de una fisura, mientras que los gases irritantes como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), pueden ejercer sus efectos adversos incluso a una menor concentración y a muchos kilómetros a la redonda del volcán (Stewart *et al.*, 2022). La emisión difusa de gases producidos de forma no visible aprovechando todo tipo de fracturas y fisuras en el terreno, principalmente en el caso de emanaciones de monóxido de carbono (CO) y/o CO_2, pueden llegar a suponer un grave peligro para las personas en zonas no muy bien ventiladas y/o a alturas por debajo de un metro respecto al nivel del suelo (PEVOLCA, 2022a, b).

Las grandes erupciones pueden cubrir de ceniza amplias extensiones de terreno y aumentar las concentraciones de partículas en el aire, mucho más altas que las producidas normalmente por la actividad antropogénica (Stewart *et al.*, 2022). Las que se toman de referencia son las de tamaño < 2,5 µm y < 10 µm (denominadas *materia particulada* PM2,5 y PM10, respectivamente). La exposición aguda y/o crónica a las partículas PM2,5 puede provocar, por inhalación, asma y otras enfermedades respiratorias agudas en personas susceptibles, aumentando el riesgo de mortalidad y morbilidad (WHO, 2013a, b; Mueller *et al.*, 2020). Las emisiones volcánicas también provocan lesiones oculares y dérmicas, gastroenteritis, problemas en el embarazo, fluorosis dental, e incluso patologías cardiovasculares y relacionadas con la salud mental (Stewart *et al.*, 2022).

Las emisiones volcánicas gaseosas están compuestas típicamente por especies gaseosas condensables (H_2O, CO_2, SO_2, H_2S, HF y HCl) y no condensables (H_2, N_2, CO, CH_4, Ar, Rn y He, entre otros), cenizas de silicatos, vapores metálicos volátiles y aerosoles de sulfato formado por la conversión de gas a partículas del SO_2 (Torres, 2020). No obstante, entre los gases de origen magmático destaca el radón-222 (^{222}Rn). La exposición inhalatoria a este isótopo radiactivo, en cierto grado de origen natural (ICRP, 2014), se considera el segundo factor de riesgo del cáncer de pulmón y el primero en personas no fumadoras (WHO, 2009; ICRP, 2014).

Prevención de riesgos laborales en un entorno volcánico

El ordenamiento jurídico español es prolífico en materia de protección de la población trabajadora frente a los riesgos asociados a la actividad laboral que pudieran afectarle (Tabla 1), estableciendo como herramienta clave para la gestión de la prevención en las organizaciones, la evaluación de riesgos laborales.

En todo momento, la actividad realizada por el personal científico que estuvo estudiando *in situ* la erupción del volcán de Tajogaite, estaba dentro del ámbito de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales. El entorno volcánico y sus condiciones suponen la mayor parte del riesgo potencial,

especialmente durante las fases iniciales de la erupción. A partir de ese momento, las evaluaciones de riesgo de los trabajos realizados en la zona de exclusión, supusieron un desafío adicional ante la especificidad del escenario y los gravísimos riesgos que potencialmente podían afectar al personal de campo. En base a cada riesgo se establecieron evaluaciones específicas sobre cada uno de ellos según transcurría la erupción.

Tabla 1. Normativa básica vigente relacionada con las materias de Prevención de Riesgos Laborales que se tuvo en cuenta durante la erupción del volcán de Tajogaite en La Palma.

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro.
- Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo. Y posteriores actualizaciones.
- Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.
- Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.
- Decreto 112/2018, de 30 de julio, por el que se aprueba el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA).

Resultados de las exposiciones y medidas adoptadas

En general, el trabajo científico de campo tiene unos riesgos inherentes relacionados con accidentes, enfermedades profesionales, o lesiones de tipo ergonómico (músculo-esquelético, sobreesfuerzos y/o fatiga física). Sin embargo, no se está preparado para asumir psicológicamente, en un primer momento, el nivel de destrucción causado por una erupción volcánica, lo que puede hacer mella y causar angustia. Por tanto, es necesario incluir, en este tipo de trabajos, los riesgos de índole psicosocial.

Específicamente, ante la necesidad e importancia de disponer de lecturas en tiempo real de las concentraciones de gases emitidos por el volcán, se dispuso de detectores personales de gases (*Industrial Scientific*, modelo *IBRID MX6*) equipado con sensores de O_2, SO_2, H_2S, HCl y CO. Además, se recomendó el uso de equipos de protección respiratoria filtrantes (Fig. 4) cuando la concentración de gases tóxicos superara el 10% de sus respectivos valores límite ambientales (0,05 ppm para SO_2, 0,5 ppm para H_2S y 2,0 ppm para CO). Cuando se activaba alguna alarma en los detectores, el equipo de protección respiratoria que se utilizó fue del tipo media máscara (norma UNE-EN140:1999) con los filtros de gases (*A1B1E1K1 Hg P3 R D* o *A1B1E1K1 P3 R + formaldehído*, norma UNE-EN 14387:2021).

Fig. 4. Uso de equipos de protección respiratoria (EPR) personales utilizados como medida de protección de riesgos laborales durante el proceso eruptivo del volcán de Tajogaite.

Los equipos de protección individual también incluyeron: mascarilla (tipo FFP2) frente a partículas, casco de seguridad con barboquejo (norma UNE–EN 397:2012+A1:2012), gafas de seguridad de montura integral (norma UNE-EN 166:2002), chalecos de alta visibilidad (norma UNE-EN ISO 20471:2013/A1:2017) y guantes de seguridad frente a riesgo mecánico (norma UNE EN 388:2016+A1:2018).

En conclusión, se considera que si bien durante todo el proceso eruptivo se tuvieron en cuenta todas las medidas de seguridad y de prevención de riesgos laborales que marca la normativa legal vigente en esta materia, existe la necesidad de profundizar en el conocimiento sobre la posibilidad de que las exposiciones crónicas puedan desencadenar el desarrollo de enfermedades cardiorrespiratorias potencialmente mortales, así como acerca de los efectos crónicos sobre la salud que pueden ser el resultado de exposiciones agudas derivadas de un proceso volcánico (Stewart *et al.*, 2022).

Igualmente, serían necesarios controles estrictos de vigilancia de la salud, en el contexto de la especialidad preventiva de Medicina del Trabajo, para minimizar los efectos de la exposición del personal interviniente en la gestión, control y seguimiento de una erupción volcánica. Las interacciones entre las erupciones volcánicas, la atmósfera y el clima, son una importante línea de investigación con respecto a los impactos en la salud, dado que las condiciones ambientales influyen en la dispersión y permanencia en la atmósfera de las especies químicas emitidas, así como la «removilización» de cenizas en climas áridos, y en especial ventosos, que pueden prolongar su exposición a la población (Stewart *et al.*, 2022).

La información y directrices sobre temas de salud elaborados por *International Volcanic Health Hazard Network* (IVHHN) para la ciudadanía general, la comunidad científica, y las agencias y organismos gubernamentales, pueden servir de referencia a los gestores de riesgos al objeto de facilitar la toma de decisiones informadas sobre las intervenciones sanitarias durante o poco después de una erupción volcánica (Mueller *et al.*, 2020).

El destino de la biodiversidad

La erupción se originó en una zona conocida por Hoya de Tajogaite, en el flanco oeste de la dorsal de Cumbre Vieja, a una altitud aproximada de 900 m s.n.m. Por lo tanto, comenzó en una zona dominada por un pinar canario parcialmente modificado por el desarrollo de cierta actividad agro-ganadera. En su discurrir hacia cotas menores de altitud, las coladas volcánicas atravesaron áreas características de un matorral termófilo altamente modificado por la acción antrópica, con la presencia de áreas habitadas, zonas

industriales y comerciales, carreteras y cultivos. Finalmente, al llegar al mar, cubrió amplias zonas de matorral xérico, cuyas reminiscencias estaban acantonadas en los acantilados naturales que no habían sido ocupados por cultivos o cubiertos por las coladas de las erupciones históricas previas como las del San Juan y El Charco.

El primer objetivo que se planteó fue el de establecer un método de trabajo que permitiese caracterizar biológicamente las zonas que se podrían ver afectadas por la erupción. Además, el método que se seleccionase debería tener en cuenta la heterogeneidad de los ecosistemas, con características biológicas y fisionómicas completamente diferentes, por lo que las medidas que se tomasen tendrían que ser comparables entre sí. La precaria situación en la que se encontraban las zonas de trabajo como consecuencia de la emisión de ingentes cantidades de lava, piroclastos y gases, solo permitía permanecer en ellas el tiempo mínimo necesario para realizar su seguimiento de manera segura. Se pudieron establecer, inicialmente, un total de 32 parcelas alrededor de la erupción: desde el cráter, bordeando las coladas lávicas, hasta el nivel del mar. El número de parcelas en cada hábitat fue proporcional a la superficie que cada uno de ellos presentaba en esa zona (ver Nogales *et al*., 2023). En estas parcelas se inventariaron y cuantificaron todas las especies de la flora y fauna, incluyendo plantas con flores, invertebrados, saurios, aves y murciélagos.

Flora y vegetación

Con el fin de llegar a un compromiso entre el tiempo de estancia en cada lugar seleccionado y su adecuada caracterización, el estudio de la vegetación se realizó en cuadrículas de 30 x 30 metros. Este tipo de muestreo en cuadrículas es uno de los más utilizados para la estimación de poblaciones y comunidades vegetales (Kent & Coker, 1992; Krebs, 1998) ya que el tamaño de cuadrícula permite incluir la mayor variabilidad en la fisonomía de la vegetación. Se realizó un inventario de las especies vegetales presentes, se contabilizó el número de ejemplares de cada una de ellas, así como de su cobertura (en porcentaje) en la parcela, además de su estado vegetativo y de conservación (Fig. 5).

Del total del área cubierta por esta erupción, el 13% coincidió con áreas de pinar, el 67% de matorral termófilo y el 20% de matorral xérico (Nogales *et al*., 2022). El ecosistema a mayor altitud se correspondía con un pinar canario con codesos de monte (*Loto hillebrandii-Pinetum canariensis* subas. *adenocarpetosum foliolosi*) y comunidades y complejos de vegetación rupícola (del Arco *et al*., 2006). Las especies más comunes detectadas durante la erupción fueron: el pino canario (*Pinus canariensis*), el corazoncillo (*Lotus campylocladus*), el poleo de monte (*Bystropogon origanifolius*), el amagante (*Cistus symphytifolius*), el codeso (*Adenocarpus*

foliolosus) y el tagasaste (*Chamaecytisus proliferus*); éste último también plantado como forraje para el ganado. Además, había cultivos como almendros (*Prunus dulcis*), castañeros (*Castanea sativa*), higueras (*Ficus carica*), tuneras (*Opuntia maxima*) y viñedos (*Vitis vinifera*). El abandono de estas tierras de labranza favoreció la aparición de un matorral de sustitución compuesto, principalmente, por la vinagrera (*Rumex lunaria*), la malpica (*Carlina falcata*), la tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*), la tedera (*Bituminaria bituminosa*), el verode (*Kleinia neriifolia*), la cerraja (*Sonchus hierrensis*), el romerillo (*Phagnalum umbelliforme*), o los bejeques (*Aeonium davidbramwellii, A. hierrense* y *A. arboreum*, además del rarísimo híbrido de *Aeonium* x *kunkelii*) (Medina *et al*., 2021).

Fig. 5. Toma de medidas biométricas en ejemplares de pino canario (*Pinus canariensis*) afectados por la erupción volcánica del Tajogaite en La Palma.

El pinar fue el ecosistema más afectado puesto que fue en él donde se originó el volcán, produciendo un impacto directo por efecto del calor y la emisión de lava y piroclastos. No obstante, uno de los efectos más visuales de la erupción volcánica sobre este ecosistema fue la aparición de clorosis en

los pinos (amarilleamiento de las acículas) (Fig. 6), como consecuencia de una fotosíntesis subóptima causada por las elevadas emisiones de gases, sobre todo, dióxido de azufre que, al reaccionar con la humedad de la atmósfera y el oxígeno, se dispersan como ácido sulfúrico y aerosoles ácidos (Nogales *et al*., 2022).

Fig. 6. Amarilleamiento del pinar canario en las cercanías de la zona de erupción del volcán de Tajogaite, por efecto de la clorosis provocada por la emisión de gases.

Se pudo observar un patrón espacial definido en cuanto a la afección por clorosis hacia el suroeste del cráter, debido a la dominancia de los vientos alisios procedentes del noroeste, alcanzando los 7 km de distancia (Weiser *et al*., 2022). La clorosis fue también detectada a una distancia de 2 km en dirección norte del cráter. En varias ocasiones, a lo largo de toda la erupción, se pudieron observar efectos muy localizados en el pinar causados por lluvia ácida (Nogales *et al*., 2023).

El siguiente hábitat que se vio afectado por la erupción volcánica fue el matorral termófilo, en este caso principalmente por las coladas de lava y la caída de ceniza. La vegetación natural de las zonas de medianías, que incluían formaciones de retamar blanco (*Euphorbio lamarckii-Retametum rhodorhizoidis*) y pinar térmico con sabinas (*Loto hillebrandii-Pinetum*

canariensis subas. *juniperetosum canariensis*) (del Arco *et al*., 2006), se encontraba básicamente relegada a zonas de cultivos abandonados o coladas volcánicas antiguas improductivas (Medina *et al*., 2021). Aparte de alguna de las especies de arbustos ya mencionadas en el pinar, destacaban la esparraguera (*Asparagus umbellatus*), el salado (*Schizogyne sericea*), la malvarrisco (*Lavandula canariensis*), la salvia canaria (*Salvia canariensis*), la magarza (*Argyranthemum haouarytheum*), o el jócamo (*Teucrium heterophyllum*).

El matorral costero, predominantemente formado por un tabaibal dulce (*Echio breviramis-Euphorbietum balsamiferae*) (del Arco *et al*., 2006), se encontraba muy restringido debido al desarrollo de cultivos de plataneras, por lo que estaba acantonado en los riscos y acantilados de la costa. Medina *et al*. (2021) mostraron como especies más relevantes en esta área a la retama (*Retama rhodorhizoides*), el arrebol (*Echium brevirame*), la tabaiba dulce (*Euphorbia balsamifera*), el cardón (*E. canariensis*), o el bejeque noble (*Aeonium nobile*). La llegada de las coladas de lava a estos acantilados provocó la completa desaparición de la única población de cardón de la zona.

Otro de los principales eventos de perturbación causados por las erupciones volcánicas es la emisión y caída de piroclastos (tefra), incluidas bombas, lapilli y ceniza (del Moral & Grishin, 1999). Durante la erupción del volcán de Tajogaite tuvo lugar, al menos, tres grandes eventos de producción y caída masiva de ceniza ultrafina (Nogales *et al*., 2023). El espesor alcanzó más de 2 metros a escasos metros del cráter y fue disminuyendo progresivamente llegando a apenas un centímetro a una distancia de 7 kilómetros, lo que puede producir un efecto diferencial sobre la vegetación (Grishin *et al*., 1996; del Moral & Grishin, 1999) dependiendo, también del nivel morfológico de organización de las plantas (Kent *et al*., 2001). Así, en las zonas más cercanas al cráter del volcán -unos 200 m de distancia- tanto por efecto del calor emitido por la erupción como por la acumulación de lava y piroclásticos, la vegetación no sobrevivió. En otras áreas algo más alejadas, hasta unos 4,5 kilómetros de distancia, la acumulación de cenizas produjo una reducción del volumen foliar y la rotura de ramas y árboles debido al exceso de peso, efectos observados, por ejemplo, en isla de Krakatoa (Whittaker *et al*., 1999). En zonas intermedias, las especies arbustivas, además de las arbóreas, que presentaban características de leñosidad secundaria pudieron sobrevivir (Nogales *et al*., 2022) (Fig. 7). En las zonas más alejadas al volcán, la vegetación apenas sufrió las consecuencias, más allá de una acumulación temporal de ceniza en hojas y ramas que desaparecieron por la acción del viento y la lluvia. Resultados similares fueron observados en otras erupciones volcánicas donde la acumulación de ceniza jugó un papel importante en la regeneración de la vegetación (Zobel & Antos, 1992, 1997; Tsuyuzaki, 1994; Grishin *et al*., 1996; Tsuyusaki & Hase, 2005).

Fig. 7. Las especies vegetales que presentaron características de leñosidad secundaria fueron las que presentaron un mayor índice de supervivencia como respuesta a los efectos de la acumulación de cenizas producidas por la erupción volcánica.

Por último, se hizo un seguimiento específico de algunas especies amenazadas de la flora insular como la garbancera canaria (*Cicer canariense*) o la dama palmera (*Parolinia aridanae*). Aunque el efecto de la caída de ceniza ultrafina sobre la población de garbancera canaria fue considerable, éste fue mucho menor en el caso de la dama palmera al estar mucho más alejada de la erupción; no obstante, la acción del viento y la lluvia lo eliminó por completo sin causarles mayores problemas de conservación en ambos casos (Nogales *et al*., 2023).

Invertebrados

Los primeros censos de invertebrados se realizaron a las pocas semanas de comenzar la actividad volcánica sorprendiendo, desde ese momento, su escasez en las zonas aledañas a la erupción. Inicialmente, se anotaron todas las especies observadas sobre la vegetación, el suelo y en vuelo, así como el número de ejemplares de cada una de ellas. No se pudo hacer búsquedas debajo de piedras y en el suelo debido a que los invertebrados habían desaparecido cubiertos por las coladas de lava y la caída de piroclastos. Los muestreos se realizaron en parcelas de 50 x 50 m y 30 minutos de duración en las mismas localidades en las que se caracterizó la vegetación de pinar,

matorral termófilo y matorral xérico. Posteriormente, y con la erupción más estabilizada, se pudo hacer un seguimiento más pormenorizado.

Existe una gran variedad de técnicas de muestreo en función del modo de vida de los invertebrados; sin embargo, se descartó la posibilidad de utilizar alguna de ellas debido a la lluvia de cenizas y el avance de las coladas. En cada parcela de estudio se seleccionaron pequeñas áreas con la vegetación más representativa, aplicando métodos mecánicos de captura directos y terrestres (Fig. 8). Para los organismos edáficos, como ácaros, isópodos, miriápodos y una amplia gama de insectos, se utilizó el tamizaje de suelo y hojarasca. Mientras que, para la recogida de invertebrados que viven ocultos en la vegetación, como arácnidos (ácaros, arañas, pseudoescorpiones, entre otros) e insectos (principalmente, coleópteros, lepidópteros, dípteros, himenópteros o heterópteros) se empleó el vareo con paraguas japonés considerado como el mejor sistema de colecta en estos casos. También se registraron los invertebrados divisados volando o sobre la vegetación (Barrientos, 2004).

Fig. 8. Muestreo de invertebrados en un pinar canario afectado por el volcán de Tajogaite.

En algunas localidades, desaparecidas posteriormente bajo las lavas, se tuvieron en cuenta listados de especies, obtenidos previamente a la erupción, realizados por uno de los autores (R. García Becerra).

Durante esos censos iniciales se contabilizaron, en todas las áreas de estudio, un total de 42 especies de invertebrados (Nogales *et al*., 2022, 2023), que contrastaban con los muestreos realizados antes de la erupción en parcelas destruidas por el volcán, donde el número total de especies censadas, de los mismos grupos, fue de 159. Esto representó la desaparición del 72% de las especies de invertebrados y del 97,5% de la biomasa que se conocía de esas zonas, lo que provocó el colapso de las redes tróficas y la considerable disminución en abundancia de saurios, aves y murciélagos (Nogales *et al*., 2022). De todas las especies detectadas, más de la mitad (52,2%) se correspondieron con endemismos canarios (17 de ellos endemismos insulares). Otras 69 especies se consideran nativas del archipiélago canario (Fig. 9) y solo 7 son alóctonas.

Fig. 9. Ejemplar de saltamontes (*Sphingonotus caerulans corsicus*) sobre la ceniza del volcán de Tajogaite, uno de los pocos invertebrados que pudo ser observado durante su erupción.

Los territorios destruidos por las lavas y aquellos sepultados por grandes acumulaciones de cenizas, perdieron prácticamente el 100% de su fauna invertebrada. Las altas temperaturas de insolación que adquieren las cenizas del volcán, impiden el asentamiento de nuevas poblaciones de artrópodos vinculados al suelo o a la vegetación herbácea -que representan el 27% del total. No obstante, es el momento de los xilófagos del pino, verdaderos especialistas que, debido a la muerte masiva de pinos, están teniendo la oportunidad de aumentar sus poblaciones considerablemente.

Durante la erupción del volcán de Tajogaite, se tuvo particular atención en las especies animales amenazadas que podían haberse visto afectadas. Este fue el caso, por ejemplo, del saltamontes áptero de El Remo (*Acrostira euphorbiae*). Si bien sus poblaciones no se vieron afectadas directamente por las coladas lávicas, cabía la posibilidad de que su hábitat se viese perjudicado por la caída de ceniza. Este saltamontes vive la mayor parte de su vida adulta sobre la tabaiba amarga, la cual constituye su principal fuente de alimento (García Becerra & Oromí, 1992; López *et al*., 2007). La continua caída de piroclastos y ceniza, incluso a distancias tan grandes (unos 7 km, aproximadamente), podría afectar al estado de conservación de esta especie (muchas tabaibas estaban cubiertas de ceniza y con piroclastos clavados en sus ramas) y con ello la disponibilidad de recursos tróficos. Además, las hembras de esta especie necesitan bajar al suelo para realizar su puesta. Para ello necesitan suelos con tierra fina y suelta que le permita introducir su abdomen a una profundidad de 3-4 cm donde depositar su ooteca. Si la acumulación de piroclastos fuese muy grande, las hembras tendrían muchos problemas para realizarla adecuadamente. Otro inconveniente añadido podría derivar de las dificultades de los imagos (juveniles) de atravesar esa capa de tefra una vez eclosionasen de los huevos. Sin embargo, la capa de ceniza observada en sus áreas de distribución, sólo tenía aproximadamente un centímetro de grosor, lo que no parece que fuese a constituir un grave problema para esta especie amenazada. Incluso la acumulada sobre la vegetación tampoco fue un gran problema ya que se eliminó en gran medida por acción del viento y la lluvia.

Por otro lado, al menos cinco endemismos locales -con distribución restringida en la isla- se vieron directamente influenciados por la actividad volcánica, ya que poseen pequeñas poblaciones relegadas a lugares específicos como consecuencia de la destrucción y fragmentación de sus hábitats. Estos fueron los casos de la mencionada *Acrostira euphorbiae* (ortóptero), así como los coleópteros: *Ceutorhynchus castroi*, *Metholcus abora*, *Stenidea lorenzoi* y *Attalus pardoalcaldei* (García Becerra & Medina, 2023). Aunque ninguna especie endémica o amenazada de la fauna invertebrada de La Palma se haya visto directamente afectada por la erupción del volcán de Tajogaite, ha quedado patente que un evento natural catastrófico como el de una erupción volcánica puede suponer la desaparición de especies únicas que se encuentran ya sometidas a una presión y amenaza por factores antrópicos (García Becerra & Medina, 2023).

Saurios

En La Palma están presentes, de forma natural, dos especies de saurios, el lagarto tizón (*Gallotia galloti*) y el perenquén de Delalande (*Tarentola delalandii*). Ambas se vieron gravemente afectadas por la actividad volcánica

debido, en gran parte, a su hábito de usar refugios bajo piedras que quedaron cubiertos y colmatados por las coladas de lava y la caída masiva de ceniza. Además, el agostamiento de la vegetación y la disminución de invertebrados contribuyeron a su desaparición por la falta de recursos tróficos que les permitiesen sobrevivir a las severas condiciones ambientales provocadas por esta erupción.

Ante la imposibilidad de realizar un muestreo exhaustivo de todos los saurios presentes en la zona, se planteó contabilizar únicamente a los lagartos. Solo se estimó su abundancia relativa en las distintas áreas muestreadas con el fin de poder comparar su evolución a lo largo del espacio y el tiempo (Tellería, 1986; Gibbs, 2000). Los principales métodos de censo de saurios incluyen el trampeo, captura en mano, lazos y marcaje individual (Blomberg & Shine, 1996). No obstante, debido al escaso tiempo disponible para realizar los censos, así como que el área de muestreo podía cambiar en cualquier momento por efecto del volcán se optó, como método de censo, el del transecto lineal con un recorrido de 30 m y una banda de 1 m a cada lado del observador (Fig. 10).

Fig. 10. Realización de un transecto lineal al borde de la colada de lava para el conteo de lagartos durante la erupción del volcán de Tajogaite. Ejemplo de una parcela de estudio que posteriormente desapareció cubierta por esa misma colada de lava.

Los muestreos se realizaron entre las 11:00 y las 15:00 horas, haciéndolos coincidir con las horas de más insolación y mayor actividad de

los lagartos. Se anotaron todos los individuos observados asignando un tamaño predeterminado, según su longitud hocico – cloaca (pequeños: < 7 cm; medianos: 7-10 cm; grandes: > 10 cm). Esta información era interesante para estudiar si las distintas clases de edad presentaban diferencias en cuanto a su resiliencia.

Debido a que muchos lugares de censo estuvieron cubiertos de ceniza, solo eran detectables las huellas como marcas de su presencia en la zona. Por ello, en cada estación se contabilizaron, dentro de esa misma banda de censo, el número total de huellas observadas como índice complementario de abundancia (Tellería, 1986).

La abundancia y actividad de los lagartos disminuyó considerablemente según se desarrollaba la erupción, mejorando solo su situación a una distancia de unos 2,5 km desde el cráter, donde sus efectos eran mucho menos considerables. Aun así, en algunos lugares se pudo observar cómo los ejemplares de menor tamaño fueron los que mejor sobrevivieron debido, probablemente, a sus menores requerimientos tróficos y fisiológicos, así como su mayor facilidad para encontrar refugios de menor tamaño (Nogales *et al*., 2023). Fue muy sobrecogedor observar, en muchas ocasiones, a ejemplares de ambas especies de saurios vagar en áreas completamente cubiertas de ceniza (Fig. 11), sin agua ni alimento y con una precaria condición corporal que los hicieron muy vulnerables frente a depredadores, tanto nativos como los cernícalos vulgares (*Falco tinnunculus*) o introducidos como los gatos (*Felis catus*).

Fig. 11. Ejemplar de lagarto tizón (*Gallotia galloti*) «perdido» en un mar de ceniza en una localidad cercana al volcán de Tajogaite.

Aves

Teniendo en cuenta los criterios anteriormente expuestos en relación a cómo hacer frente a un conteo de una población de animales (Tellería, 1986; Gibbs, 2000) durante una situación de extrema emergencia, se buscó un método que permitiese obtener unos índices de abundancia relativa comparables en el tiempo y en el espacio cubierto por el seguimiento que se estaba realizando. En el caso particular de las aves existe una gran variedad de tipos de muestreos dependiendo tanto del grupo de aves de que se trate como de su comportamiento (Tellería, 1986). Para este estudio, se seleccionó el censo por puntos de conteo (Índice Puntual de Abundancia – IPA), comúnmente utilizado para contabilizar aves que se encuentran distribuidas en el territorio de manera uniforme, como el caso de las aves territoriales (Gibbons *et al*., 1996). En las mismas áreas seleccionadas para caracterizar la vegetación, se llevaron a cabo estos censos registrando todas las aves vistas u oídas, en un periodo de 5 minutos (Fig. 12). Además, se marcó la distancia aproximada de las aves al observador en segmentos de 10 metros para calcular densidades relativas de cada especie. Los censos se realizaron desde la salida del sol hasta las 11:00 horas, con el fin de detectar a las aves en su periodo de mayor actividad.

Fig. 12. Observación de aves con prismáticos, método utilizado para su monitoreo mediante Índices Puntuales de Abundancia (IPA) en las zonas afectadas por el volcán de Tajogaite.

De forma general, la abundancia y actividad de las aves en todas las zonas muestreadas disminuyó considerablemente durante las dos primeras semanas de erupción, principalmente los casos de la paloma bravía (*Columba livia*), la chova piquirroja (*Pyrrhocorax pyrrhocorax*) y el canario (*Serinus canarius*) (Nogales *et al*., 2023). Sin embargo, la actividad dependió mucho del grupo de aves. Por ejemplo, las aves de mayor tamaño, como aguilillas (*Buteo buteo*), cernícalos vulgares o cuervos (*Corvus corax*), eran capaces de aproximarse bastante a la zona del cráter aprovechando las corrientes térmicas ascendentes para alzar el vuelo, aún a pesar de la gran cantidad de gases y piroclastos emitidos por el volcán.

También se pudieron ver algunas aves de pequeño tamaño como los canarios volando en grupo en zonas de pinar a menos de 400 m del volcán. Sin embargo, otra ave característica del pinar como el pinzón vulgar (*Fringilla canariensis*) desapareció de la zona prácticamente al día siguiente de iniciarse la erupción. Curiosamente, esta especie volvió a aparecer justo al día siguiente de su finalización, demostrando una gran adaptación a estos fenómenos naturales.

En zonas de medianías y costas, donde los mayores efectos del volcán eran causados por las coladas de lava y la caída de cenizas, las aves mostraron una elevada territorialidad, manteniéndose en el lugar hasta el último momento. Este fue el caso, por ejemplo, de los cernícalos vulgares o las currucas tomillera (*Curruca conspicillata*) y cabecinegra (*C. melanocephala*). Peor suerte tuvieron los pollos de pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*) que estaban a punto de abandonar sus nidos que, por lo general, ocurre entre los meses de octubre y noviembre. Algunas zonas habituales de nidificación de esta especie de ave marina se habrían visto destruidas completamente al llegar las primeras coladas al mar, cubriendo los acantilados costeros en la zona de las playas de Los Guirres y El Charcón.

La llegada al mar de las coladas provocó la muerte de muchas especies marinas como cangrejos (*Grapsus grapsus*), morenas (*Muraena augusti*), erizos (*Diadema africanum*), estrellas de mar y algas. Sus restos depositados en las playas fueron aprovechados por aves como las gaviotas patiamarillas (*Larus michahellis*) o los vuelvepiedras (*Arenaria interpres*).

Otra de las consecuencias que se pudo observar durante la erupción, en el caso de las aves, fue el cambio en su comportamiento trófico. Debido a la disminución en las poblaciones de sus presas habituales, como invertebrados o lagartos, los cernícalos vulgares modificaron su comportamiento para depredar sobre otras presas como aves o ratas. Se observaron hasta 6 intentos de captura de tórtolas de collar (*Streptopelia decaocto*), así como un evento de depredación sobre una rata (*Rattus* cf. *rattus*) (Nogales *et al*., 2023) (Fig. 13).

De las observaciones hechas a pie de volcán, se concluye que las aves grandes, con mayor capacidad de desplazamiento, fueron mucho más

resilientes que las especies pequeñas, especialmente aves paseriformes, que tuvieron que moverse fuera del área afectada por la erupción, como ocurrió con el pinzón vulgar.

Fig. 13. Ejemplar de cernícalo vulgar (*Falco tinnunculus*) depredando sobre una rata (*Rattus* cf. *rattus*), una presa poco habitual.

Mamíferos

En La Palma se han citado hasta 18 especies de mamíferos (Medina, 2018); sin embargo, la mayoría son especies introducidas como el arruí (*Ammotragus lervia*), el muflón (*Ovis orientalis*), la cabra (*Capra hircus*), la oveja (*Ovis aries*), el perro (*Canis familiaris*), el gato, el hurón (*Mustela putorius furo*), el erizo moruno (*Atelerix algirus*), la rata negra (*Rattus rattus*), la rata parda (*R. norvegicus*), el ratón (*Mus musculus domesticus*), la ardilla moruna (*Atelerix algirus*) y el conejo europeo (*Oryctolagus cuniculus*). Solo las cinco especies de murciélagos presentes en la isla (Trujillo, 1991) se consideran nativas: el murciélago de Madeira (*Pipistrellus maderensis*), el murciélago montañero (*Hypsugo savii*), el nóctulo pequeño (*Nyctalus leisleri*), el orejudo canario (*Plecotus teneriffae*) y el murciélago rabudo (*Tadarida teniotis*). Por este motivo, este grupo de mamíferos fue el

único al que se le hizo un seguimiento durante la erupción volcánica del Tajogaite.

Todas las especies de murciélagos presentes en Canarias son insectívoras. Para orientarse y cazar a sus presas en la oscuridad, los murciélagos utilizan la ecolocalización; emisión de ultrasonidos que, al rebotar sobre los elementos del entorno, generan ecos que son analizados en el cerebro del animal para la obtención de imágenes muy precisas de su alrededor. Tanto la frecuencia de emisión como la cadencia de estos ultrasonidos son características de cada especie. Por tanto, dado el carácter nocturno y silencioso de los murciélagos, que hace imposible su identificación mediante la observación, el mejor método de muestreo para detectar su presencia de manera inmediata se basa en muestreos nocturnos con aparatos detectores de ultrasonidos para la localización e identificación de las especies (Guixé & Campodrón, 2018).

Para el presente estudio se realizaron escuchas de 5 minutos, en las mismas estaciones de muestreo establecidas, utilizando un detector de ultrasonidos Petterson D230 y anotando todos los contactos en ese periodo de tiempo (Fig. 14).

Fig. 14. Uso de detectores Petterson D230 para el censo de murciélagos en áreas afectadas por el volcán de Tajogaite (La Palma, islas Canarias).

Los muestreos se iniciaron aproximadamente a unos 15 minutos tras la puesta de sol, cuando los murciélagos comienzan su actividad nocturna. Se estableció una frecuencia inicial para las escuchas de entre 40 y 47 kHz (que se corresponde con la emitida por el murciélago de Madeira), modificándose en campo en caso necesario para tratar de localizar las emisiones producidas por murciélagos en alguna frecuencia diferente. Prácticamente, la totalidad de los murciélagos detectados mediante escuchas fueron murciélagos de Madeira que, por otra parte, es la especie más abundante y con mayor área de distribución de toda Canarias.

Se observó un claro gradiente en cuanto a la abundancia de ejemplares detectados, siendo alto el número de contactos en cotas bajas, principalmente en hábitat de cultivos de plátanos con presencia de charcas y puntos de agua, donde los murciélagos encuentran abundancia de presas (mosquitos y lepidópteros) y donde pueden beber con facilidad. La abundancia y densidad de murciélagos fue disminuyendo en cada estación a medida que nos acercamos al volcán activo, donde la caída de cenizas y piroclastos aumentaba. Según las observaciones realizadas, la presencia de insectos voladores (presas potenciales para los quirópteros) igualmente disminuía en esas cotas.

En una ocasión, se localizó un ejemplar solitario de nóctulo pequeño (frecuencia 33-35 kHz) cazando cerca de la Curva de los Castañeros (subida al Refugio del Pilar) al borde del pinar. Respecto al orejudo canario, hay que estar a muy poca distancia de su ubicación para poder detectarlo, por lo que su ausencia en los muestreos puede no corresponder a una ausencia real de la especie en la zona. Durante la erupción tampoco se detectó ningún murciélago rabudo, especie de mayor tamaño con vuelo muy alto y potente. En condiciones normales, este murciélago es bastante frecuente en La Palma y fácilmente detectable porque es el único que emite en un rango de frecuencia audible para el oído humano (17 kHz). Se sospecha que durante estos meses los ejemplares de esta especie debieron desplazarse a otras zonas con mejores condiciones para alimentarse.

El viento intenso resultó ser también un factor determinante para la actividad nocturna de los murciélagos. Se encontró que en lugares expuestos a vientos fuertes la presencia de quirópteros fue nula, aunque se localizó algún ejemplar en puntos cercanos que se encontraban más protegidos de estos vientos.

Evolución de la biodiversidad y conclusiones

La metodología empleada para monitorear la biodiversidad a lo largo de la erupción volcánica permitió tener una idea muy aproximada sobre cómo

los distintos ecosistemas y los grupos de plantas y animales, que en ellos se desarrollan, se vieron afectados, así como para comprobar cómo sus poblaciones fueron cambiando y adaptándose a las nuevas condiciones ambientales de su entorno (Nogales *et al*., 2022, 2023). Algunos de los resultados más interesantes de este seguimiento estuvieron relacionados con la adaptación de los pinos canarios al volcanismo, la prevalencia de la leñosidad secundaria en plantas con flores o la plasticidad trófica en vertebrados, procesos evolutivos que tienen lugar en islas oceánicas y que previamente habían sido poco asociadas a los procesos volcánicos (Nogales *et al*., 2022).

Los puntos de control tuvieron que ir siendo modificados paulatinamente según se iban destruyendo como consecuencia de la llegada de las coladas de lava; algo más del 70% de los puntos inicialmente establecidos desaparecieron. Los nuevos puntos de seguimiento se intentaron localizar en zonas lo más próximas a las anteriores, lo que también supuso, en algunos casos, su posterior pérdida. Finalmente, a lo largo de todo el proceso eruptivo, se caracterizaron un total de 42 parcelas. A pesar de estas dificultades, se considera que estos muestreos sistemáticos en condiciones de extrema dificultad durante un evento catastrófico como una erupción volcánica, han sido los adecuados y han permitido reflejar fielmente el destino que la biodiversidad ha sufrido a lo largo de todo el proceso (ver Nogales *et al*., 2022, 2023). Además, los puntos que no se vieron afectados directamente, permitirán llevar a cabo un seguimiento temporal de su evolución, una vez finalizada la erupción, tal y como se ha realizado en otras manifestaciones volcánicas (ver, por ejemplo, Zobel & Antos, 1997; Whittaker *et al*., 1999; Tsuyuzaki & Hase, 2005; Yeloff *et al*., 2007).

En líneas generales, el impacto causado por el volcán de Tajogaite ha sido dramático en los primeros 300 m alrededor del cráter provocando la muerte de prácticamente toda la vegetación presente en la zona (Fig. 15).

Los pinos canarios han demostrado una adaptación impresionante a los fenómenos volcánicos, probablemente debido a sus características biológicas, como poseer una corteza gruesa de unos 8 cm que le proporciona protección ante las altas temperaturas, el presentar células en el parénquima axial que proporciona una elevada capacidad de rebrote (Fig. 16), además de producir conos serótinos adaptados igualmente a liberar sus semillas en condiciones de elevada temperatura ambiental (Nogales *et al*., 2022).

Aunque durante las primeras semanas se observó el rebrote en los pinos debido a las reservas energéticas de las células del parénquima axial, finalmente, los daños a nivel radicular han debido ser fatales provocando la muerte de los ejemplares situados a esa mínima distancia del cráter. La fauna ha ido ocupando algunas áreas, sobre todo, las aves y algunos invertebrados xilófagos que se alimentan de restos vegetales muertos o en descomposición.

Fig. 15. Efecto diferencial de la erupción volcánica del Tajogaite en función de la distancia al cráter. En primer término, se observa la devastación total de la vegetación mientras que, a partir de los 300 m, aproximadamente, el pinar canario se ha ido recuperando paulatinamente.

El impacto continúa siendo bastante severo hasta los 2,5 km de distancia, donde la ceniza cubre buena parte del terreno. Las especies de menor porte fueron completamente enterradas y solo sobrevivieron aquellas especies que mostraron leñosidad secundaria, característica que ha sido planteada como una nueva hipótesis sobre una posible respuesta a las condiciones extremas causadas por las erupciones volcánicas en islas oceánicas (Nogales *et al*., 2022). En lo que respecta a los animales presentes en la zona, los lagartos siguen siendo escasos en el pinar, aunque en las zonas de los matorrales termófilos y costeros empezaron a recuperarse.

A distancias mayores de ese punto de inflexión de los 2,5 km, todos los ecosistemas se encuentran en buen estado de conservación. El nivel de acumulación de cenizas no ha sido suficiente para cubrir la vegetación herbácea y, debido a las abundantes lluvias que han tenido lugar a lo largo de este primer año después de la erupción, la vegetación se ha recuperado considerablemente. Esto ha supuesto el aumento de la abundancia de invertebrados y, por ende, la de aves y lagartos que se alimentan de ellos.

Fig. 16. Rebrote en el pino canario (*Pinus canariensis*) efecto de las reservas energéticas de las células del parénquima axial de esta especie perfectamente adaptada a los procesos volcánicos en islas oceánicas.

En conclusión, el efecto de la erupción volcánica y la perturbación que provoca en los ecosistemas naturales ha sido gradual, disminuyendo a medida que aumenta la distancia al punto de emisión, sobre todo debido a la disminución del espesor de cenizas, de los gases emitidos y de los efectos directos del flujo de las lavas (Zobel & Antos, 1997; del Moral & Grishin, 1999; Tsuyuzaki & Hase, 2007). Debido a este mismo efecto de la disminución de los impactos del volcán con la distancia, la recuperación de la biodiversidad ha seguido un patrón similar, aumentando a medida que aumenta la distancia al cráter (Fig. 17).

Una vez finalizado el seguimiento sistemático durante una temporada anual completa de los ecosistemas y las comunidades de las especies que lo conforman, queda por analizar los datos que permitan describir adecuadamente la capacidad de resiliencia de la biodiversidad insular frente a las erupciones volcánicas en islas oceánicas.

Fig. 17. Interior del cráter del volcán de Tajogaite una vez finalizada la erupción el 13 de diciembre de 2021.

AGRADECIMIENTOS.- Los autores están muy agradecidos a todas aquellas personas que colaboraron tanto durante los momentos más complicados de la erupción volcánica como en los posteriores trabajos de seguimiento. Especial mención a todo el personal de la Consejería de Medio Ambiente del Cabildo de La Palma, de la empresa pública Gesplan y del Instituto de Productos Naturales y Agrobiología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPNA-CSIC). A Thomas Boulesteix, Noemie Taquet y Robin Campion, volcanólogos que nos acompañaron en los primeros estadios de la erupción, señalándonos los riesgos y peligros a los que nos enfrentábamos y aconsejándonos sobre cómo actuar. Nieves Zurita y Manuel Arechavaleta colaboraron en los primeros muestreos de invertebrados. A Carl Beierkuhnlein, Anke Jentsch y Frank Weiser por sus comentarios relativos a las especies de flora presentes en la zona de influencia del volcán de Tajogaite previo a la erupción. José Carlos Miranda y Víctor Chano nos aportaron interesantes comentarios sobre el estado del pinar para comprender su afección y posterior recuperación. José Gabriel Barreto y Thomas Haack, de Ticom Soluciones, S.L., por ceder amablemente las imágenes de dron que ilustran parte de este artículo. El Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico del Gobierno de España y el Gobierno de Canarias han aportado los fondos necesarios para poder llevar a cabo parte de los seguimientos de la biodiversidad. Queremos hacer una mención especial para todos los habitantes de La Palma que se vieron afectados directa o indirectamente por este evento natural catastrófico y que han sabido sobreponerse a estos momentos tan difíciles. Finalmente, recordar con todo nuestro cariño y

admiración a nuestro querido amigo y compañero Aurelio Acevedo Rodríguez quien nos acompañó en algunos de los seguimientos que específicamente le hicimos a las poblaciones de las especies amenazadas que podían verse afectadas por la erupción.

Bibliografía

AFONSO-CARRILLO, J. (Ed.) (2023). *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

BARRIENTOS, J.A. (Ed.) (2004). *Curso Práctico de Entomología*. Manuals de la Universitat Autònoma de Barcelona. 41. Entomologia. Asociación Española de Entomología, CIBIO-Centro Iberoamericano de Biodiversidad & Universitat Autònoma de Barcelona.

BLEYHL, G. (2022). *Lava steinzeit. Edad de lava*. Konkursbuch Verlag Claudia Gehrke. Tübingen, Germany.

BLOMBERG, S. & R. SHINE (1996). Reptiles, pp: 218-226. En: Sutherland, W.J. (Ed.). *Ecological Census Techniques. A handbook*. Cambridge Univesity Press. Cambridge.

CARRACEDO, J.C. (2008). *Los volcanes de las islas Canarias, IV. La Palma, La Gomera y El Hierro*. Editorial Rueda. Madrid.

CARRACEDO, J.C., V.R. TROLL, J.M.D. DAY, H. GEIGER, M. AULINAS, V. SOLER, F.M. DEEGAN, F.J. PÉREZ-TORRADO, G. GISBERT, E. GAZEL, A. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ & H. ALBERT (2022). The 2021 eruption of the Cumbre Vieja volcanic ridge on La Palma, Canary Islands. *Geology Today* 38: 94-107.

CIVICO, R., T. RICCI, P. SCARLATO, J. TADDEUCCI, D. ANDRONICO, E. DEL BELLO, L. D´AURIA, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2022). High-resolution digital Surface modelo f the 2021 eruption deposit of Cumbre Vieja volcano, La Palma, Spain. *Scientific Data* 9: 435.

DE LUCA, C., E. VALERIO, F. GIUDICEPIETRO, G. MACEDONIO, F. CASU & R. LANARI (2022). Pre- and Co-eruptive analysis of the September 2021 eruption at Cumbre Vieja volcano (La Palma, Canary Islands) through DInSAR measurements and analytical modeling. *Geophysical Research Letters* 49: e2021GL097293.

DEL ARCO, M. (Dir.) (2006). *Mapa de Vegetación de Canarias*. GRAFCAN Ediciones. Santa Cruz de Tenerife.

DEL MORAL, R., & S.Y. GRISHIN (1999). Volcanic disturbance and ecosystem recovery, pp: 137-160. En: Walker, L.R. (Ed.). *Ecosystems of Disturbed Ground*. Elsevier Science. Amsterdam.

FERNÁNDEZ, J., J. ESCAYO, Z. HU, A.G. CAMACHO, S.V, SAMSONOV, J.F. PRIETO, K.F. TIAMPO, M. PALANO, J.J. MALLORQUÍ & E. ANCOCHEA (2021). Detection of volcanic unrest onset in La Palma, Canary Islands, evolution and implications. *Scientific Reports* 11: 2540.

FREY, R.P. (2022). *Erupción volcánica La Palma*. BoD – Books on Demand. Germany.

GARCÍA BECERRA, R. & P. OROMÍ (1992). *Acrostira euphorbiae* sp. n. de Pamphagidae (Orthoptera) de La Palma (Islas Canarias). *Revista Española de Entomología* 68: 121-128.

GARCÍA BECERRA, R. & F.M. MEDINA (2023). El aviso del volcán de Tajogaite. *Cosmológica* 3: 31-42.

GARCÍA HERNÁNDEZ, A.M. (2021). Refugiados en tierra propia. A propósito de la situación de "duelo social" ocasionado por el volcán de la Cumbre Vieja en La Palma. *Revista Ene de Enfermería* 15(3). http://ene-enfermeria.org (consultado el 2 de febrero de 2023).

GIBBS, J.P. (2000). Monitoring populations, pp.: 213-252. En: Boitani, L. & T.K. Fuller (Eds.). *Research Techniques in Animal Ecology. Controversies and Consequences*. Columbia University Press. New York.

GIBBONS, D.W., D. HILL & W.J. SUTHERLAND (1996). Birds, pp: 227-259. En: Sutherland, W.J. (Ed.). *Ecological Census Techniques. A handbook*. Cambridge University Press. Cambridge.

GONZÁLEZ, L.R. (2022). *Diario de un volcán. Tagebuch eines Vulkans*. Konkursbuch Verlag Claudia Gehrke. Tübingen, Germany.

GONZÁLEZ, P.J. (2022) Volcano-tectonic control of Cumbre Vieja. *Science*. doi: 10.1126/science.abn5148.

GRISHIN, S.Y., R. DEL MORAL, P.V. KRESTOV & V.P. VERKHOLAT (1996). Succession following the catastrophic eruption of Ksudach volcano (Kamchatka, 1907). *Vegetatio* 127: 129-153.

GUIXÉ, D. & J. CAMPRODON (2018). *Manual de conservación y seguimiento de los quirópteros forestales*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid.

HORWELL, C., P. BAXTER & R. KAMANYIRE (2015). Health impacts of volcanic eruptions, pp. 289-294. En: Loughlin, S., S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins & C. Vye-Brown (Eds.). *Global Volcanic Hazards and Risk* Cambridge University Press. Cambridge.

ICRP (International Commission on Radiological Protection) (2014). Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3). https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20126.

ILOVE THE WORLD (Ed.) (2022). *Las otras historias del volcán*. Gráficas Sabater. Santa Cruz de Tenerife.

JARABO LORENZO, A.M. (Coord.) (2022). Voces del volcán. 2º Bachillerato de Ciencias, Promoción 2020-2022, IES El Paso.

KENT, M. & P. COKER (1992). *Vegetation description and analysis. A practical approach*. John Wiley & Sons. Chichester. England.

KENT, M., N.W. OWEN, P. DALE, R.M. NEWHAM & T.M. GILES (2001). Studies of vegetation burial: a focus for biogeography and biogeomorphology? *Progress in Physical Geography* 25: 455-482.

KREBS, C.J. (1998). *Ecological methodology*. Addison-Wesley-Longman Inc. Menlo Park, California.

LÓPEZ, H., M. NOGALES, E. MORALES & P. OROMÍ (2007). Habitat use and phenology of the large insular endemic grasshopper *Acrostira euphorbiae* (Orthoptera: Pamphagidae). *Bulletin of Entomological Research* 97: 117-127.

MARTÍ MOLIST, J. (2011). *Los volcanes*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas & Catarata. Madrid.

MARTÍN-RAYA, N., J. DÍAZ-PACHECO, A. LÓPEZ-DÍEZ, P. DORTA, A. CABRERA. (2023). A lava flow simulation experience oriented to disaster risk reduction, early warning systems and response during the 2021 volcanic eruption in Cumbre Vieja, La Palma. *Natural Hazards*. https://doi.org/10.1007/s11069-023-05989-w.

MEDINA, F.M. (2018). Fauna vertebrada en la isla de La Palma: estado de conservación y gestión, pp. 165-193. En: Afonso-Carrillo (Ed.). *La Palma: agua, tierra, fuego y cielo*. Actas XIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

MEDINA, F.M., A. ACEVEDO-RODRÍGUEZ & M. NOGALES (2021). Notas preliminares sobre la afección del volcán a la flora y vegetación de La Palma (octubre 2021). *Conservación Vegetal* 25: 54-55.

MUELLER, W., H. COWIE, C.J. HORWELL, F. HURLEY & P.J. BAXTER (2020). Health impact assessment of volcanic ash inhalation: A comparison with outdoor air pollution methods. *GeoHealth* 4: e2020GH000256. https://doi.org/10.1029/2020GH000256.

NAVE, E. & L. FERRERO (2022). *Las cuatro estaciones del volcán Tajogaite en ochenta y cinco vistas*. Ediciones Remotas & La Fábrica.

NOGALES, M. & F.M. MEDINA (2021). Nuestra experiencia como biólogos en plena erupción de un volcán (La Palma, 2021). *Revista Hipótesis* 10: https://www.ull.es/portal/cienciaull/revistahipotesis/numeros/numero-10/.

NOGALES, M. & F.M. MEDINA (2022). Disaster Ecology: Our experience as biologists in the middle of a volcanic eruption (La Palma, Canary Islands, 2021). *Functional Ecologist* 18 Feb 2022. https://functionalecologists.com/2022/02/18/disaster-ecology-our-experience-as-biologists-in-the-middle-of-a-volcanic-eruption-la-palma-canary-islands-2021/.

NOGALES, M., M. GUERRERO-CAMPOS, T. BOULESTEIX, N. TAQUET, C. BEIERKUHNLEIN, R. CAMPION, S. FAJARDO, N. ZURITA, M. ARECHAVALETA, R. GARCÍA, F. WEISER & F.M. MEDINA (2022). The fate of terrestrial biodiversity during an oceanic island volcanic eruption. *Scientific Reports* 12: 19344.

NOGALES, M., M. GUERRERO-CAMPOS, T. BOULESTEIX, N. TAQUET & F.M. MEDINA (2023). La biodiversidad durante una erupción volcánica: cuaderno de bitácora en el volcán de Tajogaite (La Palma). *El Indiferente* 24: 42-65.

PADRÓN, E., N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G.V. MELIÁN, M. ALONSO, F. RODRÍGUEZ, M. ASENCIO-RAMOS & L. D´AURIA (2022). Early precursory changes in the 3He/4He ratio prior to the 2021 Tajogaite eruption at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Geophysical Research Letters* 49: e2022GL099992.

PADRÓN, E., N.M. PÉREZ, F. RODRÍGUEZ, G. MELIÁN, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G. PADILLA, J. BARRANCOS, S. DIONIS, K. NOTSU & D. CALVO (2015).

Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology* 77: 28.

PALANCO, S., R. PÉREZ-LÓPEZ, I. GALINDO-JIMÉNEZ, A. BERNAL, S. ARANDA, M.C. LÓPEZ-ESCALANTE, D. LEINEN, J.F. MEDIATO, J. LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J.R. RAMOS-BARRADO (2022). Field deployment of a man-portable stand-off laser-induced breakdown spectrometer: A preliminary report on the expedition to the Cumbre Vieja volcano (La Palma, Spain, 2021). *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 190: 106391.

PÉREZ, N.M., P.A. HERNÁNDEZ, G.V. MELIÁN, E. PADRÓN, M. ASENCIO-RAMOS, J. BARRANCOS, G.D. PADILLA, F. RODRÍGUEZ, L. D´AURIA, C. AMONTE, M. ALONSO, A. MARTÍN-LORENZO, D. CALVO, C. RODRÍGUEZ, W. HERNÁNDEZ, B. COLWELL, M.J. PANKHURST & THE INTERNATIONAL COLLABORATIVE RESEARCH TEAM (2022). The 2021 Cumbre Vieja eruption: an overview of the geochemical monitoring program. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-12491, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12491.

PEVOLCA (2021). Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias. https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma/pevolca.

PEVOLCA (2022a). Informe del Comité Científico de 4 de enero de 2022. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/wp-content/uploads/2022/01/040122-INFORME-Comit%C3%A9-Cient%C3%ADfico-PDF.pdf. [Consulta: 24/04/2023].

PEVOLCA (2022b) Informe del Comité Científico de 18 de enero de 2022. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/wp-content/uploads/2022/01/180122-INFORME-Comit%C3%A9-Cient%C3%ADfico-PDF.pdf [Consulta: 24/04/2023].

PLANK, S., A.V. SHEVCHENKO, P. ´ANGELO, V. GSTAIGER, P.J. GONZÁLEZ, S. CESCA, S. MARTINIS & T.R. WALTER (2023). Combining thermal, tri-stereo optical and bi-static InSAR satellite imagery for lava volume estimates: the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma. *Scientific Reports* 13: 2057.

RIZZO, A.L., A. SANDOVAL-VELASQUEZ, F. CASSETA, T. NTAFLOS, A. AIUPPA, M. ALONSO, E. PADRÓN, M. PANKHURST & N.M. PÉREZ (2022). First insights into the noble gas signatura of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma (Canary Islands). EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-12170, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12170.

ROMÁN, A., A. TOVAR-SÁNCHEZ, D. ROQUE-ATIENZA, I.E. HUERTAS, I. CABALLERO, E. FRAILE-NUEZ & G. NAVARRO (2022). Unmanned aerial vehicles (UAVs) as a tool for hazard assessment: The 2021 eruption of Cumbre Vieja volcano, La Palma Island (Spain). *Science of Total Environment* 843: 157092.

ROMERO, J.E., M. BURTON, F. CÁCERES, J. TADDEUCCI, R. CIVICO, T. RICCI, M.J. PANKHURST, P.A. HERNÁNDEZ, C. BONADONNA, E.W. LLEWELLIN, M. PISTOLESI, M. POLACCI, C. SOLANA, L. D´AURIA, F. ARZILLI, D. ANDRONICO, F. RODRÍGUEZ, M. ASENCIO-RAMOS, A. MARTÍN-LORENZO, C. HAYER, P. SCARLATO & N.M. PÉREZ (2022). The initial pase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice

growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 431: 107642.

SICARD, M., C. CÓRDOBA-JABONERO, A. BARRETO, E.J. WELTON, C. GIL-DÍAZ, C.V. CARVAJAL-PÉREZ, A. COMERÓN, O. GARCÍA, R. GARCÍA, M-A. LÓPEZ-CAYUELA, C. MUÑOZ-PORCAR, N. PRATS, R. RAMOS, A RODRÍGUEZ-GÓMEZ, C. TOLEDANO & C. TORRES (2022). Volcanic eruption of Cumbre Vieja, La Palma, Spain: A first insight to the particulate matter injected in the troposphere. *Remote Sensing* 14: 2470.

STEWART, C., D.E. DAMBY, C.J. HORWELL, T. ELIAS, E. ILYINSKAYA, I. TOMASEK, B.M. LONGO, A. SCHMIDT, H.K. CARLSEN, E. MASON, P.J. BAXTER, S. CRONIN, & C. WITHAM (2022). Volcanic air pollution and human health: recent advances and future directions. *Bulletin of Volcanology* 84: 11. https://doi.org/10.1007/s00445-021-01513-9.

TELLERÍA, J.L. (1986). *Manual para el censo de los vertebrados terrestres*. Editorial Raíces. Madrid.

TOMAŠEK, I., D.E. DAMBY, D. ANDRONICO, P.J. BAXTER, I. BOONEN, P. CLAEYS, M.S. DENISON, C.J. HORWELL, M. KERVYN, U. KUEPPERS, M.N. ROMANIAS & M. ELSKENS. (2021). Assessing the biological reactivity of organic compounds on volcanic ash: implications for human health hazard. Bulletin of Volcanology 83: 30. https://doi.org/10.1007/s00445-021-01453-4.

TORRES GONZÁLEZ, P. A. (2020). *Caracterización de la emisión gaseosa en el subsuelo de las Islas Canarias a través de las infraestructuras de captación de aguas subterráneas. Aplicación a la vigilancia volcánica.* [Tesis Doctoral] Univ. La Laguna. 229 pp.

TRUJILLO, D. (1991). *Murciélagos de las islas Canarias*. Colección Técnica del ICONA. Madrid.

TSUYUZAKI, S. (1989). Analysis of revegetation dynamics on the volcano Usu, Northern Japan, deforested by 1977-1978 eruptions. *American Journal of Botany* 76: 1468-1477.

TSUYUZAKI, S. (1994). Fate of plants from buried seeds on Volcano Usu, Japan, after the 1977-1978 eruptions. *American Journal of Botany* 81: 395-399.

TSUYUZAKI, S. & A. HASE (2005). Plant community dynamics on the Volcano Mount Koma, Northern Japan, after the 1996 eruption. *Folia Geobotanica* 40: 319-330.

WALTER, T.R., E.U. ZORN, P.J. GONZÁLEZ, E SANSOSTI, V. MUÑOZ, A.V. SHEVCHENKO, S.M. PLANK, D. REALE & N. RICHTER (2023). Late complex tensile fracturing interacts with topography at Cumbre Vieja, La Palma. *Volcanica* 6: 1–17.

WEISER, F., E. BAUMANN, A. JENTSCH, F.M. MEDINA, M. LU, M. NOGALES & C. BEIERKUHNLEIN (2022). Impact of volcanic sulfur emissions on the pine forest of La Palma, Spain. Forest 13: 299. https://doi.org/10.3390/f13020299.

WHITTAKER, R.J., T. PARTOMIHARDJO & S.H. JONES (1999). Interesting times on Krakatau: stand dynamics in the 1990´s. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 354: 1857-1867.

WHO (World Health Organization) (2009). *Hand book on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673 [Consulta: 23/04/2023].

WHO (World Health Organization) (2013a). *Health risks of air pollution in Europe-HRAPIE project recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. World Health Organization Regional Office for Europe. World Health Organization. Geneva, Switzerland. https://apps.who.int/iris/handle/10665/153692 [Consulta: 23/04/2023].

WHO (World Health Organization) (2013b). *Review of evidence on health aspects of air pollution–REVIHAAP project*.: World Health Organization. Copenhagen, Denmark. https://apps.who.int/iris/handle/10665/153692 [Consulta: 23/04/2023].

YELOFF, D., D. MAUQUOY, K. BARBER, S. WAY, B. VAN GEEL & C.S.M. TURNEY (2007). Volcanic ash deposition and long-term vegetation change on Subantarctic Marion Island. *Artic, Antarctic and Alpine Research* 39: 500-511.

ZOBEL, D.B. & J.A. ANTOS (1992). Survival of plants buried for eight growing seasons by volcanic tephra. *Ecology* 73: 698-701.

ZOBEL, D.B. & J.A. ANTOS (1997). A decade of recovery of understory vegetation buried by volcanic tephra from Mount St. Helens. *Ecological Monograph* 67: 317-344.