



Ciencia para
las Políticas
Públicas

El riesgo volcánico

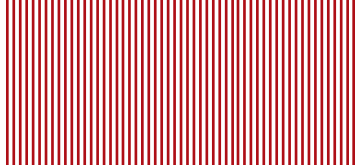
Coordinado por:

Xavier Bolós · Stéphanie Barde-Cabusson · Adelina Geyer · Nieves Sánchez
Inés Galindo · Eugenio Fraile-Nuez · Juan Tomás Vázquez



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional [CC BY 4.0].
Más información sobre esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> (correo: publ@csic.es)



**Departamento
de Comunicación**

Gabinete de Presidencia
CSIC, Calle Serrano 117
28006 Madrid
Email: comunicacion@csic.es

NIPO: 155-24-150-2

e-NIPO: 155-24-151-8

Depósito Legal: M-14712-2024

Edición no venal

**En el marco de la Conexión
Geociencias, coordinado por:**

Xavier Bolós
Stéphanie Barde-Cabusson
Adelina Geyer
Nieves Sánchez
Inés Galindo
Eugenio Fraile-Nuez
Juan Tomás Vázquez

**Coordinadores de la colección
Ciencia para las Políticas
Públicas:**

Jorge Hernández-Moreno
Cindy Matos Ramos

Edición:

Marta García Gonzalo

Fotógrafos:

Xavier Bolós
Stéphanie Barde-Cabusson
Adelina Geyer
Nieves Sánchez
Inés Galindo
Eugenio Fraile-Nuez
Juan Tomás Vázquez

Ilustraciones:

Irene Cuesta
Xavier Bolós
Stéphanie Barde-Cabusson
Adelina Geyer

Diseño y maquetación:

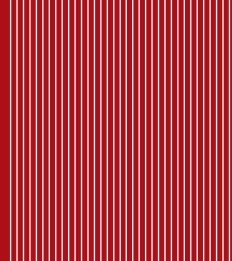
David Pamplona Roche

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.



Esta obra está bajo una Licencia Creative
Commons Atribución 4.0 Internacional.



El CSIC tiene entre sus funciones la de informar, asistir y asesorar en materia de ciencia y tecnología a entidades públicas y privadas, según recoge el artículo 5 de su Estatuto.

Enmarcado en esta función, el CSIC presenta el informe *El riesgo volcánico* de la colección Ciencia para las Políticas Públicas. Este informe se dirige a entidades públicas y privadas, así como al conjunto de la sociedad. Explora conceptos clave del riesgo volcánico, analiza sus impactos y proporciona un marco integral para el estudio y la gestión efectiva de los riesgos volcánicos bajo las líneas de investigación del CSIC, permitiendo una preparación anticipada, una respuesta coordinada y una recuperación sostenible frente a las erupciones volcánicas. Este informe busca proporcionar conocimientos esenciales para la toma de decisiones informadas, apoyar el desarrollo científico en líneas relevantes por parte de las autoridades, y para el beneficio de la sociedad en general.

ÍNDICE

uno

|||||

¿Qué es el riesgo volcánico?

- 1.1. Erupciones volcánicas, ¿por qué ocurren y dónde suceden?
- 1.2. Los peligros volcánicos: un fenómeno natural
- 1.3. Viviendo entre volcanes: el factor humano en el riesgo

dos

|||||

Reduciendo el riesgo de convivir con los volcanes

- 2.1. Anticiparse a la próxima erupción: La investigación como clave para reducir el riesgo volcánico
- 2.2. Las señales precursoras como preludio de una crisis volcánica: investigación, pronóstico, preparación y acción
- 2.3. Actuaciones durante una erupción: asesoramiento científico para los decisores públicos y comunicación a la sociedad
- 2.4. Investigación y gestión poserupción

tres

|||||

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

|||||

Listado de centros

cinco

|||||

Para saber más



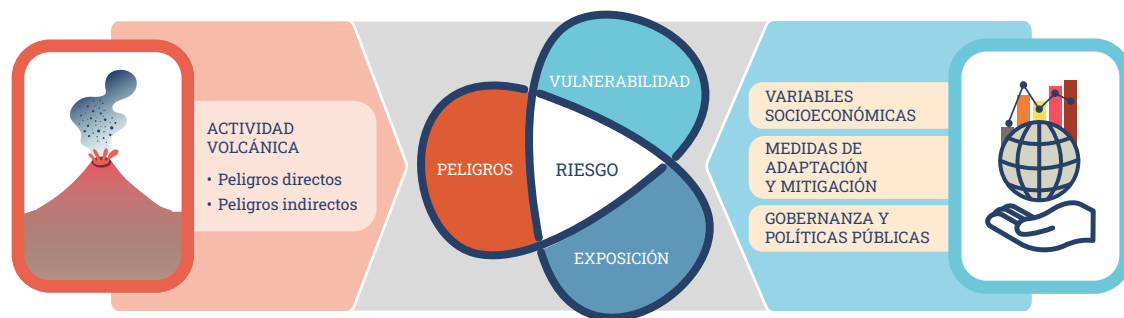
uno



¿Qué es el riesgo volcánico?

El riesgo volcánico se define como la posibilidad de que ocurran consecuencias adversas para la vida, la propiedad, las infraestructuras y el medioambiente debido a la actividad volcánica. Así, cuando nos referimos al riesgo volcánico, se debe considerar tanto la peligrosidad del fenómeno natural, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento volcánico, como la vulnerabilidad de la sociedad y del ecosistema ante esta amenaza y su exposición a ella, incluyendo la susceptibilidad al daño, su impacto económico y la capacidad para hacerle frente y adaptarse.

Gráfico 1 Diagrama de Venn del riesgo volcánico



[*] Diagrama modificado del 5.º Informe (AR5) del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

En la actualidad, más de 800 millones de personas alrededor del mundo viven en las proximidades de volcanes activos y pueden verse directamente afectadas por erupciones volcánicas. La mitigación del impacto de futuros peligros volcánicos requiere de un pronóstico y un sistema de alerta temprana adecuados para una erupción inminente, lo cual, a su vez, exige una comprensión detallada de los procesos geológicos que controlan la actividad volcánica. En este informe, revisamos y analizamos dichos peligros volcánicos, su evaluación y la gestión del riesgo asociado a largo y a corto plazo, así como durante una crisis volcánica.

11.

Erupciones volcánicas, ¿por qué ocurren y dónde suceden?

UN volcán es una estructura geológica formada por la salida de magma a la superficie terrestre. El magma, compuesto de roca fundida, fragmentos de roca sólida, minerales y gases disueltos, escapa a través de la corteza de la Tierra por un conducto volcánico, creando habitualmente un cráter. Este proceso, conocido como *erupción volcánica*, puede dar lugar a una gran variedad de morfologías geológicas, tales como conos de ceniza, anillos de tefra (roca volcánica), estratovolcanes, calderas de colapso, domos o campos de lava.



Erupción fisural en el volcán Piton de la Fournaise (Francia). / STÉPHANIE BARDE-CABUSSON

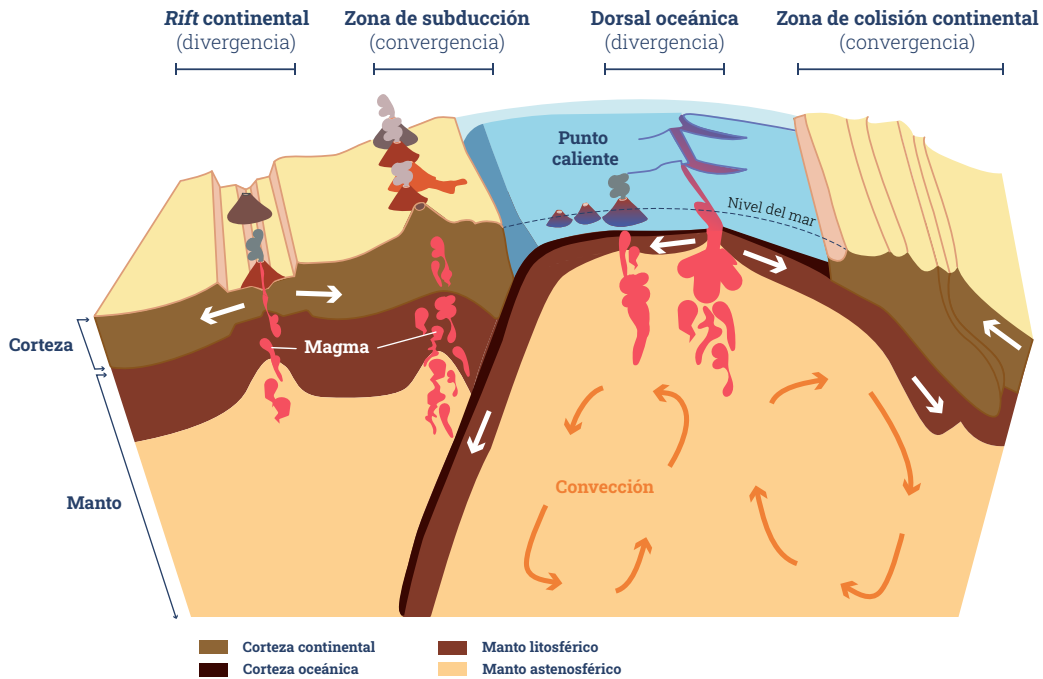
Las erupciones volcánicas son el resultado de una serie de procesos geológicos que involucran la generación, el ascenso y la emisión de magma a la superficie. Así, el magma se forma en el interior de la Tierra, allí donde las condiciones de presión y temperatura son las adecuadas para fundir las rocas del manto y, en algunos casos, de la corteza terrestre. Al ser menos denso que la roca sólida circundante, el magma consigue ascender hacia la superficie a través de fracturas y fallas (fracturas acompañadas



Ejemplo de una erupción central en el volcán Mount Bromo (Indonesia). / XAVIER BOLÓS

de desplazamiento) en la corteza terrestre. De esta forma, aunque en la escala de tiempo geológico e incluso en la escala humana, las erupciones volcánicas pueden parecer eventos relativamente breves, que van desde algunos días a años, en realidad, son el resultado de procesos geológicos que se extienden a lo largo de cientos de miles o incluso millones de años. Los volcanes son parte integral de la evolución de la Tierra y han tenido, tienen y tendrán impactos significativos en el paisaje, los ecosistemas y las sociedades humanas.

Gráfico 2 Los volcanes y la tectónica de placas



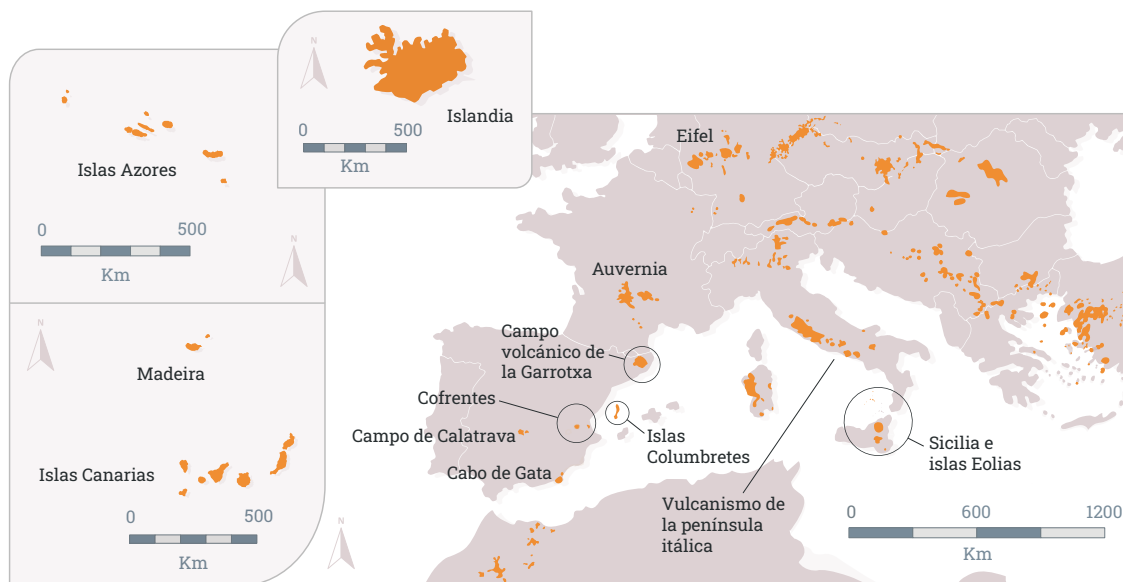
La distribución global del volcanismo en el planeta no es aleatoria, sino que está directamente relacionada con la dinámica global. Los volcanes activos se encuentran allí donde las condiciones de presión, temperatura o cambios en la química del manto terrestre favorecen la fusión de este y la formación de magma. Esto ocurre principalmente en dos contextos tectónicos: bordes convergentes o divergentes de placa. Es decir, allí donde el movimiento de las placas tectónicas hace que estas choquen y se hundan unas bajo las otras (zonas de subducción), o se separen entre sí (en las dorsales y zonas de *rift*). Sobre todo, la actividad volcánica se concentra en los márgenes de las cuencas oceánicas, en particular en el cinturón que rodea el Pacífico, la dorsal

atlántica y el *rift* de África. Por último, un modesto porcentaje del volcanismo del planeta se localiza en el interior de las placas tectónicas (zonas intraplaca), como en las islas Hawái o en Yellowstone, en Estados Unidos, donde se produce una intensa actividad volcánica. Aunque todavía están en discusión científica los procesos que dan lugar a este tipo de volcanismo, uno de los más aceptados es el del punto caliente.

Entre las diversas zonas volcánicas activas de Europa cabe destacar Islandia, con intensa actividad volcánica debida a su ubicación sobre la dorsal centro-atlántica y un punto caliente. En Italia y Grecia, el volcanismo se desarrolla principalmente a lo largo de zonas de subducción, donde se encuentran algunos de los volcanes más famosos (y destructivos) de Europa, siendo el Etna, en Sicilia, uno de los más activos del mundo. En las islas Azores (Portugal), localizadas en un punto triple, donde el *rift* de Terceira conecta con la dorsal centro-atlántica, existen también numerosas muestras de actividad volcánica en los últimos siglos. Finalmente, las zonas volcánicas de Auvernia (Francia) y Eifel (Alemania), consideradas activas, están asociadas al sistema del *rift* cenozoico europeo, que se extiende por más de mil kilómetros desde la costa del mar del Norte hasta el Mediterráneo, generando también volcanismo en la península ibérica.

En España, las islas Canarias, concretamente Tenerife, Lanzarote, El Hierro y La Palma, han estado afectadas por actividad volcánica interplaca desde el inicio del periodo histórico (finales del siglo XVI), esto es, desde que existen crónicas escritas tras la conquista de las islas. Muchas de las erupciones acontecidas en el archipiélago, como la de Timanfaya (Lanzarote, 1730-1736), la del volcán submarino Tagoro (El Hierro, 2011-2012) o la del Tajogaite (La Palma, 2021) produjeron importantes pérdidas económicas y un gran impacto social. Por lo que respecta a la España peninsular, el volcanismo más reciente (de hace menos de 15 000 años) se localiza en el campo volcánico de la Garrotxa (Cataluña) y en el Campo de Calatrava (Castilla-La Mancha), ambos asociados al *rift* cenozoico europeo.

Gráfico 3 Mapa de la distribución del volcanismo geológicamente reciente (Neógeno-Cuaternario) en Europa y zona mediterránea (MODIFICADO DE BERGER AND BODEN, 1994)



Aun tratándose de un volcanismo de mayor antigüedad, aunque geológicamente reciente, es interesante remarcar las islas Columbretes (Castellón), el volcán Cofrentes (Valencia) y la franja del sureste peninsular, entre el cabo de Gata (Almería) y el Mar Menor, además de la isla de Alborán. Es relevante señalar también que España tiene las bases antárticas Gabriel de Castilla y Juan Carlos I, localizadas respectivamente dentro, y a menos de 35 kilómetros, del volcán activo de la isla Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida). Durante el verano austral, ambas bases acogen numerosos proyectos de investigación y personal científico, técnico y logístico proveniente de instituciones españolas y de otros países.

La contraposición entre la escala del tiempo geológico y la percepción humana del tiempo resalta la enorme diferencia temporal entre los largos procesos geológicos, y la brevedad de la vida humana y el avance de la civilización. Este contraste subraya el

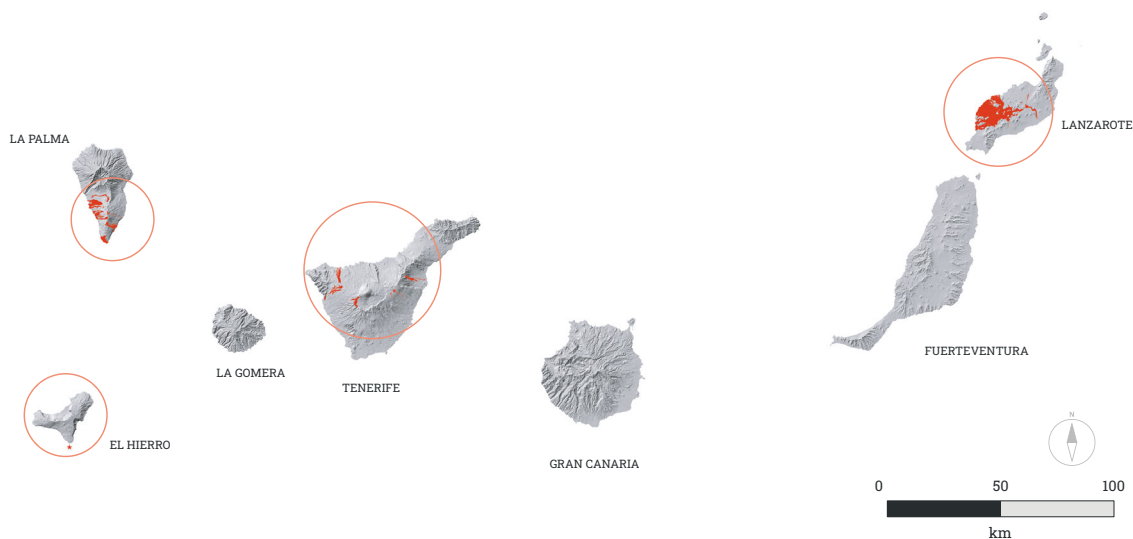
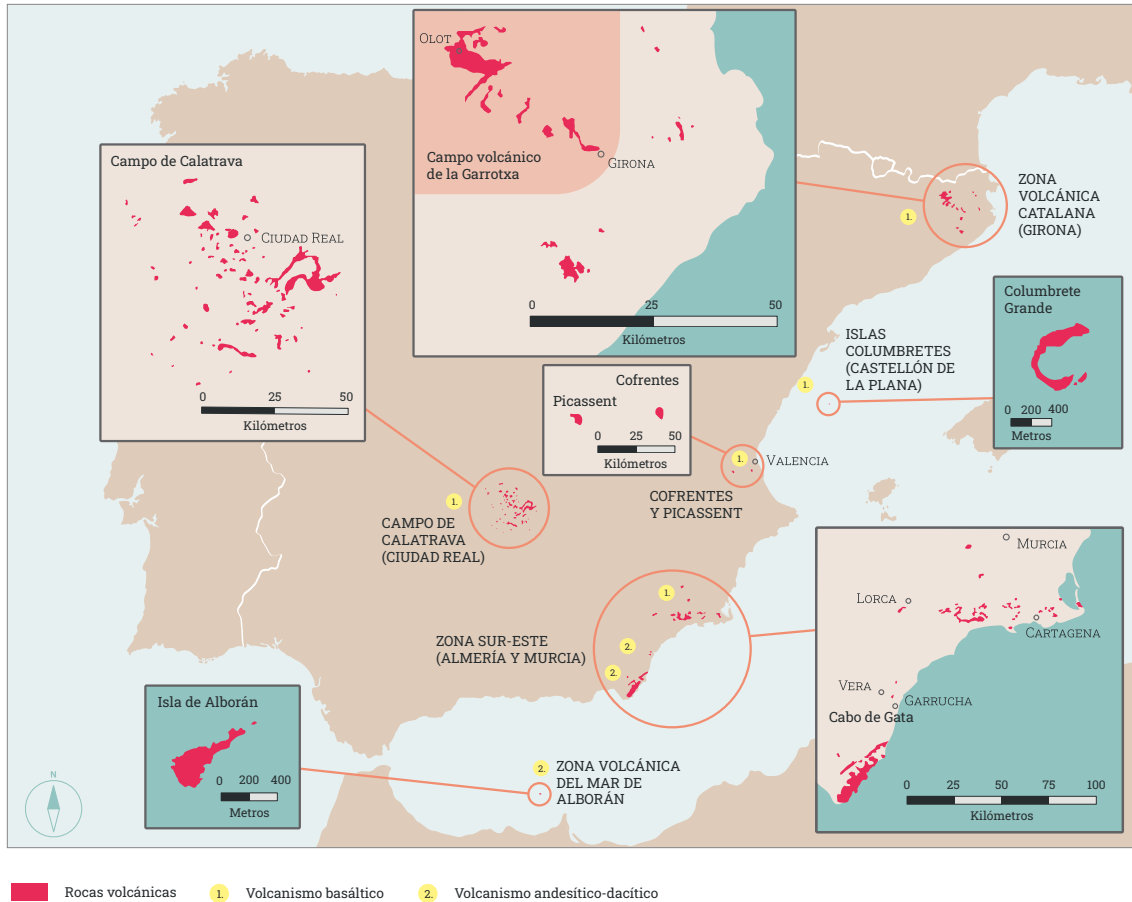
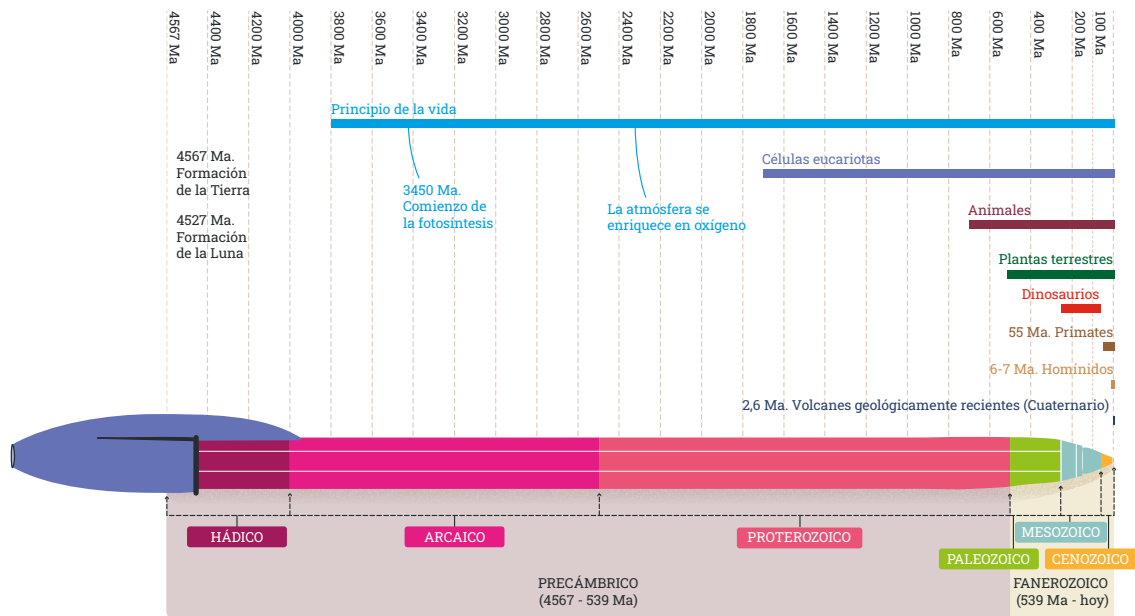


Gráfico 5 Áreas volcánicas geológicamente recientes (Neógeno-Cuaternario) en la península ibérica



En volcanología, las preguntas más cruciales y, a su vez, más desafiantes, giran en torno a determinar cuándo, dónde y cómo ocurrirá una nueva erupción, ya que van a condicionar los riesgos asociados y las estrategias para su estudio y gestión. En este contexto, resulta esencial diferenciar entre dos grandes tipos de volcanismo: el poligenético y el monogenético. Los volcanes poligenéticos pueden experimentar múltiples erupciones durante

Gráfico 6 Escala de los tiempos geológicos simplificada en un bolígrafo



miles e incluso millones de años (por ejemplo, el Teide, en Tenerife; el Vesubio y el Etna, en Italia; y el Monte Santa Helena, en EE. UU.), concentrando su actividad alrededor de un único edificio volcánico principal de grandes dimensiones (con kilómetros de altura). Este tipo de volcanismo suele ir asociado a importantes volúmenes de magma almacenados a pocos kilómetros bajo la superficie, por lo que la magnitud de las erupciones puede llegar a ser colosal. Por el contrario, en el volcanismo monogenético, cada erupción produce un nuevo edificio volcánico. A diferencia de los poligenéticos, una vez finalizada la erupción, los volcanes monogenéticos no vuelven a reactivarse, lo que conlleva que sean estructuras de mucho menor tamaño, alcanzando únicamente unos pocos cientos de metros de altura (por ejemplo, los volcanes Croscat, en Cataluña; Chinyero, en Tenerife; y Parícutín, en México). Otra característica del volcanismo monogenético es



El Teide, un volcán poligenético.
/ NIEVES SÁNCHEZ

que da como resultado una agrupación de numerosos volcanes, formando campos volcánicos con decenas o cientos de edificios volcánicos que pueden abarcar extensas áreas geográficas de 100 hasta 50 000 km². Ejemplos de ello son los campos volcánicos de la Garrotxa, con 600 km²; Calatrava, con 5000 km²; o Michoacán-Guanajuato, en México, con más de 40 000 km². Esto conlleva que, a pesar del menor tamaño y potencial impacto de las erupciones monogenéticas, la incertidumbre en torno a la localización de futuras erupciones represente un reto para la evaluación de la peligrosidad volcánica.

Durante una erupción, ya sea de un volcán de tipo poligenético o monogenético, se pueden dar fases de actividad más explosivas, dispersando material volcánico e inyectando gases en la atmósfera u océano, o efusivas, emitiendo coladas de lava. La ocurrencia de cada una de estas fases está principalmente condicionada por la composición química del magma, su contenido en gases y su tasa de emisión. Al abrirse el conducto volcánico se produce una descompresión del magma, provocando que los gases



El campo volcánico de la Garrotxa, con decenas de volcanes monogenéticos.

/ XAVIER BOLÓS

volcánicos, hasta el momento disueltos en el líquido debido a la presión, se expandan formando burbujas. La explosión de estas burbujas de gas fragmenta el magma en mayor o menor medida, generando gotas de diversos tamaños que salen propulsadas hacia el exterior (piroclastos). Un fenómeno similar sucede cuando abrimos una botella de cava o de cerveza y el gas disuelto en el líquido se expande y genera la espuma. En algunas erupciones, esta desgasificación puede ser tranquila, con poca fragmentación del magma, que da lugar a una fase efusiva caracterizada por fuentes y coladas de lava. Cuando la desgasificación es violenta, el magma se rompe en partículas de varios tamaños que, una vez enfriadas en la atmósfera, se solidifican convirtiéndose en ceniza volcánica, *lapilli*, bloques o bombas. Durante estas fases eruptivas más energéticas, denominadas *explosivas*, se forman las columnas eruptivas y nubes de cenizas. Aunque, en una primera aproximación, las erupciones pueden categorizarse como efusivas o explosivas, existe un espectro casi continuo de erupciones mixtas, que manifiestan ambos tipos de actividad.



Fragmentación y formación de piroclastos durante la erupción del volcán Tajogaite del 2021 en La Palma. / ORIOL OMS Y XAVIER BOLÓS

El grado de explosividad de una erupción puede incrementarse también cuando el magma encuentra agua subterránea o superficial durante su ascenso (por ejemplo, lagos, aguas subterráneas, agua de mar o hielo). A este tipo de erupciones se les denomina *hidromagmáticas* o *hidrovolcánicas* y ocurren cuando el magma muy caliente (comúnmente entre 700 y 1300 grados centígrados), entra en contacto con agua a baja temperatura. Esto produce una reacción violenta capaz de generar explosiones extremadamente energéticas. Este proceso es similar al que se da cuando, al cocinar, gotas de agua caen accidentalmente en una sartén con aceite caliente. Este último, comparable al magma de una erupción, transfiere su calor al agua, que se vaporiza al instan-



Actividad efusiva del volcán
Tajogaite del 2021 en La
Palma. / XAVIER BOLÓS

te. Este vapor se expande y fragmenta el aceite, que sale a gran velocidad de la sartén, en forma de salpicaduras. En el caso del fenómeno volcánico, las gotas de aceite expulsadas serían magma. Este tipo de erupciones generan importantes nubes de vapor, con gran cantidad de ceniza volcánica, entre muchos de los otros peligros volcánicos que se detallan más adelante.

La actividad hidromagmática más explosiva ocurre normalmente cuando las erupciones suceden en lagos, en zonas glaciares debido a la interacción del magma con el agua de fusión, en el litoral con aguas poco profundas (de menos de 50 metros de profundidad) y en lugares con aguas subterráneas (acuíferos), en este último caso se denomina *actividad freatomagmática*.



Erupción hidromagmática en el volcán Poás en Costa Rica. / GEOFFROY AVARD

Por lo contrario, cuando la actividad volcánica se da en aguas marinas intermedias o profundas (con más de 200 metros de profundidad), las erupciones son en su mayoría efusivas o de baja explosividad. Siguiendo la analogía anterior, un mayor porcentaje de agua enfría rápidamente el aceite caliente, reduciendo la explosividad de la interacción, que puede llegar a ser nula. Este hecho, junto con la presión que ejerce la columna de agua, explica la baja explosividad de la actividad eruptiva submarina a gran profundidad, la cual vendrá determinada únicamente por las características propias del magma. Este tipo de erupciones son difíciles de observar, aunque en ocasiones pueden verse emisiones de globos de lava o de piedra pómez flotantes, así como manchas de coloración amarilla o verde en la superficie del mar.



Erupción submarina en El Hierro con la localidad de La Restinga al fondo. / XAVIER BOLÓS

12.

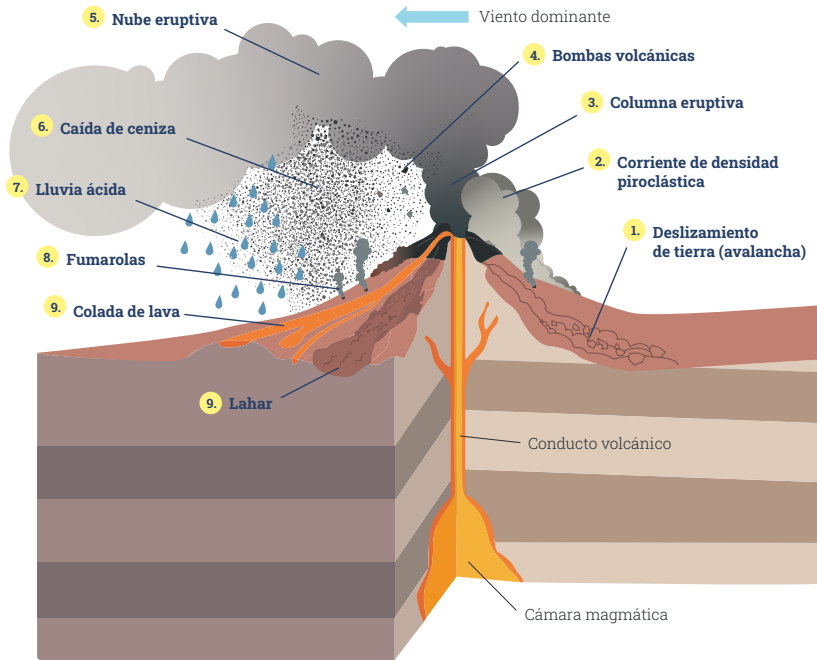
Los peligros volcánicos: un fenómeno natural

Los peligros volcánicos resultan de la actividad que sucede en el volcán o en la zona volcánica antes, durante o después de una erupción. Se pueden clasificar en directos e indirectos, y, en muchas ocasiones, transcurren de forma simultánea o desencadenarse en cascada, reflejando la complejidad y la interconexión entre los diferentes peligros asociados a la actividad volcánica.

Los peligros volcánicos directos son aquellos que derivan directamente de la actividad volcánica y primordialmente ocurren durante una erupción, aunque muchos pueden manifestarse incluso antes y después de la emisión de magma a la superficie. Por otro lado, los peligros volcánicos indirectos son consecuencias secundarias de la actividad volcánica.

Peligros directos

- Las **coladas de lava** emplazadas en ambientes subaéreos pueden ser, de forma general, de dos tipos:
 - **Aa:** Muestran una textura rugosa, se mueven lentamente y forman coladas espesas. Su temperatura suele oscilar entre 700 °C en superficie y 1000 °C en el interior.
 - **Pahoehoe:** Alcanzan los 1200 °C en todo su espesor, son lisas y fluyen de manera rápida, creando características formas de cuerdas (lavas cordadas) al enfriarse. En ambientes submarinos (por ejemplo, el fondo del océano, un lago profundo o una cavidad llena de agua dentro de un glaciar), la lava se enfría rápidamente en forma de lóbulos, dando lugar a las lavas almohadilladas.

Gráfico 7 Peligros volcánicos en tierra y mar



Lavas Pahoehoe en Piton de la Fournaise, Isla Reunión (Francia).
/ STÉPHANIE BARDE-CABUSSON

- Las **columnas eruptivas**, o columnas de ceniza, pueden elevarse a varios kilómetros de altura llegando incluso hasta la estratosfera.



Columna eruptiva del volcán Tajogaite, en La Palma, 2021. / NIEVES SÁNCHEZ

- La **nube y caída de cenizas** dispersan y acumulan material fino alrededor del volcán, en la atmósfera y en el mar.



Caída de ceniza del volcán Tajogaite, en La Palma, 2021. / ORIOL OMS Y XAVIER BOLÓS

- Las **corrientes de densidad piroclásticas** (o coladas y oleadas piroclásticas) resultan de una explosión lateral, del desplome de parte del volcán o del colapso parcial de la columna eruptiva. Consisten en flujos compuestos de una cantidad variable de gases, bloques y cenizas, que descienden las pendientes del volcán a velocidades de hasta 700 kilómetros por hora y a temperaturas de hasta 1000°C.



Corrientes de densidad piroclásticas en el volcán de Fuego de Guatemala (1 de julio 2015). / CONRED GUATEMALA. (LICENCIA CC BY-NC-ND 2.0 GENERIC)

- Los **gases**, muy presentes antes, durante y después de las erupciones, pueden liberarse a lo largo de la zona de actividad volcánica, ya sea por difusión en todo el terreno, en la nube y columna eruptiva o formando en puntos concretos fumarolas, que llegan a alcanzar los 400 °C. Los gases volcánicos consisten principalmente de vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de azufre (SO_2), con sulfuro de hidrógeno (H_2S), fluoruro de hidrógeno (HF) y monóxido de carbono (CO) en menor cantidad.



Fumarolas en Vulcano, Islas Eolias, Italia. / STÉPHANIE BARDE-CABUSSON

Peligros indirectos

- Los **lahares**, torrentes de lodo, que se crean cuando el agua proveniente de lluvias intensas o la fusión del hielo o nieve arrastra los depósitos volcánicos a su paso.



Lahar producido por el volcán de Fuego de Guatemala, 2018. / EDGAR ANTONIO BARRIOS, OBSERVADOR DE INSIVUMEH

- La **sismicidad**, generada principalmente durante el ascenso del magma, que rompe la roca a su paso en la corteza terrestre. En ocasiones, los sismos más intensos pueden ser percibidos por la población cercana al volcán.
- **Desprendimientos de roca, deslizamientos de ladera y otros movimientos del terreno** como consecuencia de la sismicidad volcánica u otros procesos que favorezcan la inestabilidad del terreno.



Desprendimiento de rocas durante la erupción del Hierro, 2011-2012. / INÉS GALINDO Y MIGUEL LLORENTE

- Los **tsunamis** de origen volcánico, que se desencadenan cuando una ladera del volcán colapsa en un cuerpo de agua o debido a la entrada de corrientes de densidad piroclásticas en el agua.

- Los **incendios** originados, por ejemplo, por las altas temperaturas de las coladas de lava o las corrientes de densidad piroclásticas.
- La **lluvia ácida** y la **contaminación** por la presencia de gases volcánicos en la atmósfera y la lixiviación de compuestos químicos de origen volcánico en el suelo y cuerpos o columna de agua (por ejemplo, acuíferos, lagos, medio marino, etc.).

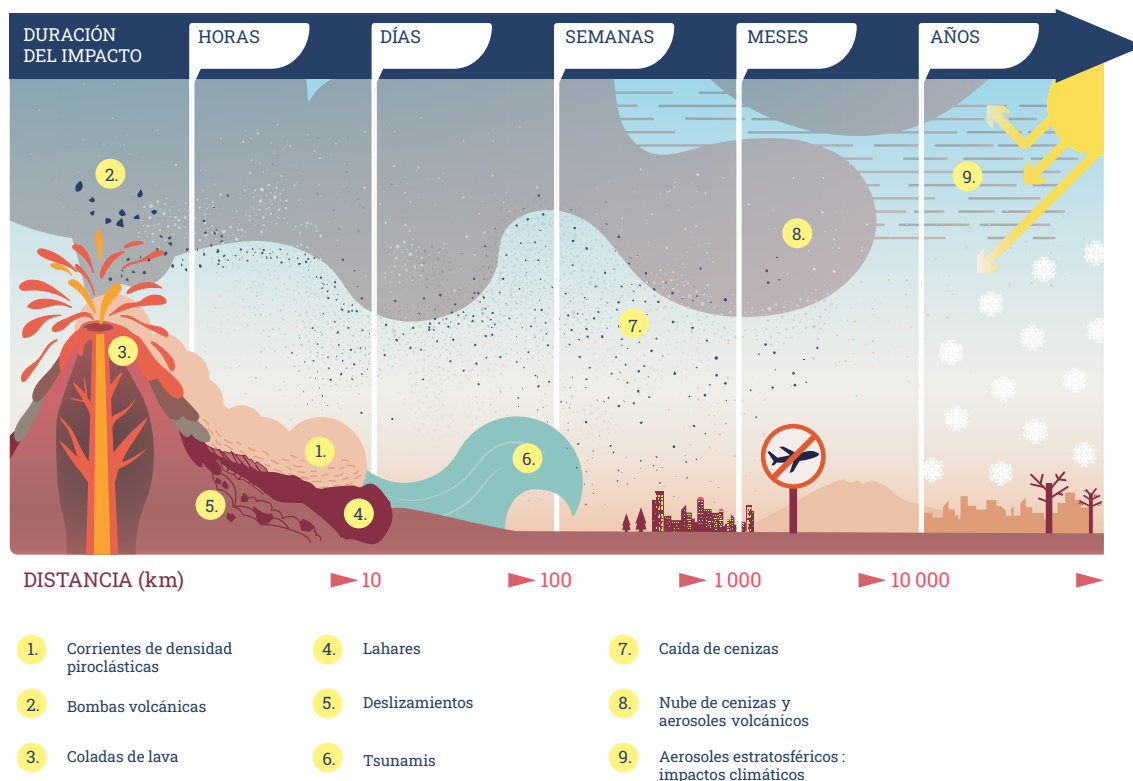


Efectos de las lluvias ácidas en la vegetación de los flancos del volcán Turrialba en Costa Rica, 2018. / XAVIER BOLÓS

Es importante destacar que los peligros volcánicos, tanto los directos como los indirectos, pueden ocurrir como consecuencia uno de otro y pueden interactuar entre sí, aumentando la magnitud, gravedad y extensión espacial de sus impactos. Por ejemplo, en 2003 el domo volcánico (protuberancia debida a la acumulación de lava viscosa) del volcán Soufrière Hills (isla Montserrat, en Antillas Menores) se desplomó como consecuencia de lluvias importantes y de la actividad sísmica del volcán, generando corrientes de densidad piroclásticas, explosiones freatomagmáticas y tsunamis.

La relación e interacción entre los diferentes peligros se define bajo el concepto de la **multipeligrosidad**, una noción adoptada por nuevas iniciativas internacionales para alcanzar los objetivos del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desas-

Gráfico 8 Duración y alcance del impacto de los peligros volcánicos



* Adaptación de imagen de *The Economist*

tres 2015-2030. La multipeligrosidad requiere un enfoque específico y transdisciplinar para evaluar los riesgos derivados que el análisis separado de cada peligro individual no permite.

Los peligros volcánicos tienen un impacto variable en términos de gravedad, duración y alcance espacial. Por ejemplo, una colada de lava puede tener consecuencias graves a nivel local, como la destrucción de infraestructuras o viviendas (por ejemplo, en el caso del volcán Tajogaite, en La Palma), pero poca o ninguna afectación global. En cambio, cuando los aerosoles volcánicos

(gases y diminutas partículas sólidas) alcanzan las capas altas de la atmósfera durante una erupción explosiva, estos pueden llegar a modificar el clima del planeta. La erupción del Pinatubo (Filipinas) de 1991, la segunda más grande del siglo xx, desencadenó, en promedio, una disminución de la temperatura del planeta en torno a 0,5 °C entre 1991 y 1993. Este, junto con muchos otros ejemplos de erupciones sucedidas durante los últimos siglos, o incluso milenios, ilustran cómo el impacto de una erupción volcánica trasciende las fronteras y los continentes, subrayando la importancia de una coordinación internacional en lo referente a los sistemas de alerta temprana y los planes de gestión del riesgo volcánico global.

En el caso de erupciones submarinas, que representan la mayoría de la actividad volcánica en la Tierra, estas no suelen representar un gran riesgo debido a que, en general, suceden en zonas profundas (a más de 600 metros). Sin embargo, sí se ha de tener en cuenta que estas erupciones y las intrusiones de magma pueden desestabilizar las laderas submarinas o causar colapsos que disparen la formación de tsunamis.

Como se discutirá en detalle en la segunda parte del informe, uno de los pilares fundamentales en la gestión del riesgo volcánico es evaluar el potencial impacto medioambiental y socioeconómico de futuras erupciones para, así, poder llevar a cabo las medidas necesarias para su mitigación. En lo que se refiere al impacto medioambiental de las erupciones volcánicas, la quema de vegetación, el cambio de acidez del suelo, la contaminación de las fuentes de agua, entre muchos otros procesos, producen grandes perturbaciones en los ecosistemas cercanos al volcán. Como ejemplo, durante erupciones submarinas, la inyección de materiales volcánicos y el calor generan importantes anomalías físico-químicas y biológicas en el medio marino, lo que conlleva la mortandad masiva de los organismos. Sin embargo, una vez finalizada la fase eruptiva y comenzada la fase de desgasificación, ese mismo volcán emitirá al medio marino grandes concentraciones de nutrientes inorgánicos, calor y gases que producirán las condiciones físicas y químicas necesarias para que el proceso de recolonización ecosistémica se produzca a una velocidad muchísimo más rápida que en condiciones normales.



Impacto de la caída de ceniza
en la erupción del volcán
Tajogaite del 2021 en La
Palma / XAVIER BOLÓS

Desde un punto de vista socioeconómico, los efectos de una erupción volcánica pueden perdurar durante años o décadas y, en algunos casos más extremos, las zonas afectadas nunca llegan a recuperar su situación socioeconómica previa. A corto plazo, antes y durante la erupción, la actividad volcánica impacta en la economía y aquellas infraestructuras cruciales durante una crisis. Las coladas de lava bloquean vías de comunicación y evacuación, mientras que la acumulación de cenizas puede hacer colapsar tejados, dejar soterrados edificios y otras estructuras, interrumpir las telecomunicaciones y perturbar el suministro eléctrico y de agua.

Con más de 70 volcanes o zonas volcánicas activas solo en Francia, Grecia, Italia, Portugal y España, la pregunta no es si habrá nuevas erupciones en Europa, sino dónde, cómo y cuándo se producirán. Es importante considerar que el riesgo asociado a

Impacto de las coladas
de lava en la erupción
del volcán Tajogaite, en
La Palma, 2021
/ INÉS GALINDO





la actividad volcánica en Europa no se limita únicamente a las áreas cercanas a los volcanes. Históricamente, algunas erupciones han desencadenado conflictos socioeconómicos y políticos en países vecinos, como la erupción del Laki (Islandia, 1783), que se cree que contribuyó a desencadenar la Revolución francesa debido a un enfriamiento global y a la escasez de alimentos que provocó. Más recientemente, la erupción hidromagmática del volcán Eyjafjallajökull (Islandia, 2010) produjo grandes nubes de ceniza que, empujadas por el viento hacia el centro y sur de Europa, generaron una amenaza para el transporte aéreo, desatando una de las mayores crisis recientes en la aviación con la cancelación de más de 100 000 vuelos y pérdidas económicas valoradas en más de 4000 millones de euros.

Durante los siglos xx y xxi, España se ha visto afectada tanto por la dispersión de cenizas y aerosoles procedentes de erupciones internacionales, como por las erupciones volcánicas acontecidas en el archipiélago canario. Durante la erupción del volcán Tajogaite (La Palma, 2021), las coladas de lava cubrieron más de 1200 hectáreas, destruyendo 1676 edificios, grandes áreas de cultivos (más de 370 hectáreas), más de 70 kilómetros de carreteras y numerosas explotaciones ganaderas, y afectaron también al ecosistema marino allí donde alcanzaron la costa. La emisión de gases y cenizas volcánicas causó problemas de calidad del aire, siendo la emisión de gases todavía un problema en algunas zonas, incluso años después de la erupción. Además, durante la erupción, la abundante presencia de cenizas en la atmósfera provocó de forma intermitente el cierre temporal del espacio aéreo durante varios días y afectó a cientos de vuelos locales, nacionales e internacionales, con los consecuentes daños económicos y personales. El balance de daños transmitido desde las autoridades nacionales al Parlamento Europeo se ha estimado en más de 1000 millones de euros. No cabe duda de que esta erupción ha tenido graves consecuencias para la economía local, pero también sociales y culturales, y ha provocado, por ejemplo, la pérdida de arraigo y de la identidad cultural en la población de las zonas más afectadas.

La erupción del volcán Tagoro (El Hierro, 2011-2012) tuvo un impacto económico mucho menor, ya que ocurrió en el mar, relativamente lejos de la costa y a la profundidad suficiente para no

Además, teniendo en cuenta la información científica actual, no se puede descartar la ocurrencia de actividad futura en algunas zonas volcánicas del territorio nacional como el campo volcánico de la Garrotxa (Cataluña), el campo volcánico de Calatrava (Castilla-La Mancha) o las islas Columbretes (Valencia). Aunque el único impacto registrado en el pasado de este volcanismo es mediante el registro geológico, una erupción hoy en cualquiera de esas zonas podría tener terribles efectos en la región y a nivel nacional. En España, además de los riesgos derivados de los volcanes dentro de su territorio, la amenaza volcánica proviene también de las erupciones explosivas de volcanes europeos y de otros países.

13.

Viviendo entre volcanes: el factor humano en el riesgo

A pesar de su potencial poder devastador, la fuerza de la naturaleza que se desata durante una erupción nunca ha dejado indiferente al ser humano. Desde la antigüedad, los volcanes se han considerado lugares de culto, el hogar de dioses y demonios, o zonas en las que se concentra una energía mística, atrayendo e inspirando a artistas y escritores. Sin embargo, las propiedades de los suelos volcánicos para el cultivo, los recursos asociados a la energía geotérmica y la concentración de materias primas (minerales y rocas) han sido principalmente útiles para la construcción de infraestructuras (bloques, áridos, cementos), la fabricación de elementos ornamentales, la joyería o la construcción de herramientas y utensilios, entre otras aplicaciones, lo que ha acercado a muchas civilizaciones a los volcanes. Además, hoy en día, el geoturismo es un valor económico fundamental en las zonas volcánicas, ya que una parte importante de la población local se dedica, directa o indirectamente, a esta actividad económica. Los beneficios medicinales de las aguas termales o lodos volcánicos y la gran belleza de los paisajes volcánicos atraen a millones de visitantes que disfrutan de los productos locales y su cultura, íntimamente ligada a su geología. Es por ello que muchos de los volcanes activos del mundo tienen algún tipo de medida de protección de su entorno natural y, en algunos casos, están reconocidos por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad o como Geoparques Mundiales por su valor natural, científico, educativo y turístico.

Actualmente, y dentro del paraguas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible definidos por las Naciones Unidas, el desarrollo tecnológico y las necesidades energéticas han fijado su objetivo en los territorios volcánicos. Por un lado, porque la actividad volcánica hidrotermal puede generar yacimientos minerales con altas concentraciones de metales estratégicos fundamentales para la producción de aparatos tecnológicos y, por otro, porque el calor que aportan las cámaras magmáticas constituye una fuente de energía inagotable (a escala humana) que puede ser explotada para obtener energía geotérmica (calor y electricidad).



La ocupación humana de los territorios volcánicos activos debido a la expansión demográfica, las actividades ligadas al geoturismo y la explotación de recursos materiales y energéticos plantean desafíos significativos en la gestión del riesgo volcánico, la planificación del desarrollo, el uso del territorio y la preparación de las emergencias venideras.

Turismo en el volcán
Stromboli, islas Eolias, Italia
/ STÉPHANIE BARDE-CABUSSON

Según las definiciones establecidas por la Oficina de Reducción de Desastres de la Naciones Unidas (UNDRR por sus siglas en inglés), se entiende por *riesgo volcánico* la potencial pérdida de vidas y activos, considerando tanto daños como destrucción total, que podría sufrir una sociedad o comunidad en un período de tiempo específico. El riesgo se determina de forma probabilística como una función del peligro, teniendo en cuenta la exposición al mismo, la vulnerabilidad a su impacto y la capacidad para superarlo.

Por una parte, la **exposición** se relaciona con la proximidad física de las comunidades y las infraestructuras a los volcanes activos, así como su grado de interacción con las áreas volcánicas, incluidas las actividades humanas como la agricultura, la urbanización y el turismo. Por otra parte, se entiende por **vulnerabilidad** aquellas condiciones, determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos o ambientales, que incrementan la susceptibilidad de un individuo, comunidad o activos a los impactos de los peligros volcánicos. Por último, el concepto de **capacidad** incluye todas las fortalezas, atributos y recursos disponibles en una organización, comunidad o sociedad que permiten gestionar y reducir el riesgo e incrementar la resiliencia.

Así, la evaluación del riesgo volcánico integra la identificación y caracterización de los potenciales peligros (incluyendo información sobre su ubicación, intensidad, frecuencia y probabilidad), el análisis de la exposición y la vulnerabilidad (considerando las dimensiones físicas, sociales, de salud, ambientales y económicas), y la evaluación de las capacidades eficaces para hacer frente a situaciones de riesgo probables y buscar posibles alternativas. Todos estos aspectos, así como las acciones que han de ser llevadas a cabo para la reducción del riesgo, se detallan en la siguiente parte del informe.



Planta Geotérmica Hellisheiði de Islandia, 2023. / XAVIER BOLÓS

dos



Reduciendo el riesgo de convivir con los volcanes



AL abordar las crisis volcánicas, es esencial reconocer un hecho fundamental: la actividad volcánica es un proceso geológico inevitable y, por lo tanto, las catástrofes no son naturales, sino que son, en gran parte, el resultado de decisiones humanas. El desafío en la gestión del riesgo volcánico radica en aprender a coexistir con los volcanes, lo que requiere de una vigilancia continua y una adaptación constante. En este sentido, cada región volcánicamente activa precisa de una estrategia de convivencia que tenga en cuenta tanto las características naturales (geológicas, medioambientales, climáticas, etc.) como el contexto socioeconómico del territorio. Esto implica la necesidad de realizar investigaciones científicas exhaustivas sobre los volcanes, con el fin de obtener una comprensión más profunda de los procesos geológicos, físicos y químicos asociados. Este conocimiento científico permite estar más preparados ante una futura erupción dado que, entre otros aspectos, se puede llevar a cabo una mejor interpretación de las señales registradas por los sistemas de vigilancia volcánica, diseñar sistemas de alerta temprana más efectivos y mejorar los pronósticos.

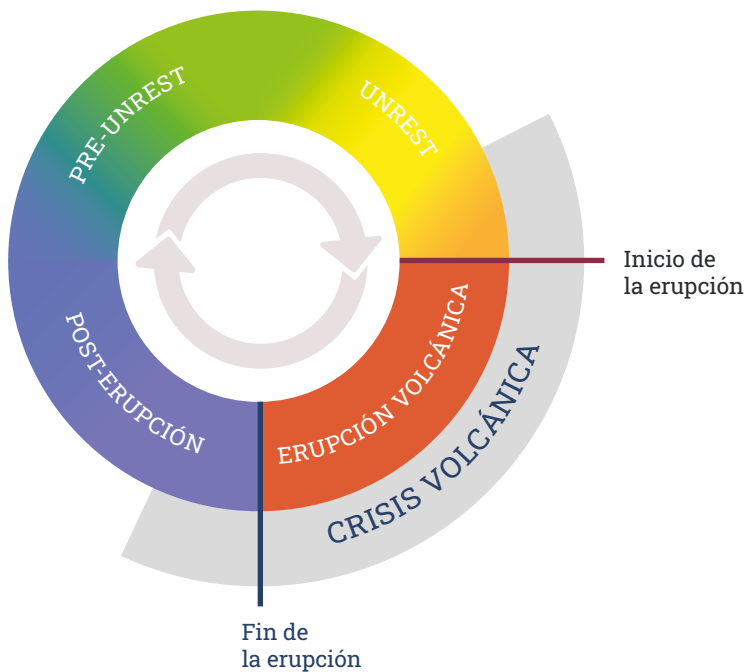
A lo largo de las últimas décadas, se han desarrollado en el seno del CSIC numerosos proyectos científicos relacionados con el volcanismo y su riesgo asociado que han marcado significativos avances en el conocimiento multi- e interdisciplinar de este fenómeno. Estas investigaciones han allanado el camino hacia la comprensión integral de los peligros y riesgos volcánicos, y los resultados obtenidos han permitido la adopción de medidas cruciales para mitigar sus impactos y adaptarse a su naturaleza, destacando la importancia de la ciencia para afrontar los desafíos que plantea la convivencia con la actividad volcánica.

En esta parte 2 del informe se proporciona un marco integral para el estudio y la gestión efectiva de los riesgos volcánicos, lo que permite una preparación anticipada, una respuesta coordinada y una recuperación sostenible frente a estos eventos naturales. Para ello, se ha adaptado el ciclo de gestión de desastres de las Naciones Unidas (*Disaster Management Cycle*) para abordar específicamente los desastres volcánicos, dividiéndolo en las siguientes etapas interconectadas:



- Preparación a largo plazo, cuando el sistema volcánico está estable y no hay signos de actividad anormal o de cambio, respecto a su comportamiento histórico típico considerado como nivel de base.
- Acciones y preparativos durante la etapa de *unrest* volcánico (la comunidad científica usa el término en inglés), traducible literalmente como una fase de *agitación* o *intranquilidad* del volcán. Se trata de un período de cambios físicos y químicos, potencialmente visibles o medibles, que indican variaciones en el estado del volcán, derivadas de todo un abanico de fenómenos que pueden suceder tanto a gran profundidad (varios kilómetros), tales como el ascenso y la acumulación de magma, como también cerca de la superficie (pocos centenares o decenas de metros), como ocurre con la actividad en el sistema hidrotermal.
- Medidas y actuaciones durante la crisis volcánica que se implementan cuando la situación de *unrest* volcánico se intensifica, aumentando las posibilidades de una erupción inminente y generando mayor preocupación en la población. Se actualizan los pronósticos de forma continuada y, si es necesario, se ponen en marcha los planes de emergencia y mitigación, se actualiza el nivel de alerta, etc.
- Respuesta a la crisis volcánica y a la erupción. En esta etapa se activan los planes de emergencia y se implementan medidas para proteger vidas y propiedades. Se lleva a cabo la evacuación de áreas en riesgo, se brinda asistencia humanitaria a las comunidades afectadas, se coordina la respuesta entre diferentes agencias y organizaciones y se informa de los datos científicos a las autoridades y a la población.
- Recuperación tras finalizar la erupción y preparación para el siguiente evento. Una vez que la erupción ha cesado comienza la fase de recuperación, que incluye la evaluación de daños y necesidades, la planificación territorial del espacio afectado, la reconstrucción de infraestructuras dañadas, la rehabilitación de comunidades afectadas y la implementación de medidas de mitigación para reducir la vulnerabilidad ante futuras erupciones.

Gráfico 9 Ciclo de gestión del riesgo volcánico



*Adaptación del ciclo de gestión del riesgo de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR)

Este ciclo implica la coordinación entre gobiernos, instituciones públicas y privadas, personal científico y técnico, organizaciones humanitarias, comunidades locales, medios de comunicación y otros actores para asegurar una gestión efectiva del riesgo volcánico y promover y fortalecer la resiliencia frente a estos eventos naturales. En cada etapa de este ciclo, el CSIC tiene un papel fundamental en el desarrollo y liderazgo de aquellas líneas de investigación que incluyen, entre muchas otras, comprender y dilucidar los fenómenos que desencadenan el inicio de una fase de *unrest*, evaluar la peligrosidad volcánica a corto y largo plazo, analizar los productos emitidos durante la erupción y su impacto en el medioambiente, etc.

21.

Anticiparse a la próxima erupción: La investigación como clave para reducir el riesgo volcánico

UNA preparación efectiva para futuras crisis volcánicas, ya sea para hacer frente a peligros directos o indirectos, requiere de un análisis exhaustivo de la actividad volcánica pasada y su impacto, así como de una evaluación, en términos de tipología, localización y tamaño, de las potenciales futuras erupciones. Comprender los procesos que han sucedido anteriormente en una zona volcánica es crucial para entender cómo evoluciona el sistema volcánico y lo que detonó la actividad eruptiva pasada, además de servir de guía para abordar y gestionar los eventos futuros. El CSIC, con personal experto en una amplia gama de especialidades aplicadas en ambientes terrestres, marinos y atmosféricos, contribuye día a día a avanzar en estos conocimientos.

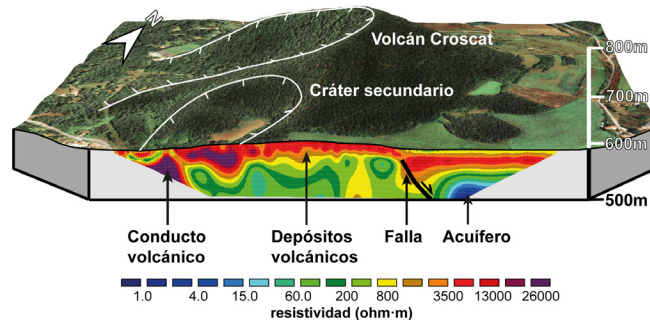
Estas actividades de investigación deben desarrollarse preferiblemente durante los períodos de tranquilidad, cuando hay suficiente tiempo para la recopilación e interpretación de datos por parte de todas aquellas disciplinas relevantes en el campo de la volcanología. Gran parte de estas investigaciones empiezan mediante el trabajo geológico de campo, con observaciones *in situ* de los depósitos volcánicos, la recogida de muestras de rocas, aguas y gases o la medición de parámetros físicos y químicos. El estudio de los depósitos volcánicos da acceso a cientos, miles o incluso millones de años de historia eruptiva, y completa la información procedente de documentos históricos recogida durante las erupciones más modernas (cuando tal documentación existe). Esto proporciona información sobre los fenómenos volcánicos involucrados durante todo el proceso eruptivo y permite reconstruir las diferentes fases que tuvo la erupción. Además, con la identificación y caracterización de los depósitos de una erupción, es posible elaborar mapas de isopacas e isopletras, que describen el espesor de los depósitos y el tamaño de sus productos a diferentes distancias del volcán, así como su distribución espacial. De esta manera, se puede determinar la magnitud y el alcance de las erupciones, permitiendo, por ejemplo, calcular el volumen total de material emitido y la altura de la columna eruptiva.



Trabajo de campo en depósitos volcánicos.
/ JOSÉ LUIS MACÍAS

Adicionalmente, en el caso de que aún se conserven, se deben describir con detalle aspectos geomorfológicos, como la forma de los edificios volcánicos, sus dimensiones, la pendiente de sus flancos, la profundidad y el tamaño del cráter. Estos datos son de relevancia para determinar aspectos clave sobre la erupción que los originó. Gracias al conjunto de estos estudios, se puede llegar a explicar si hubo interacción del magma con cuerpos de agua (hidromagmatismo), el volumen de magma disponible, el nivel de explosividad de la erupción, etc. Además, es necesario hacer un análisis detallado sobre la presencia de las fracturas, fallas y anteriores intrusiones magmáticas (ya solidificadas, como los diques) y determinar su relación con la actividad volcánica. Toda información relacionada con su orientación, longitud o dimensiones, entre muchos otros parámetros, es de interés para entender los caminos que pudo (o podrá) seguir el magma en su ascenso a la superficie, identificar zonas con mayor probabilidad de albergar una erupción en el futuro, etc.

El personal investigador del CSIC tiene amplia experiencia en el desarrollo del trabajo de campo, incluyendo la aplicación de técnicas de sensores remotos instalados en tierra, mar (como boyas o instrumentos anclados al fondo marino), aire (drones) o satélites. Además, cuenta con un vasto conocimiento en diferentes técnicas geofísicas, que permiten, entre otras muchas aplicaciones, detectar actividad sísmica, deformaciones del terreno o variaciones en parámetros físicos (por ejemplo, la densidad y la conductividad eléctrica). Todo ello con el fin de obtener una imagen, o reconstrucción, de la estructura interna del sistema volcánico, o detectar la migración del magma u otros fluidos en el subsuelo. El conocimiento del sistema de alimentación magmática de las estructuras volcánicas y de la circulación de fluidos en los edificios volcánicos es fundamental para estudiar su evolución y también los peligros asociados a las zonas activas.



Modelo de geofísica en el volcán monogenético del Croscat, campo volcánico de la Garrotxa. (MODIFICADO DE BOLÓS ET AL., 2014)

El trabajo de investigación sigue en el laboratorio, intentando desvelar uno de los secretos mejor guardados de los volcanes: el origen del magma y su tiempo de residencia, es decir, los años que ha permanecido en el interior de la Tierra hasta su erupción en superficie. Ambos temas de estudio requieren de laboratorios especializados en petrología, geoquímica y geocronología, donde el personal del CSIC analiza las muestras de roca recogidas y determina la edad del volcán, la composición original del magma, cómo y a qué profundidad se formó, cuánto tiempo permaneció en la cámara magmática y, en algunos casos, el proceso que desencadenó la erupción (por ejemplo, mezcla de magmas).

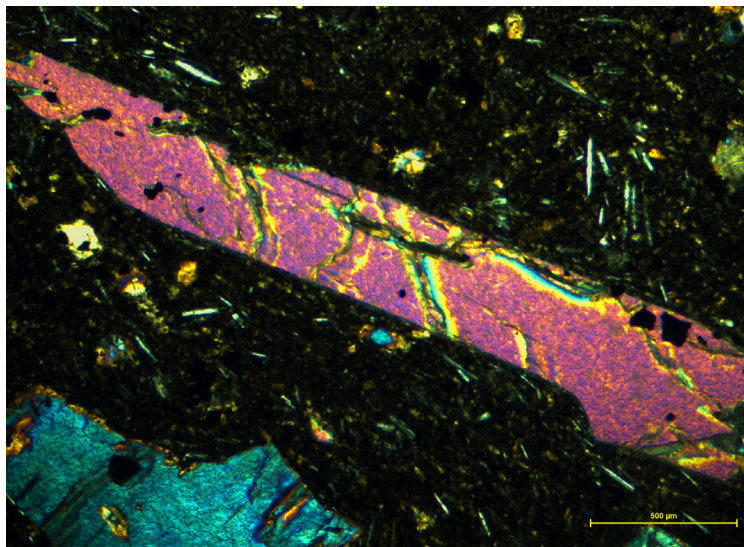
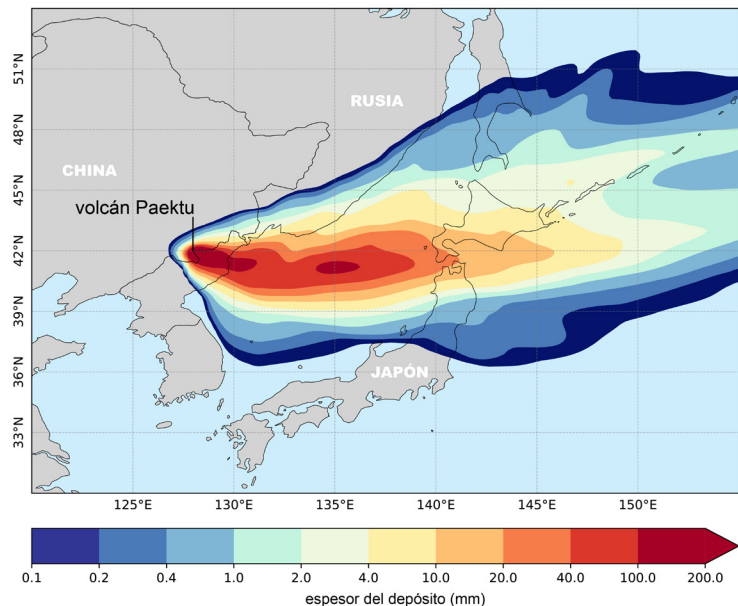


Imagen de microscopio óptico de rocas volcánicas emitidas durante la erupción de La Palma en 2021. / JOSÉ LOZANO (IEO-CSIC-VULCANA)

Estas, junto con muchas otras preguntas, pueden responderse también desde un punto de vista experimental. En el CSIC, varios grupos de investigación realizan desde hace años labores pioneras en el diseño y desarrollo de modelos análogos y petrología experimental aplicada al estudio de los procesos volcánicos. Los modelos análogos permiten reproducir en el laboratorio los procesos naturales con un factor de escala temporal (acelerando o ralentizando el proceso) o espacial (aumentando o disminuyendo su tamaño). En volcanología, estos modelos son útiles, por ejemplo, para comprender los mecanismos de ascenso y acumulación de magma. Por otra parte, la petrología experimental, a través de someter las muestras de roca a condiciones de presión y temperatura controladas, similares a las que existen en las profundidades de la Tierra, contribuye a mejorar, entre otras cosas, la comprensión sobre la evolución de la composición y de las propiedades físicas (densidad, viscosidad, etc.) del magma, lo que controlará, en gran parte, la peligrosidad volcánica de la erupción.

Finalmente, la información recogida en el campo y en el laboratorio se emplea para realizar modelos análogos o como datos de entrada en los modelos matemáticos, que buscan reproducir mediante ecuaciones y algoritmos los procesos que suceden tan-

to en el exterior como en el interior de un sistema volcánico. En algunos casos, esto requiere de sofisticados métodos numéricos y técnicas de computación al mismo tiempo que del uso de supercomputadores, como los disponibles en la Red Española de Supercomputación (ICTS-RES). De especial interés para el personal científico del CSIC es poder identificar y cuantificar los parámetros clave que controlan los fenómenos que ocurren antes de una erupción y que, incluso, pueden llegar a desencadenarla, como, por ejemplo, la velocidad de ascenso de magma. El CSIC también tiene amplia experiencia en la simulación de procesos que ocurren una vez iniciada la erupción, como la dispersión de partículas de ceniza volcánica y la expansión de la nube eruptiva, cuyos resultados se utilizan tanto para reconstruir el alcance de erupciones pasadas como para pronosticar el impacto de futuros eventos.

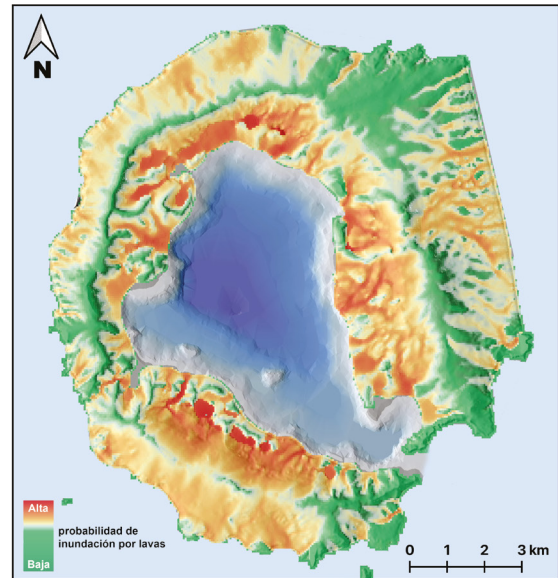
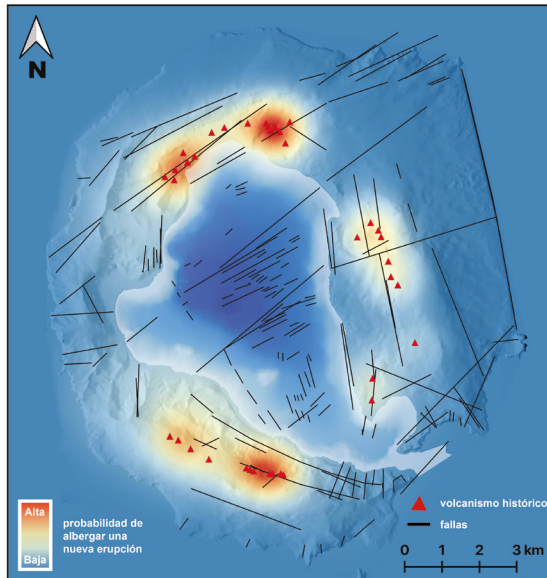


Reconstrucción mediante modelización numérica de la dispersión de cenizas durante la erupción del milenio (año 946 d.C.) del volcán Paektu (China). (MODIFICADA DE MINGARI ET AL., 2014)



Contar con un conocimiento científico sólido sobre la actividad volcánica pasada y sus impactos es un paso fundamental en el camino a la reducción del riesgo volcánico. Para ello, toda la información recogida se procesa con el fin de realizar una correcta evaluación de los peligros volcánicos. El CSIC tiene una larga experiencia en evaluar la peligrosidad volcánica de zonas activas, como en el caso de El Hierro, en Canarias. Para ello, realiza estudios en detalle de los depósitos volcánicos para reconstruir la tipología de la actividad volcánica pasada y su evolución en el tiempo. Por un lado, el registro de cómo, dónde, cuándo y con qué impacto han ocurrido las erupciones en una zona volcánicamente activa, combinado con modelos teóricos, permite, por ejemplo, realizar un análisis temporal, estimando la probabilidad de que en los próximos años ocurra una erupción volcánica. La información geológica recogida sirve también para construir los denominados árboles de eventos. Estos diagramas analíticos son el resultado de un proceso de evaluación lógica que trabaja siguiendo una línea temporal o a través de una cadena causal. Los árboles de eventos comienzan con un suceso o iniciador específico, por ejemplo, el comienzo de un periodo de *unrest* y, a partir de ahí, se van analizando de forma cronológica las posibles consecuencias.

Por otro lado, se lleva a cabo un análisis espacial con el objetivo de identificar áreas con mayor susceptibilidad volcánica o probabilidad de albergar nuevos centros eruptivos. Este se basa en el estudio de centros eruptivos previos, alineaciones volcánicas, fisuras, diques, fracturas y fallas. Finalmente, se definen los escenarios eruptivos más esperables en el área de estudio, estableciendo cómo será una futura erupción (tipología y tamaño) según lo ocurrido en el pasado en esa zona volcánica. Se realizan simulaciones que permiten definir el área de impacto de los diferentes peligros asociados, así como su evolución en el tiempo. Los resultados de estas simulaciones permiten crear los mapas de peligrosidad volcánica, que constituyen cartografías que identifican aquellas áreas susceptibles de verse afectadas por los diversos peligros volcánicos, tales como la caída de cenizas o las coladas de lava.



Ejemplo de mapas de susceptibilidad volcánica (izquierda) y de peligro por coladas de lava (derecha) en la isla Decepción (Antártida).
(MODIFICADA DE BARTOLINI ET AL., 2014)

La peligrosidad volcánica evaluada acorde con la información extraída del registro geológico se denomina *evaluación a largo plazo* y su resultado, entregado en forma de mapas de peligrosidad, árboles de eventos e informes científico-técnicos, se hace llegar a los órganos de gobierno y tomadores de decisiones. Idealmente, las conclusiones extraídas de una evaluación de la peligrosidad a largo plazo deberían servir como pilar fundamental para los siguientes pasos que se han de seguir en el proceso de la reducción del riesgo volcánico, tales como establecer una planificación territorial acorde con el nivel de peligro, definir planes y rutas de emergencia, etc. Es crucial que las evaluaciones de la peligrosidad a largo plazo se revisen con regularidad, especialmente tras una erupción, para así garantizar que se haya considerado toda la información disponible, y más actualizada, sobre la zona de estudio.

El tiempo de reposo entre erupciones es el momento idóneo para instalar, comprobar y mejorar la red de vigilancia o monitoreo. En términos generales, esta debe constar de toda aquella instrumentación que permita recoger cualquier señal generada por el sistema volcánico que facilite dilucidar si está ocurriendo algún proceso bajo la superficie que pueda producir cambios en el sistema y potencialmente desencadenar una erupción. Cada red de monitoreo tendrá un tipo de instrumentación, densidad (número de instrumentos por kilómetros cuadrados) y distribución (localización de los instrumentos) específica para la zona de estudio. Para poder decidir sobre cada uno de estos aspectos, se tienen en cuenta desde el tipo de sistema volcánico que se debe monitorizar hasta el número de infraestructuras críticas expuestas a los potenciales peligros volcánicos. En el marco de proyectos europeos, este ejercicio se ha realizado, desde un punto de vista académico, por parte de personal investigador del CSIC en zonas como las islas Canarias, el campo volcánico de La Garrotxa o la isla Decepción, para remarcar la necesidad de establecer redes de vigilancia densas y completas en estas zonas volcánicas (especialmente en el archipiélago canario).

El registro o señales, que la red de vigilancia recoge durante el tiempo previo a un *unrest* sirve para establecer lo que se denomina el **nivel de base** o de fondo de actividad, específico para cada sistema volcánico. Este punto es crítico para poder identificar cuándo las señales registradas empiezan a desviarse de este nivel, ya sea aumentando o disminuyendo (por ejemplo, una mayor actividad sísmica), o cambiando de características (como las variaciones en la composición de las fumarolas), lo que podría indicar el inicio de una inestabilidad del sistema y de un *unrest*. En España, la planificación y gestión de los sistemas de vigilancia y comunicación a las instituciones de la actividad volcánica en el territorio nacional y la determinación de los peligros asociados es competencia del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (Real Decreto 953/2018, de 27 de julio), que tiene desplegadas diferentes redes de instrumentación en cada una de las islas del archipiélago canario y en la península ibérica.

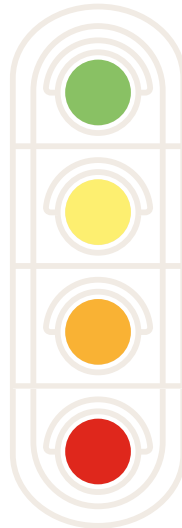
Gráfico 10 Técnicas de vigilancia y monitoreo volcánico



Durante este periodo previo a una crisis volcánica es importante disponer, asimismo, de un sistema de alerta temprana eficaz y conectado a las redes de vigilancia, para poder comunicar en el menor tiempo posible una situación de peligro a las autoridades. En caso de detectar señales que sugieran una erupción cercana, el sistema activa las alertas correspondientes permitiendo tomar medidas preventivas y accionando los correspondientes planes de protección civil. Estos sistemas requieren definir protocolos de comunicación eficientes para una respuesta rápida y coordinada ante una eventual emergencia.

En los planes de emergencia se establecen los distintos niveles de alerta volcánica en función del nivel de actividad del sistema volcánico. En volcanología es común utilizar un esquema de color similar al de un semáforo, donde el nivel de alerta más bajo se suele representar en color verde y el más alto en rojo, asociándose los niveles intermedios al amarillo y el ámbar. La definición de los niveles del sistema de alerta, así como de los criterios para cambiar de un nivel a otro, es compleja y depende del país o la zona volcánica. Por ejemplo, en Estados Unidos se centra en el peligro, mientras que en Indonesia y Japón se elabora en función del riesgo y la respuesta requerida. En el caso de las islas Canarias, el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por Riesgo Volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA) sigue el mismo sistema de cuatro colores, referido como *semáforo volcánico*, con indicaciones sobre los niveles de actividad y las acciones a realizar por los diferentes estamentos involucrados en la gestión de la emergencia.

Gráfico 11 Semáforo volcánico del PEVOLCA para comunicar el nivel de alerta



SEMÁFORO VOLCÁNICO:

- **PREALERTA:** PROSIGA SUS ACTIVIDADES CON NORMALIDAD.
El color verde representa una condición de riesgo tan bajo para la población que no requiere tomar medidas de protección.
- **ALERTA:** PRESTE ATENCIÓN A LOS COMUNICADOS OFICIALES DE AUTORIDADES Y MEDIOS DE COMUNICACIÓN.
En color amarillo se activa el Plan de Protección Civil porque se aprecian incrementos en las anomalías o indicadores que pronostican un periodo preeruptivo a medio plazo. Prevea un posible plan de evacuación personal.
- **ALERTA MÁXIMA:** SE DISPARA LA FASE DE EMERGENCIA.
En naranja los registros del comportamiento de la actividad volcánica indican que hay fenómenos preeruptivos que evidencian que se está desarrollando una fase preeruptiva. Situación de alerta máxima e inicio de la evacuación preventiva cuando se indique.
- **EMERGENCIA:** EVACUACIÓN OBLIGATORIA E INMEDIATA.
El color rojo se activa cuando se confirma la erupción volcánica y ésta supone riesgo para la población y las infraestructuras fundamentales. Se procede a la evacuación urgente y obligatoria de la población. Todas las personas deben colaborar con las autoridades para la evacuación.

La estimación de la potencial localización y el alcance del impacto de futuras erupciones es crucial para evaluar el grado de exposición de infraestructuras y comunidades. Por otro lado, conocer qué peligros esperar permite realizar estudios de vulnerabilidad física (como, por ejemplo, la resistencia de los tejados ante la acumulación de cenizas), socioeconómica y medioambiental, que posteriormente deberían traducirse en acciones de mitigación concretas, como mejoras estructurales de los edificios, una correcta planificación territorial, etc. En este sentido, el CSIC contribuye con la realización de estudios de percepción de riesgo volcánico, cuyos resultados posibilitan elaborar estrategias formativas y materiales docentes para mejorar la educación temprana y la preparación de las comunidades expuestas, disminuyendo así su vulnerabilidad y mejorando su capacidad de reacción.

22.

Las señales precursoras como preludio de una crisis volcánica: investigación, pronóstico, preparación y acción

CUANDO el sistema volcánico experimenta un cambio notable de su actividad basal se considera que se inicia un periodo de *unrest*. Durante el *unrest* ocurren una serie de fenómenos que pueden ser precursores de una erupción volcánica a corto, medio o largo plazo. Estos incluyen un aumento de la sismicidad, deformaciones del terreno, variaciones en la emisión de gases volcánicos y actividad fumarólica o hidrotermal, y alteraciones en la temperatura de los cuerpos de agua, entre otros. Idealmente, todos estos fenómenos deberían poder registrarse con la red de vigilancia existente. Solo en algunos casos particulares estos cambios pueden pasar desapercibidos, ya sea por su baja intensidad, por estar bajo el límite de detección de los instrumentos, por presentar pocas señales y muy espaciadas en el tiempo, o por la propia velocidad del proceso magmático. Comúnmente las erupciones que ocurren sin previo aviso o con señales precursoras que pasan desapercibidas son las debidas a procesos freatomagmáticos o freáticos (como ocurrió en 2014 en el Monte Ontake, en Japón, o en la isla Whakaari, en Nueva Zelanda, en 2019), o de conducto abierto, es decir, con una abertura permanente en su cráter por la que se expulsa el magma de forma continua o intermitente (como en la erupción paroxismal del Stromboli, Italia, en 2019).

Al iniciarse un *unrest* se ponen en práctica y se ajustan los conocimientos obtenidos y las metodologías previamente desarrolladas. Se procede a reemplazar los parámetros teóricos y generales en escenarios eruptivos, modelos y simulaciones, por datos precisos y específicos correspondientes a la situación actual. En este contexto, las simulaciones y los mapas de susceptibilidad se convierten en herramientas operativas que permiten establecer escenarios eruptivos revisados y concretos que se actualizan a diario. Dado que una crisis volcánica está en constante evolución, el flujo de nueva información es continuo pues los datos son dinámicos y cambiantes minuto a minuto. La correcta interpretación de los datos recogidos es crucial para entender y evaluar la evolución del *unrest* en el tiempo y el espacio, así como de los indicadores para el correcto pronóstico de posibles erupciones a corto plazo. En este contexto, el CSIC contribuye aportando conocimientos científicos y realizando la evaluación de la peli-

grosidad a corto plazo, actualizando los mapas de peligrosidad y susceptibilidad a partir de los datos recogidos por la red de vigilancia durante el *unrest*.

Dependiendo de los procesos que los desencadenan, los periodos de *unrest* pueden tener características distintas, durar pocas horas, días o años, y no siempre escalan en intensidad hacia una crisis volcánica o culminan en una erupción. De hecho, estadísticamente, un porcentaje importante de los *unrest* finaliza sin la salida del magma a la superficie. En la mayoría de los casos, esto se debe a que el magma en ascenso queda atrapado en el subsuelo y empieza a disminuir de temperatura, pudiendo llegar a enfriarse por completo en profundidad, sin llegar nunca a erupcionar.

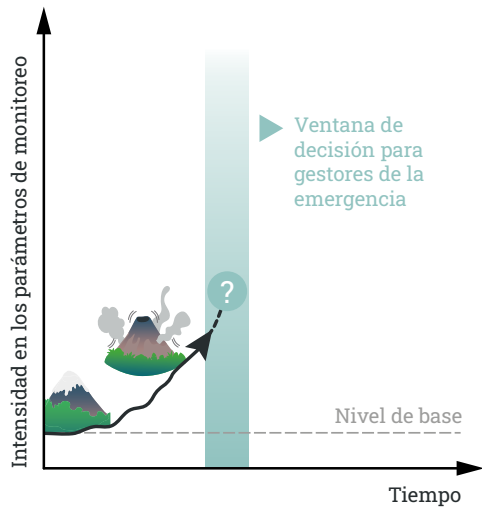
En casos extremos, los periodos de *unrest* pueden prolongarse durante años sin que haya una indicación clara de una futura erupción. En tales circunstancias, resulta muy difícil, e incluso inviable, anticipar cuándo y cómo finalizará. Por lo tanto, uno de los principales desafíos en la volcanología es resolver la falta de conocimiento científico sobre aquellos sistemas volcánicos que experimentan largos periodos de estabilidad o reposo y que tienen frecuencias eruptivas considerablemente más espaciadas en el tiempo, en comparación con el periodo de observación disponible para determinar el nivel de actividad de base del volcán objeto de estudio.

La complejidad y diversidad de señales recogidas por la red de vigilancia, así como las ambigüedades en el momento de definir los procesos que las originan, complican la labor de establecer si una fase de *unrest* decrecerá o se intensificará. En todo caso, los fenómenos que ocurren durante el periodo *unrest* pueden ser un peligro relevante en sí mismos (como la emanación de gases peligrosos para la salud) o desencadenar otros procesos peligrosos (deslizamientos o caída de rocas provocados por la actividad sísmica). Por ello, aun teniendo la certeza de que no culminará en una erupción, los periodos de *unrest* volcánico pueden implicar también un riesgo para la población.

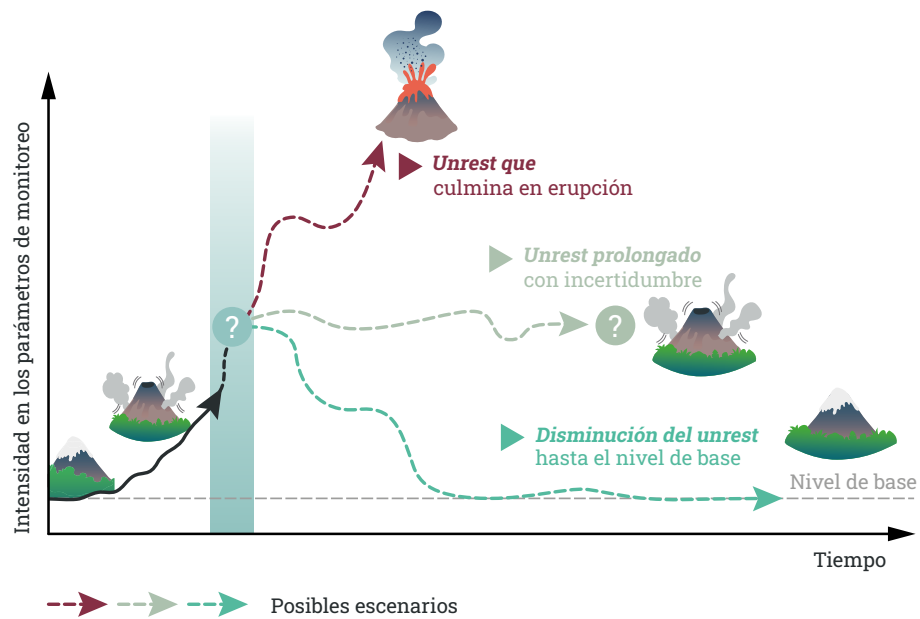
Cuando el *unrest* volcánico se intensifica, aumenta la preocupación entre el personal científico, los gestores de las emergencias, los responsables político-administrativos y la propia comunidad ante la expectativa de una posible erupción inminente. En estas situaciones de aceleración de las señales, se abre una ventana de decisión durante la cual las autoridades responsables, bajo una gran presión política y social, deben decidir en lo referente a la activación de medidas de mitigación, que incluyen, en algunos casos, la evacuación de la población en riesgo. En este momento, es imperativo que el personal científico comunique, de la manera más efectiva, toda la información disponible, incluido el pronóstico de evolución de la situación. Desafortunadamente, y a pesar de los avances científicos en volcanología y técnicas de vigilancia volcánica, no siempre es posible proporcionar un pronóstico preciso en términos de si se va a producir, o no, una erupción. Hay que tener en cuenta que, aun disponiendo de una robusta red de vigilancia, un amplio conocimiento del sistema volcánico y toda la información en tiempo real, la compleja naturaleza de los procesos eruptivos puede llevar a conclusiones incorrectas o cargadas de incertidumbre.

A medida que avanza la crisis volcánica, el aumento de los datos recogidos por la red de vigilancia permite reducir la incertidumbre vinculada al pronóstico de la evolución de la actividad eruptiva, es decir, en determinar si finalmente ocurrirá una erupción, en qué marco temporal y dónde va a tener lugar. Las autoridades pertinentes pueden, entonces, tener una base más sólida para tomar decisiones como, por ejemplo, incrementar el nivel de alerta. Sin embargo, en paralelo, el tiempo restante hasta el inicio de la erupción va disminuyendo, reduciendo así el tiempo disponible para poner en marcha las medidas de mitigación oportunas. Se hace necesario, por tanto, declarar una alerta con suficiente antelación para evitar pérdidas humanas y materiales, pero con la menor incertidumbre posible, evitando generar una falsa alarma (si finalmente no se da la erupción). Esto podría llevar a evacuaciones innecesarias y a la interrupción de actividades económicas y sociales. Además, activar alertas sin una justificación adecuada puede acarrear una pérdida de credibilidad, lo que dificultará la respuesta efectiva en emergencias volcánicas futuras. El escenario con mayor incertidumbre sucede cuando el *unrest* se prolonga, fluctuando en intensidad, durante años o décadas.

Gráfico 12 Evolución de un *unrest*, ventana de decisión y posibles escenarios



→ **Evolución del *unrest***





El personal científico y los funcionarios públicos se enfrentan a continuos y numerosos picos de actividad, durante los cuales deben decidir si se modifica el nivel de alerta o se toma algún tipo de medida mitigadora complementaria. En estas circunstancias es común que se den situaciones de falsas alarmas de erupciones.

En el contexto de *unrest* y durante una crisis volcánica ya declarada, el papel del CSIC es el de asesorar a las autoridades, Protección Civil y otros responsables de la vigilancia volcánica y gestores de la emergencia, tanto en lo que respecta a la interpretación de los datos registrados por los sistemas de monitorización y a la posible evolución de los mismos como en la mejora y diseño de las diversas redes de vigilancia volcánica, si fuera necesario. Además, en caso de necesidad, el CSIC contribuye con sus infraestructuras de investigación (laboratorios, flota, instrumentación, equipos, servicios digitales, etc.) a mejorar las redes estructurales de vigilancia, en un ejercicio de responsabilidad y colaboración institucional al servicio de la sociedad.

El Plan Nacional de Vigilancia Sísmica, Volcánica y de Otros Fenómenos Geofísicos, actualmente en redacción, tiene como objetivo optimizar los recursos y mejorar los sistemas de alerta temprana, monitorización, vigilancia, detección y regulación técnica de los peligros volcánicos. De esta manera, se regula el fortalecimiento del sistema nacional de vigilancia mediante la integración de todos los medios disponibles en el territorio nacional, distribuidos entre instituciones de diferente naturaleza (como universidades y centros de investigación). Se persigue, así, mejorar la comprensión y el fortalecimiento de la gobernanza del riesgo de desastres y el aumento de la preparación para casos de desastre, a fin de poder ofrecer una respuesta eficaz a estos fenómenos. La participación del personal investigador del CSIC en la elaboración de dicho plan evidencia el compromiso de la institución en la actuación conjunta y coordinada de la mitigación de los riesgos geológicos, entre ellos, el volcánico.

2.3.

Actuaciones durante una erupción: asesoramiento científico para los decisores públicos y comunicación a la sociedad

DESDE el inicio de una erupción volcánica, la monitorización y el seguimiento de la actividad es fundamental para asesorar a las autoridades responsables de la gestión de la misma sobre su evolución y peligros esperables. Durante el transcurso de un evento eruptivo, la colaboración institucional se hace más necesaria que nunca, tanto para el refuerzo de la red de vigilancia como para la interpretación de la ingente cantidad de datos recogidos y la evaluación conjunta de los mismos por parte de los comités científicos. En el caso concreto de las islas Canarias, este último se denomina Comité Científico de Evaluación y Seguimiento de Fenómenos Volcánicos (CCES) y se constituye en aplicación del PEVOLCA. Este comité cuenta con representantes de distintos ICU y Centros Nacionales del CSIC, cada uno especializado en un área de conocimiento dentro de la volcanología. La misión fundamental del CSIC como miembro de este comité es proporcionar asesoramiento científico a los órganos directivos del PEVOLCA, con responsabilidades que incluyen establecer la metodología de vigilancia y seguimiento a aplicar en caso de erupción volcánica, valorar los datos e informaciones que se obtengan y formular pronósticos acerca de su evolución. Bajo este escenario, la contribución del CSIC es clave, dando soporte para el fortalecimiento del sistema de vigilancia, instalando redes complementarias y aportando el conocimiento científico de su personal investigador a través de sus labores de asesoramiento científico. Por ejemplo, durante la erupción del volcán de Tajogaite fueron fundamentales las aportaciones de datos de deformación del terreno, registros de actividad sísmica, cartografía de coladas de lava subaérea y submarina, y modelos de dispersión de piroclastos. Asimismo, el CSIC llevó a cabo grabaciones de imágenes convencionales y térmicas mediante drones, en colaboración con el Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias.

Mapa de la evolución de la colada de lava en la Isla de La Palma, Canarias, entre el 11/10/2021 y el 30/10/2021. El mapa muestra la extensión de la colada de lava en diferentes colores, correspondientes a las fechas de avance. Se incluye una leyenda para las fechas y un símbolo para el centro de emisión. El mapa también muestra la costa, las montañas y la red de carreteras de la isla.

Área de la colada a 30/10/2021 9:30:00
(Hectáreas):949,32 Ha

Autores de la cartografía: Gonzalo Lozano, Juan Carlos Gerardo, Carlos Lorenzo, Mario Hernández, Ana Calero, Elisabeth Díaz, Carlos Camarero, José P. Mediano, Julio López, Raúl Pérez, Marta Maja, Guadalupe Bu, Pedro Esquivel, Isabel Martínez, Inés Galindo y Nerea Sánchez/LIGUE - TIGUE CSIC.

Esta cartografía ha sido realizada en el menor tiempo posible para su uso en la respuesta a la emergencia volcánica. Por ello tienen limitaciones debido a la escala, resolución, fecha e interpretación de las fuentes originales. El IGN no se hace responsable de su uso fuera de la emergencia.

Fuente de datos colada:
Vectores fotogramétricos y de reconocimiento del Servicio de Trabajos Aéreos del Instituto Geológico y Minero de España (STA-IGME, CSIC), Vuelos fotogramétricos y de reconocimiento del Grupo de Emergencias y Salvamento del Gobierno de Canarias (GES), Vuelos fotogramétricos realizados por TIGUE voladores para el Cabildo de La Palma y el perímetro realizado a partir de ellos por César Méndez (Cabildo La Palma), Imágenes satelitales de Copernicus (European Union) y videos aéreos de Dronen Media

Fuente de datos emisión:
EHT Copernicus (European Union) y Servicio de Trabajos Aéreos del Instituto Geológico y Minero de España (STA-IGME,CSIC)

Sistema Espacial de Referencia:
REGCAN5 UTM Zone 28N
Datum: Red Geodésica de Canarias 1995

Escala - 1: 20.000

Mapa base:
Sombreado: GRAFSCAN (Gobierno de Canarias)

Evolución de la lava por fecha

11/10/2021 10:00:00	21/10/2021 11:30:00
12/10/2021 13:00:00	22/10/2021 12:00:00
13/10/2021 15:30:00	23/10/2021 10:00:00
14/10/2021 12:00:00	24/10/2021 10:00:00
15/10/2021 13:00:00	25/10/2021 10:00:00
16/10/2021 10:00:00	26/10/2021 10:00:00
17/10/2021 12:00:00	27/10/2021 18:30:00
18/10/2021 11:30:00	28/10/2021 11:30:00
19/10/2021 15:30:00	29/10/2021 10:00:00
20/10/2021 9:30:00	30/10/2021 9:30:00

● Centro de emisión

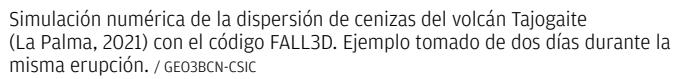
ERUPCIÓN VOLCÁNICA EN LA ISLA DE LA PALMA:
EVOLUCIÓN COLADA DE LAVA ENTRE 11/10/2021 Y 30/10/2021
9:30:00

Logos: GOBIERNO DE ESPAÑA, INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, CSIC, Instituto Geológico y Minero de España

SCIENCE  POLICY | 65

El personal científico y técnico también tomó muestras de roca, agua y gases que se analizaron con el fin de obtener su composición y propiedades físicas, lo que proporcionó valiosa información sobre diversos aspectos, tales como la posible contaminación por lixiviados de cenizas, el peso de estas sobre los tejados, o las características y el origen del magma, así como su evolución antes y durante la erupción. Igual de fundamentales fueron los estudios volcano-tectónicos con el fin de analizar la apertura de nuevos puntos eruptivos, los conductos volcánicos y su relación con el sistema de fallas y fracturas, el seguimiento de la calidad del aire y del agua subterránea, el análisis de la susceptibilidad frente a movimientos del terreno o el impacto de la erupción en los ecosistemas terrestres y marinos, así como otros peligros secundarios que pueden suponer un riesgo para la población. La observación continua del proceso, la interpretación de los datos adquiridos y su actualización constante, ayudó a establecer los escenarios eruptivos susceptibles de ocurrir, con pronósticos de las posibles áreas afectadas y su impacto, respaldando la toma de decisiones de las autoridades responsables. Dado el carácter explosivo de la erupción y la correspondiente preocupación por la inyección de partículas en la atmósfera, desde el CSIC se realizaron simulaciones de dispersión de ceniza en tiempo real, lo que se convirtió en un servicio de pronóstico operativo con una previsión a 48 horas, que fue de gran importancia para el comité científico del PEVOLCA. Esto ha resultado una herramienta esencial para informar a los responsables de la toma de decisiones sobre los escenarios de impactos en la aviación civil y la probabilidad de afectación en la calidad del aire para determinar los confinamientos de la población.

En el caso de ocurrir una erupción explosiva de gran magnitud fuera del territorio español, especialmente en Europa o en zonas mediterráneas, la gestión de este riesgo en España se centraría principalmente en mitigar el impacto proveniente de la inyección masiva de partículas y gases en la atmósfera. Se requiere, a través de la simulación numérica del avance de estos peligros y el análisis de vulnerabilidad y exposición, realizar una evaluación y pronóstico de afectación tanto al espacio aéreo como a la calidad del aire, el medioambiente, la agricultura, las infraestructuras críticas, las redes de transporte y las telecomunicaciones de todo el territorio o de una gran parte de él. Estas grandes erup-



ciones pueden tener repercusiones a escala global y, por ende, un elevado coste económico y social incluso mayor que aquel derivado de erupciones de menor volumen ocurridas dentro del propio territorio nacional.

Finalmente, durante una erupción volcánica, ya sea submarina o en tierra firme, pero con impacto en el mar, la observación oceanográfica, incluido el monitoreo submarino, es fundamental y debe ser reforzada desde el primer momento. Esto se aplica especialmente en eventos volcánicos en islas, costas y el fondo del mar, y persigue analizar el impacto en los ecosistemas marinos, así como los posibles riesgos secundarios, entre otros. Para ello, el CSIC se encarga de desplegar buques oceanográficos especializados pertenecientes a la Infraestructura Científica y Técnica Singular FLOTA (ICTS-FLOTA) con equipamiento multidisciplinar que incluya, por ejemplo, instrumentación oceanográfica o robots operados de forma remota, que permiten estudiar, muestrear y observar los procesos volcánicos submarinos y su repercusión en el medio marino. Asimismo, se desplazan laboratorios móviles para la evaluación *in situ* de parámetros físico-químicos y biológicos, personal investigador y técnico, así como instrumental científico específico para fondear en las inmediaciones de la zona de estudio. El muestreo de la zona antes de que el proceso eruptivo tenga lugar o se haya generado el impacto es vital, ya que permite determinar *a posteriori* las anomalías físico-químicas, biológicas y geológicas causadas por la actividad volcánica en el ecosistema marino.

En paralelo a las tareas de investigación y recogida de datos, se debe realizar una vasta labor de comunicación para explicar a la sociedad el proceso volcánico. Así, antes, durante y después de la erupción, el personal del CSIC tiene como deber fundamental compartir la experiencia y conocimiento adquiridos a lo largo de muchos años de investigación, poniéndolos al servicio de la



sociedad a través de la divulgación y la comunicación. Durante la erupción, la adecuada comunicación de la situación de la emergencia y la explicación a la población de los procesos volcánicos que se están produciendo es de vital importancia para una correcta gestión de la crisis. Más allá de los comunicados oficiales por parte de las autoridades o la persona portavoz del Comité Científico, las explicaciones concretas sobre todos los aspectos relacionados con el proceso geológico en sí mismo deben ser realizadas por personal científico experto en volcanología capaz de transmitir la información de manera clara y basada en la evidencia científica.

Buque oceanográfico Ramón Margalef del IEO frente al delta de lava durante la erupción del volcán Tajogaite en la isla de La Palma, 2021 / ICMAN-CSIC-VULCANA

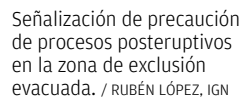
2.4.

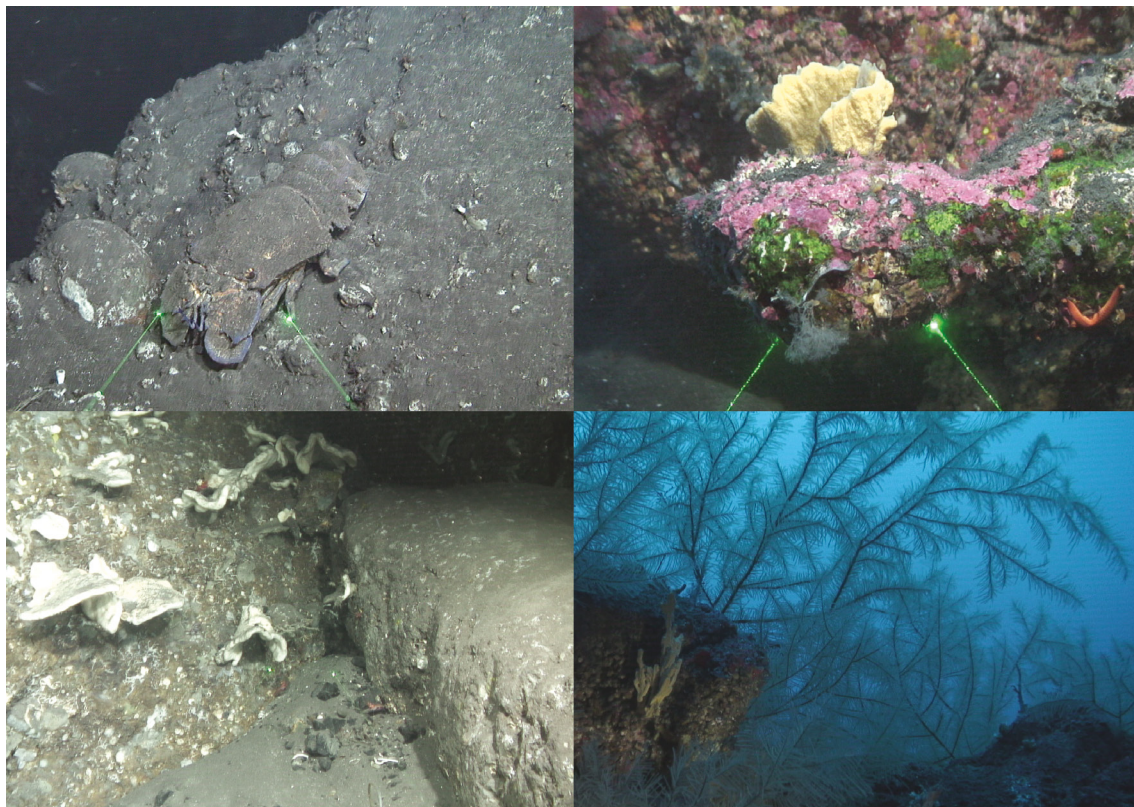
Investigación y gestión poserupción

AL finalizar la erupción se inicia la fase de reconstrucción y recuperación posdesastre. Durante este periodo, se realiza una estimación detallada de los daños, se procede a la reparación de infraestructuras damnificadas, a la rehabilitación de comunidades afectadas y a la implementación de medidas de mitigación y preparación ante futuras erupciones. En muchas ocasiones, estas acciones se gestionan aún con la presencia de ciertos peligros derivados de la erupción volcánica y sus productos, como pueden ser las altas temperaturas de las coladas de lava, la removilización de los depósitos de cenizas durante lluvias intensas, la inestabilidad del propio edificio volcánico, o la emanación de gases dañinos para la salud. Algunos de estos peligros pueden prolongarse en el tiempo, durante años e incluso décadas.

El CSIC, durante esta etapa, contribuye proporcionando asesoramiento científico continuo a las autoridades, realizando investigaciones que pueden apoyar las labores de recuperación proporcionando información sobre las características, distribución y volumen de los productos volcánicos, así como su temperatura y velocidad de enfriamiento, la concentración y composición de los gases en emisión, las aguas subterráneas, la estabilidad del terreno o impactos al ecosistema marino, entre otros aspectos. La recopilación y el análisis de estos datos permiten comprender mejor el proceso volcánico, evaluar el alcance de sus peligros y mejorar las estrategias de mitigación, preparación y recuperación.

En el caso de la erupción de Tajogaite, se desarrolló un modelo de enfriamiento de las lavas y un sistema de seguimiento de sus temperaturas, lo que ha resultado de gran interés para las administraciones públicas que están dirigiendo los trabajos de reconstrucción y recuperación, y de gran utilidad en la construcción de nuevas carreteras y la planificación territorial en general. Además, el CSIC ha dedicado más de una década al estudio de la evolución del proceso de desgasificación del volcán submarino Tagoro (El Hierro). A lo largo de estos años, esta institución ha apostado por la innovación tecnológica para el monitoreo específico de estos ambientes, desarrollando y diseñando nuevos instrumentos científicos usados con robots submarinos.

SCIENCE  POLICY | 71



Ejemplo de imágenes submarinas del impacto sobre el ecosistema marino del volcán Tajogaite en La Palma en 2021 (izquierda), respecto a imágenes del delta de lava formado por la erupción de 1949 (derecha) (EUGENIO FRAILE). Se aprecia una completa recuperación ecosistémica en la zona afectada hace décadas.

haciendo una evaluación de los mismos así como del peligro de que desaparezcan, proponiendo nuevas áreas de protección para algunos de ellos, de forma que se evite su destrucción.

Para el ciclo de gestión de desastres volcánicos, es necesario revisar si los procedimientos utilizados han sido adecuados con el fin de mejorarlos para el futuro. A partir de las experiencias previas en emergencias volcánicas de diversos grupos de investigación y de otro tipo (sanitarias, marina, etc.), el CSIC ha creado un Comité de Asesoramiento de Emergencias como órgano de asesoramiento a su Presidencia. Además, ha desarrollado un Protocolo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias (PADE) con el fin de estructurar las intervenciones científicas de forma organizada, para ofrecer asesoramien-



to científico-técnico en desastres y emergencias a través de la preparación, activación y coordinación de equipos científicos y técnicos, así como de personal administrativo y de gestión. De esta manera, el CSIC pone su ciencia a disposición de los organismos que lo requieran para contribuir a reducir el riesgo volcánico.

En resumen, los equipos del CSIC se trasladan a la zona de la erupción tanto para dar apoyo a las labores de asesoramiento científico y vigilancia como para poder seguir aprendiendo sobre los procesos volcánicos, sus impactos y sus peligros, observándolos, documentándolos y analizándolos en tiempo real. Los datos obtenidos permiten, entre otras cosas, investigar las características de la erupción y sus productos, y realizar pronósticos de las posibles áreas afectadas y su impacto. Todo ello es crítico para ofrecer información científica que permita a los gestores tomar medidas preventivas como, por ejemplo, la limitación del acceso a las zonas terrestres y marinas de mayor riesgo, ordenar las evacuaciones o el cierre del espacio aéreo, o definir medidas de autoprotección ante determinados riesgos. El CSIC ha desempeñado un papel crucial en las dos últimas erupciones volcánicas ocurridas en Canarias: la erupción submarina del volcán Tagoro, en la isla de El Hierro en 2011-2012, y la erupción del volcán Tajogaite, en la isla de La Palma en el año 2021. En ambas ocasiones, el CSIC ha brindado asesoramiento científico desde las primeras señales de inestabilidad reportadas por el IGN, hasta la gestión durante y después de la erupción, incluyendo el periodo de recuperación posdesastre. Este trabajo de asesoramiento científico es continuo, ya que el Comité Científico del PEVOLCA se reúne periódicamente para evaluar la situación de la actividad volcánica del archipiélago canario, y así, estar preparado para reaccionar ante una posible reactivación que pueda afectar a la población expuesta y al territorio en su conjunto. Además, el CSIC desempeña un papel fundamental en la Célula de Información y Análisis de Riesgos y Amenazas (CIARA) del Consejo Nacional de Seguridad Marítima (CNSM) del Gobierno de España desde el año 2014. Actúa como representante vocal del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y ofrece asesoramiento científico en una amplia gama de áreas que abarca desde los riesgos volcánicos submarinos hasta la protección de la biodiversidad y los recursos marinos.

tres



Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

|||||

La actividad volcánica es un fenómeno geológico natural e inevitable. La desinformación, la falta de preparación y la mala gestión son, en la mayoría de los casos, responsables de que terminen en catástrofe.

|||||

Los peligros volcánicos no conocen fronteras, su impacto puede ser desde local a global y pueden durar pocas horas o varios años. En España, la mayor amenaza proviene tanto de las **zonas volcánicas activas que se encuentran dentro del territorio** como de los peligros derivados **de erupciones explosivas de volcanes europeos o de otros países próximos.**

|||||

Un sistema volcánico puede estar activo aunque no haya señales evidentes de actividad volcánica, incluso cuando sus últimas erupciones hayan sucedido hace algunos miles de años. **La investigación que lleva a cabo el CSIC resulta esencial para conocer el estado de actividad actual de una zona volcánica y evaluar la posibilidad de futuras erupciones.** Este conocimiento se transmite tanto a los decisores públicos y a los gestores del riesgo como a la sociedad, especialmente en aquellas comunidades que, aun residiendo en territorios volcánicamente activos, no han vivido una erupción recientemente y tienen una baja percepción del peligro y del entorno volcánico en el que viven.

|||||

En una zona volcánicamente activa, **la gestión del riesgo volcánico** requiere una profunda comprensión de los peligros volcánicos, que pueden transcurrir de forma simultánea o desencadenarse en cascada, antes, durante o después de una erupción. Para ello es necesario aplicar un **análisis multipeligro**, estudiar exhaustivamente la actividad volcánica pasada y su impacto, y **evaluar el potencial de futuras erupciones.**

|||||

El conocimiento científico del CSIC ha ayudado en la toma de decisiones informadas durante la gestión de las últimas crisis volcánicas en España. Durante el *unrest* y la erupción volcánica, **el CSIC ofrece apoyo científico y soporte a las labores de vigilancia,** al mismo tiempo que **investiga los procesos volcánicos y sus peligros,** realizando **pronósticos de las posibles áreas afectadas y estimaciones del impacto esperado.** El CSIC, trabajando de forma conjunta con otros organismos con responsabilidades y competencias en volcanología, contribuye con su investigación e infraestructuras a una gestión más efectiva del riesgo volcánico.



Convivir de forma segura con los volcanes precisa de una **correcta gestión del riesgo**. Mientras que **no se puede actuar sobre el peligro**, natural e inherente, **es crucial reducir la vulnerabilidad y la exposición, al tiempo que se fortalece la capacidad de las comunidades afectadas**. Esto se logra, entre otras acciones, mediante la implementación de medidas de adaptación y mitigación, como la planificación territorial, códigos de construcción, el desarrollo económico y social, asegurando la diversidad económica y los medios de vida resilientes, una legislación efectiva y planes de educación y de concienciación.



Los principales retos en la gestión del riesgo volcánico son determinar si un periodo de unrest escalará hasta una crisis volcánica, si finalmente culminará, o no, en una erupción, y pronosticar, con un grado de incertidumbre asumible **cuándo, dónde y cómo sucederá**. El único camino para llegar a ello pasa por un conocimiento científico integral de los procesos volcánicos y la instalación de una red de vigilancia apropiada y completa.



El ciclo de gestión de desastres volcánicos se completa con la **investigación de los productos y los depósitos volcánicos emitidos por la erupción**, que proporcionan valiosa información sobre los efectos y la magnitud de la actividad volcánica. Además, se revisa si los procedimientos aplicados durante la crisis volcánica han sido adecuados con el fin de mejorarlos para el futuro, y se evalúan los daños producidos para iniciar las acciones de recuperación, incluyendo, entre otros, la asistencia social y el apoyo psicosocial, el restablecimiento de las telecomunicaciones e infraestructuras del transporte, la rehabilitación y la restauración de bienes culturales.

Recomendaciones

Para los decisores políticos:



La **gestión y mitigación del riesgo** requieren de acciones a **corto, medio y largo plazo** y estas deben realizarse a **nivel social, económico, estructural y ambiental**.



La naturaleza de los fenómenos eruptivos es altamente compleja y, aun disponiendo de una robusta red de vigilancia e información en tiempo real, **comprender e interpretar las señales registradas y realizar pronósticos certeros requiere ampliar los conocimientos científicos existentes**. Las instituciones encargadas de brindar este asesoramiento científico, como el CSIC, **precisan disponer de recursos económicos, materiales y humanos** para llevar a cabo investigaciones antes, durante y después de la erupción.



Se recomienda **reevaluar la legislación vigente para que las zonas volcánicas geológicamente activas del territorio español dispongan de un plan de protección civil** ante el riesgo volcánico en la respectiva comunidad autónoma. Asegurar que todos aquellos **territorios con evidencias científicas de actividad volcánica** geológicamente muy reciente, o sin cambios en las condiciones geológicas desde la última erupción, **queden incluidas, evitando así dejar estas zonas en una situación de vacío legal** ante una eventual crisis volcánica.



Es necesario el estudio y vigilancia continua de las zonas volcánicas consideradas activas con el fin de **definir su respectivo nivel de base y detectar cualquier señal de unrest de forma temprana**. Esto requiere de una apuesta clara por la investigación en volcanología, además de sistemas de monitoreo avanzados, que permitan una **evaluación precisa del estado de la actividad volcánica y de su evolución**.



La mejora de la comprensión del riesgo volcánico requiere de una aproximación multi-, inter- y transdisciplinar, por lo que se recomienda que las instituciones adopten un **enfoque colaborativo** tanto a nivel nacional como internacional, y **favorezcan el intercambio de datos, conocimiento científico y estrategias de gestión del riesgo volcánico**.



Los peligros volcánicos pueden trascender fronteras y continentes. Es imprescindible que las instituciones aboguen por una **coordinación internacional** en lo referente a los **sistemas de alerta temprana** y los **planes de gestión del riesgo volcánico a nivel global**. Esto garantiza una respuesta efectiva y coordinada frente a aquellas amenazas volcánicas que puedan afectar múltiples países y regiones, y contribuye a la **prevención y mitigación de los impactos de las erupciones volcánicas a escala mundial**.



La crisis volcánica puede alargarse más allá del cese de la erupción, por lo que se debe comenzar la fase de reconstrucción y recuperación posdesastre aún con la presencia de algunos peligros, que pueden prolongarse durante años o incluso décadas. Esto debe tenerse en cuenta durante la preparación de planes de emergencias y recuperación, así como en la **planificación de ayudas a la población a largo plazo**.



Desarrollar estrategias eficientes para coexistir con la dualidad de beneficios y peligros volcánicos es una tarea urgente y necesaria, que tiene como objetivo mejorar la resiliencia y capacidad de la población local. Es importante asegurar una explotación sostenible de los **recursos** que ofrecen los territorios volcánicos, garantizando la **preservación de la geodiversidad**, fomentando iniciativas de **valorización y conservación del patrimonio geológico** y asegurando la **implicación de las comunidades afectadas**.



Es imperativo realizar una **importante inversión en formación**, en la **preparación de protocolos de comunicación y planes de emergencia**, y en la realización de simulacros para mejorar la velocidad y coordinación de la respuesta de los cuerpos de emergencias y protección civil durante una crisis volcánica.



Es necesario desarrollar una vasta **labor de comunicación y elaborar estrategias formativas, educativas, y de divulgación científica**. Una población mejor informada, con mayor percepción del riesgo y más concienciada está mejor preparada para afrontar tanto la crisis volcánica como la fase de recuperación, y demuestra una mayor capacidad de reacción, adaptación, y de buscar nuevos recursos.



Para **facilitar la recuperación de las personas afectadas, prevenir la pérdida de arraigo con su territorio y minimizar el daño en la propiedad de bienes personales e identidad**, se recomienda que las instituciones tomen acciones, como garantizar la digitalización y conservación en bases de datos públicas de documentos personales, archivos administrativos, bancarios e identificativos, o fotografías personales y documentos familiares con valor sentimental.

Para los medios de comunicación:

|||||

La **colaboración entre los medios de comunicación, el personal científico experto en volcanología y las autoridades** es fundamental. **Los medios de comunicación desempeñan un papel crucial en la comunicación efectiva durante una crisis volcánica**, por ello es necesario que se dirijan a las **fuentes oficiales** establecidas y consulten al **portavoz del comité científico** para asegurar que la **información proporcionada es precisa, fiable y veraz**. Esto ayuda a mantener a la audiencia informada y segura, combatiendo las noticias falsas y los rumores que puedan generar pánico o, por lo contrario, una percepción de falsa seguridad.

|||||

Para las entrevistas durante **la gestión de la crisis es recomendable contactar con la persona portavoz del comité científico asesor o el personal científico autorizado** por el comité de emergencias. Las **entrevistas referentes al fenómeno volcánico**, es decir, al proceso geológico en sí mismo, deberían realizarlas únicamente **personal científico experto en volcanología**, capaz de transmitir la información de manera clara y basada en la evidencia científica.

|||||

Durante el **periodo de calma** previo a la crisis volcánica, es recomendable que los medios desarrollen un **plan de cobertura editorial**, determinando qué tipo de información necesita su audiencia y cómo se comunicará de manera efectiva.

|||||

La **formación de periodistas y editores** es crucial **para asegurar que comprenden los procesos que ocurren durante una erupción volcánica** y los términos científicos utilizados para describirlos, de forma que se garantice que pueden informar de manera responsable sobre los potenciales peligros y el impacto esperado.

|||||

Se debe mostrar siempre **sensibilidad y respeto hacia la población afectada por la crisis volcánica**.

|||||

Aunque la erupción haya finalizado, la crisis volcánica puede continuar durante un largo periodo de tiempo, por lo que es muy importante **seguir proporcionando información actualizada sobre las zonas de peligro** (por ejemplo, aquellas con emanaciones de gases), las tareas de recuperación y los esfuerzos de cooperación.

Para la sociedad:

|||||

Es primordial siempre tomar como referencia **fuentes de información oficiales**, tanto para recibir información y formación **antes de una crisis volcánica como durante una situación de emergencia y en la fase de recuperación.**

|||||

Durante el periodo de calma previo a la crisis volcánica, es fundamental **conocer el territorio, preservar la geodiversidad e informarse sobre los peligros volcánicos** directos e indirectos a los que se puede estar expuesto, y qué medidas de protección se deben tomar.

|||||

Previo a una crisis volcánica, es fundamental **familiarizarse con el plan de emergencias** establecido por las autoridades, las **rutras de evacuación** y los **puntos de encuentro**, así como **permanecer atento al nivel de alerta de actividad volcánica** declarado. Es importante también seguir lo indicado en el **manual de Protección Civil para preparar los enseres necesarios** de cara a una posible emergencia. Además, se debe planificar cómo proteger y evacuar a las mascotas y al ganado.

|||||

Durante el periodo de unrest, es crucial que la ciudadanía informe a las autoridades locales, quienes a su vez deben comunicar al comité científico, si observan anomalías destacadas (por ejemplo: un fuerte olor a azufre, emanación de vapor o humo del suelo, etc.). Esta información puede ser relevante y complementar los datos obtenidos por la red de vigilancia volcánica.

|||||

Una vez iniciada la erupción hay que mantener la calma, no acercarse al volcán, respetar la zona de exclusión impuesta y atender a las instrucciones de las autoridades. En caso de emisión de ceniza, es necesario proteger las vías respiratorias con mascarilla, incluso en zonas alejadas, si se observan partículas en el aire. Esta, junto a otras recomendaciones de salud se pueden encontrar en la *Guía de información al ciudadano ante el riesgo volcánico*, de la Dirección General de Protección Civil y Emergencias.

|||||

La opinión ciudadana es de gran importancia para que el personal científico pueda considerar las dudas y preocupaciones de quienes viven en zonas volcánicas y mejorar la comunicación sobre el riesgo volcánico. En este sentido, **la creación de comités ciudadanos** para abordar estas inquietudes resulta de gran utilidad.

cuatro



Listado de centros

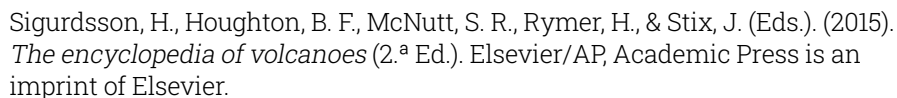
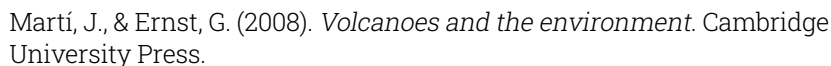
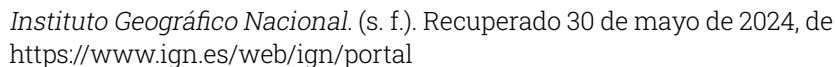
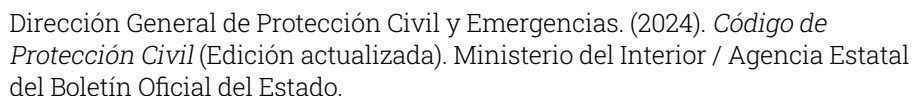
|||||

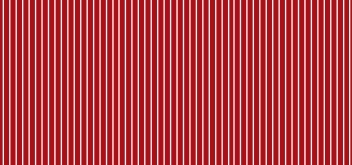
CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Geociencias Barcelona (GEO3BCN, CSIC)	www.geo3bcn.csic.es/	direccion.geo3bcn@csic.es
Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC)	www.igme.es	sec.dg@igme.es
Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC)	www.ieo.es	webmaster@ieo.csic.es
Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT, CSIC-UGR)	www.iact.csic.es/	direccion.iact@csic.es
Instituto de Geociencias (IGEO, CSIC-UCM)	www.igeo.ucm-csic.es/	direccion.igeo@csic.es
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, CSIC)	www.idaea.csic.es/	direccion.idaea@csic.es
Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA, CSIC)	www.ipna.csic.es/	direccion.ipna@csic.es
Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS, CSIC)	www.irnas.csic.es/	direccion.irnas@csic.es
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, CSIC-UIB)	www.imedeaiuib-csic.es/	direccion.imedeaiuib@csic.es
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN, CSIC)	www.icman.csic.es/	direccion.icman@csic.es

cinco



Para saber más





Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

EDITORIAL

CSIC

SCIENCE  POLICY