

Peligro y vigilancia volcánica en Costa Rica

Geoffroy Avard^{* α}, Mauricio M. Mora^β, Henriette Bakkar^{γ,δ}, Guillermo E. Alvarado^ε,
Mario Angarita^α, Monserrat Cascante^{α,ζ}, J. Maarten de Moor^α, María Martínez^α,
Cyril Muller^α, Javier Pacheco^α, Paulo Ruiz^β, Gerardo J. Soto^β

^α Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA), Universidad Nacional, Costa Rica.

^β Escuela Centroamericana de Geología y Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE), Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

^γ Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM-ICE),

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Costa Rica.

^δ Victoria University of Wellington, New Zealand.

^ε Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), Costa Rica.

^ζ University of Oregon, Eugene, OR, USA.

RESUMEN

Costa Rica alberga diez complejos volcánicos y presenta una elevada actividad sísmica debido a su ubicación dentro de un marco tectónico complejo, donde interactúan las placas del Cocos, Nazca, Caribe y la microplaca de Panamá. Tres de los cinco volcanes históricamente activos han tenido frecuentes erupciones durante el 2019. Los institutos que vigilan los volcanes de Costa Rica son el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA) y la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE que agrupa a la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y al Observatorio Sismológico y Vulcanológico del Arenal y Miravalles del Instituto Costarricense de Electricidad, acrónimos en orden: ECG, UCR, OSIVAM e ICE). Estos institutos se enfocan principalmente en los volcanes que representan un alto riesgo para la capital San José y la Gran Área Metropolitana, en el centro de Costa Rica (2.2 millones de habitantes), y aquellos cerca de centrales hidroeléctricas y geotérmicas. La vigilancia se apoya en una red de 59 estaciones sísmicas, 5 medidores de infrasonido, 25 sitios GPS permanentes, 2 DOAS, 3 MultiGAS permanentes, 13 cámaras web y análisis sistemático de muestras en los laboratorios de geoquímica y petrología. Estas instituciones comunican sus resultados de forma rutinaria a las autoridades a cargo de la gestión de peligros nacionales e internacionales (Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias y *Volcanic Ash Advisory Centre*, respectivamente), y permanecen en la búsqueda permanente de colaboraciones científicas.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.141161> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

Costa Rica es un pequeño país (51100 km²) que hace parte del istmo de América Central. La interacción entre las placas del Caribe, Cocos y Nazca, y la microplaca de Panamá, generó un contexto tectónico muy complejo (Figura 1). La placa del Cocos se subduce bajo las placas Caribe y la microplaca de Panamá a una velocidad de 78 mm/año [Protti et al. 2012]. El punto caliente de las Galápagos y el borde divergente de las placas del Cocos y Nazca han generado 3 tipos de rugosidad en la placa del Cocos: suave al norte, irregular al centro por la presencia de montes submarinos, y escarpado por la cordillera volcánica submarina del Cocos al sur, una cadena de 1 hasta 2.5 km de altura y de 320 km de ancho. Cambios geodinámicos y variaciones en la morfología de la losa de la placa en subducción han producido las cordilleras volcánicas de Guanacaste al norte, y Central al centro de Costa Rica, así como la zona no volcánica de Talamanca al sur. Diez complejos volcánicos forman el arco volcánico moderno (principalmente for-

mados durante los últimos 600 ka, Figura 2A), dentro de los cuales los volcanes Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, Irazú y Turrialba han presentado actividad histórica (desde 1700). Los volcanes Poás, Irazú y Turrialba, al igual que los volcanes dormidos Barva y Platanar-Porvenir, se ubican a menos de 50 km de distancia de la Gran Área Metropolitana (que incluye la capital San José, así como las ciudades de Heredia, Alajuela y Cartago). La Gran Área Metropolitana reúne ~45% de la población del país (aprox. 2.2 millones de habitantes) y una parte importante de la infraestructura y actividad económica del país. Todos los complejos volcánicos son parte de parques nacionales (lo que no siempre impide la explotación agrícola, ni la presencia de fincas en zonas elevadas de los volcanes) que juntos atraen más de 450 000 visitantes por año.

1.1 Actividad volcánica reciente

El volcán Arenal inició un periodo eruptivo con una dramática erupción peleana el 29 de julio de 1968, matando a 78 personas. La actividad magmática continuó

* Autor de correspondencia: geoffroy.avard@una.cr

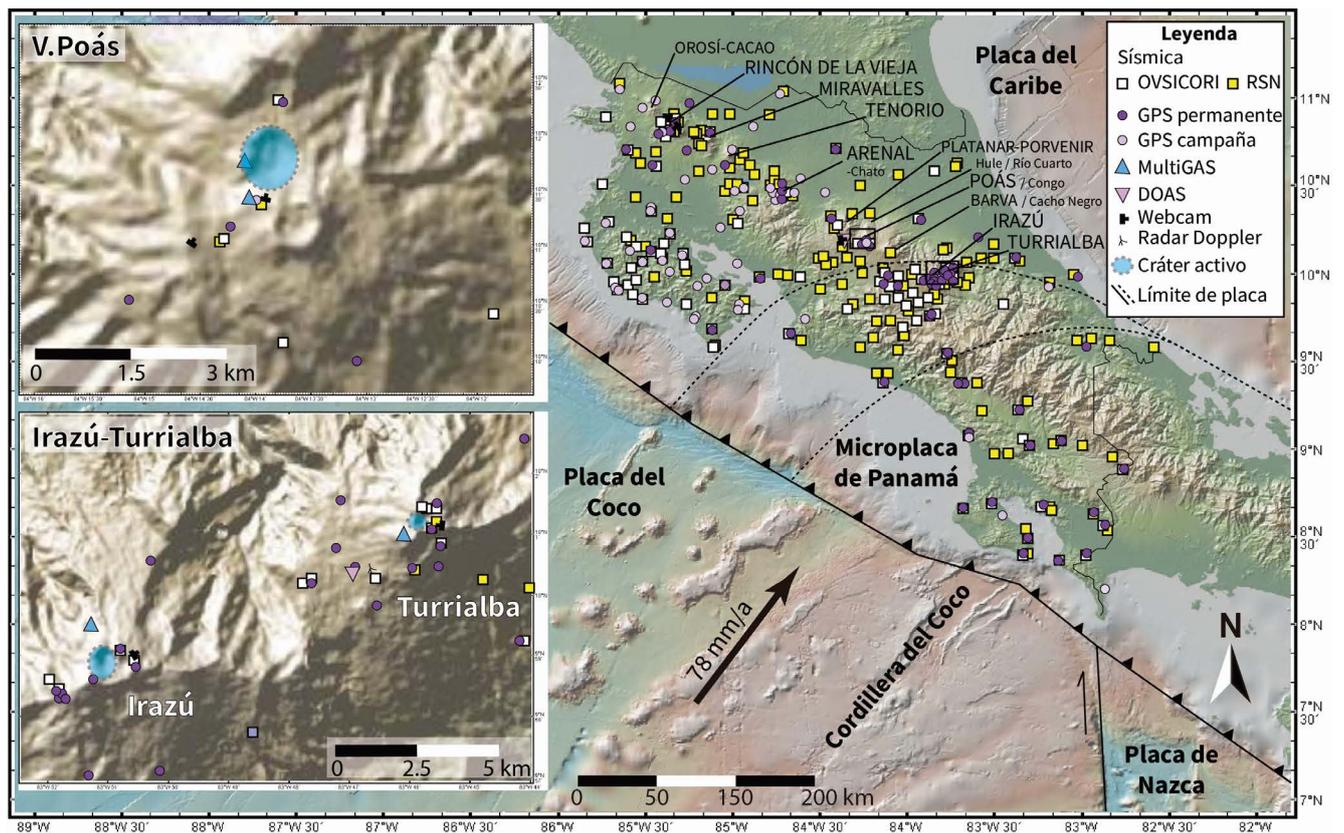


Figura 1: Mapa general de Costa Rica que muestra el contexto tectónico y la red de monitoreo del OVSICORI-UNA y de la RSN (UCR-ICE) para la vigilancia tectónica y volcánica en el 2019. Los detalles de la red se presentan en la [Tabla 1](#). Los mapas de la izquierda detallan los complejos volcánicos Poás e Irazú-Turrialba.

durante 42 años y finalizó en octubre del 2010 [Mora et al. 2013; Alvarado 2021], matando otras 3 personas (las últimas dos fueron víctimas de un flujo piroclástico en el 2000). Desde esta fecha, la actividad se mantiene muy baja, dominada por una desgasificación débil de gases hidrotermales y la estabilización del edificio [Muller et al. 2014].

El volcán Turrialba comenzó a despertarse en 1996, con enjambres sísmicos seguidos por 4 emisiones freatomagmáticas de ceniza (1 a 5% juvenil) entre 2010 y 2013. A partir de octubre del 2014 inició un periodo de erupciones freatomagmáticas a vulcanianas [Alvarado et al. 2016; de Moor et al. 2016b] que escaló hasta un clímax en el 2016, con erupciones vulcanianas (Figura 2B). Este periodo fue seguido por dos años de actividad freática y estromboliana discontinua antes de disminuir de manera significativa (boletín anual del 2020 del OVSICORI-UNA, y boletines de la RSN).

La actividad de los volcanes Poás y Rincón de la Vieja está dominada por manifestaciones hidrotermales tal como lagos calientes hiper-ácidos con erupciones freáticas/freatomagmáticas esporádicas, y desgasificación vigorosa. Ambos volcanes presentan periodos de erupciones freatomagmáticas (Figura 2A–B) desde al menos 1966 para el Rincón de la Vieja, y desde el 2006 para el Poás [de Moor et al. 2016a; Battaglia et al. 2019]. Recientemente, los dos volcanes han presentado una acti-

vidad importante en el 2017 (Figura 2A) con erupciones freatomagmáticas energéticas y una actividad estromboliana débil en el Poás [Madriral y Lücke 2017; Salvage et al. 2018]. Otro periodo de actividad freatomagmática significativa fue observado en el Rincón de la Vieja en el 2020.

2 VIGILANCIA VOLCÁNICA EN COSTA RICA Y RED DE INVESTIGACIÓN

La emergencia nacional generada por la erupción del volcán Irazú (1962–1965) condujo a que se realizaran los primeros trabajos de vigilancia volcánica, los cuales incluyeron el despliegue de equipo sismológico y geofísico, la construcción de un observatorio vulcanológico temporal en 1964 (el segundo en América Latina, después del de Parícutín, en México), el estudio de lahares y contaminación por ceniza, así como la implementación de medidas de mitigación y alerta en caso de lahares. Lo anterior fue el impulso para la creación de la Defensa Civil que luego se convirtió en la Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias (CNE) en 1969 [Alvarado 2021].

Los institutos de monitoreo sismológico y vulcanológico son el Observatorio Sismológico y Vulcanológico del Arenal y Miravalles del Instituto Costarricense de

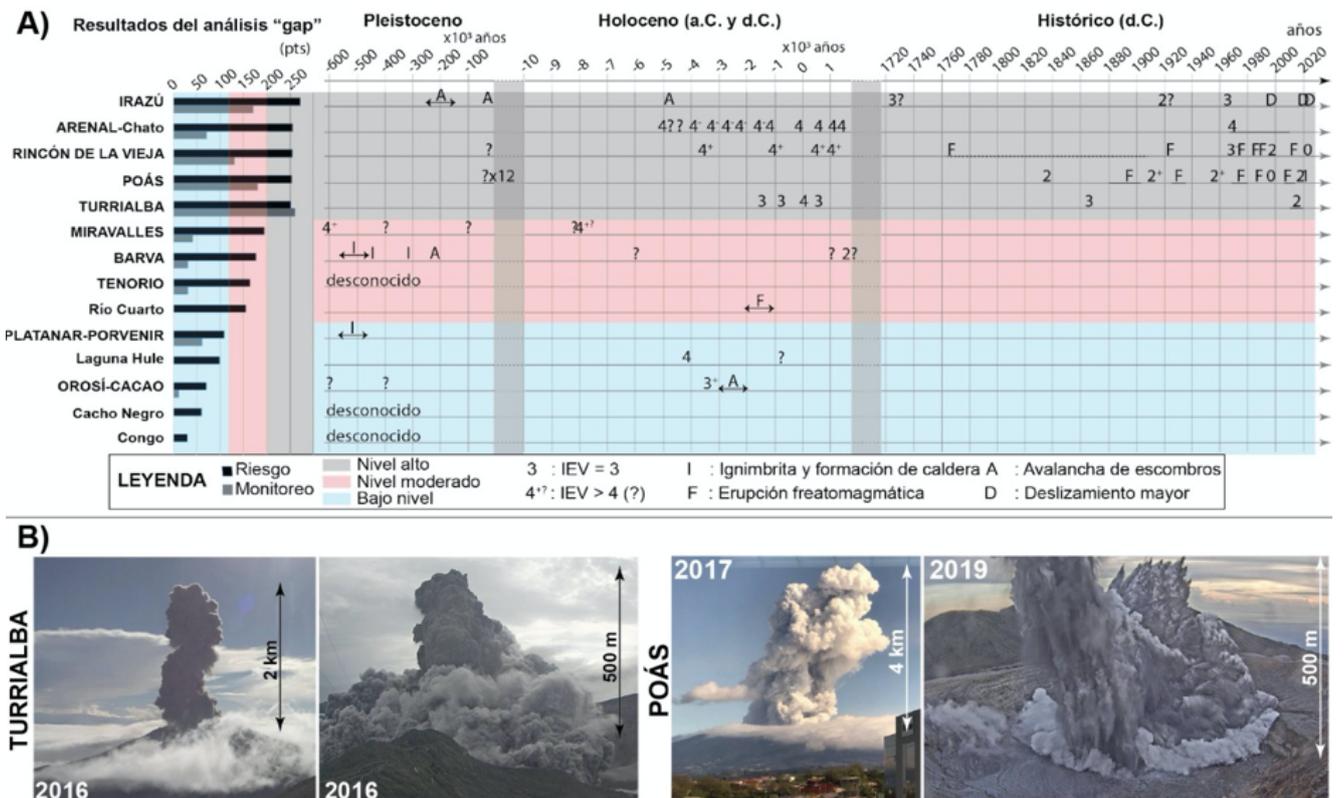


Figura 2: [A] Cronología de la actividad eruptiva conocida o estimada en Costa Rica con el posible IEV correspondiente (IEV= Índice de Explosividad Volcánica; compilado a partir de diversas fuentes), y resultados del "gap analysis" realizado en el 2020 (ver detalles en la Sección 5). Las fechas figuran como negativas para el periodo antes de Cristo (a.C) y positivas para el periodo después de Cristo (d.C). Bandas verticales grises muestran un cambio en la escala de tiempo, signo de interrogación asociado a un número se refiere a una incertidumbre sobre la magnitud del evento, o al hecho que no IEV pudo ser estimado. F: corresponde a un periodo con frecuentes erupciones freatomagmáticas para cuales no IEV puede ser estimado, I y A: respectivamente ignimbrita y avalancha de escombros sin estimación del IEV. D: deslizamiento mayor no asociado a actividad eruptiva pero que representa un peligro. "Desconocido" se refiere a una falta completa de conocimiento sobre la actividad pasada [B] Izquierda: Erupciones freatomagmáticas del volcán Turrialba en el 2016 que generaron una columna de 2 km de altura (izquierda) y un pequeño flujo piroclástico debido a un colapso de columna (derecha). Derecha: erupciones freatomagmáticas del volcán Poás el 14 de abril del 2017 (izquierda), foto tomada desde el Valle Central a 30 km de distancia, donde se puede ver una pluma rica en vapor de 4 km de altura. Esta erupción modificó la topografía del cráter, con la destrucción del domo formado en 1955. A la derecha, foto de una erupción freatomagmática moderada (el jet alcanzó aprox. 500 m de altura) tomada el 30 de septiembre del 2019 desde el borde del cráter, a 600 m de distancia. Balísticos centimétricos alcanzaron la estación MultiGAS a 400 m de distancia a sotavento del cráter. Todas las fotos fueron tomadas por las cámaras web del OVSICORI-UNA, con excepción de la del Poás en 2017 (crédito: Jorge Villalobos Chavarría).

Electricidad (OSIVAM-ICE), la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (ECG UCR), y el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA). El OSIVAM-ICE en conjunto con la UCR forman la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE), por lo que varias estaciones del OSIVAM-ICE se incluyen en la RSN. La creación de redes de monitoreo se convirtió en una necesidad, ya que el último episodio eruptivo del Arenal continuó durante cuatro décadas después del catastrófico inicio en 1968. Todos éstos son institutos de investigación creados para monitorear, documentar y estudiar la actividad tectónica, volcánica y geotérmica

en el país.

El despertar del volcán Arenal en 1968, y la ocurrencia del terremoto de Tilarán en abril de 1973 (Mw 6.5), motivaron al ICE a implementar, en mayo de 1974, la primera red sísmica telemétrica (analógica) en Costa Rica, en la región de Guanacaste, debido a la importancia del Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobici-Sandillal en las cercanías del volcán Arenal. La red se amplió para incluir la cobertura de plantas geotérmicas cerca del volcán Miravalles en 1994, y luego en Borinquen y Las Pailas al pie del volcán Rincón de la Vieja. El Arenal, siendo uno de los volcanes más activos de Latinoamérica en aquel entonces, también motivó

la creación del Observatorio Volcanológico del Arenal el 29 de julio de 1988, posteriormente rebautizado como OSIVAM-ICE en 1996 como resultado de la expansión de los sistemas de monitoreo. En la actualidad, OSIVAM-ICE cuenta con una red sismológica con más de 43 estaciones sísmicas para monitorear la sismicidad volcánica, tectónica e inducida por el hombre, para la seguridad de la infraestructura de generación de energía en la Cordillera de Guanacaste, incluyendo los volcanes Rincón de la Vieja, Miravalles, Tenorio y Arenal. Veinticinco de estas estaciones (4 de banda ancha, 21 de periodo corto) son para monitorear la actividad volcánica por el OSIVAM-ICE y compartidas con la RSN.

Desde 1983, la RSN (originalmente creada en 1982) corresponde con el convenio de colaboración interinstitucional entre la ECG de la UCR, y el ICE. En el 2019, la RSN (UCR e ICE en conjunto) maneja una red de 210 estaciones sismológicas a través del país (Figura 1). El monitoreo volcánico de la RSN es primordialmente sismológico (18 sensores de banda ancha y 21 de periodo corto), aunado con observaciones directas a partir de 6 cámaras web y datos complementarios adquiridos en el campo, los cuales son analizados por el UCR. La rama UCR de la RSN se enfoca principalmente en los volcanes Poás, Turrialba e Irazú, mientras que el ICE pone su énfasis en los volcanes Rincón de la Vieja, Tenorio, Miravalles y Arenal, debido a la infraestructura eléctrica gestionada por el ICE en las cercanías de estos edificios volcánicos. La red de monitoreo de la RSN (UCR e ICE) se detalla en la Tabla 1. La RSN cuenta con un laboratorio geoquímico y petrológico para muestras acuosas y de roca, que en conjunto con otros laboratorios de la Universidad de Costa Rica, permiten a la RSN llevar a cabo investigaciones específicas [Lücke y Calderón 2016]. La RSN conduce, también, campañas de mediciones de gravedad para la investigación específica en volcanes [Argüello et al. 2019]. La mayoría del trabajo de la RSN en volcanes se ha enfocado en su geología, estratigrafía y amenazas.

El OVSICORI-UNA se creó formalmente en 1985 como un instituto de investigación de la UNA, sin embargo, el trabajo de campo y el monitoreo volcánico se llevaba a cabo como parte de un programa del Departamento de Geografía desde 1977. En el 2019, el OVSICORI maneja una red de 90 estaciones sismológicas de banda ancha con telemetría para análisis en tiempo casi real, la cual provee la cobertura de todo el país (Figura 1). Esta densa red sísmica puede localizar eventos tectónicos de magnitudes negativas. El monitoreo volcánico cubre los 10 complejos volcánicos potencialmente activos, con un enfoque primario en Turrialba, Irazú, y Poás, debido a los peligros potenciales y la alta exposición de la población o actividades económicas en caso del incremento de actividades magmáticas-hidrotermales. El monitoreo volcánico del OVSICORI-UNA se basa principalmente en estaciones continuas permanentes en tiempo casi real, las cuales se detallan en la Tabla 1. Además de estaciones sísmi-

cas, GNSS y MultiGAS, varios parámetros geoquímicos (pH, parámetro de óxido-reducción, salinidad, temperatura y flujo de calor) son automáticamente monitoreados en tiempo casi real alrededor de manantiales en los volcanes Rincón de la Vieja y Barva (estaciones geoquímicas Campbell Scientific para manantiales, [Sáenz-Vargas 2020]). El observatorio cuenta, además, con laboratorios de geoquímica y petrología en donde se complementa periódicamente la base de datos de monitoreo con los análisis de fluidos (gaseosos y acuosos) y muestras de rocas.

El OVSICORI-UNA y la RSN han colaborado desde 2010 compartiendo datos sismológicos en tiempo real y comunicándose frecuentemente sobre la interpretación de los datos y la evaluación de los peligros. Actualmente, se están llevando a cabo proyectos de colaboración con el fin de: 1) automatizar el monitoreo sísmico para generar un análisis rápido del tiempo, la frecuencia y la ubicación de las señales sísmicas continuas y discretas, para evaluar los cambios rápidos en la dinámica del sistema volcánico y tener una comunicación pronta con las autoridades; 2) llevar a cabo investigaciones para comprender mejor las fuentes sísmicas y la dinámica volcánica [e.g. van der Laat 2020]. Los drones también son utilizados por la RSN, OVSICORI-UNA y la CNE para monitorear variaciones topográficas (depósito de cenizas, impactos balísticos, deslizamientos). OVSICORI-UNA lleva a cabo una aplicación más amplia de los drones para realizar mediciones directas de gas en las plumas volcánicas (miniDOAS y mini-MultiGAS; [de Moor et al. 2019]) y el muestreo de lagos cratéricos.

En el 2019, el seguimiento estuvo a cargo de 16 científicos (OVSICORI-UNA: 5 doctores y 1 magister, RSN: 7 doctorados y 3 másteres), 7 asistentes de laboratorio (OVSICORI-UNA: 3, RSN: 4) y 11 técnicos (OVSICORI-UNA: 7, RSN: 4). En caso de crisis es posible contar con el apoyo de todo el personal de ambas instituciones (alrededor de 30 personas del OVSICORI-UNA y unas 13 personas además de estudiantes de la RSN). Durante la crisis volcánica del Turrialba durante el 2014–2018, el OVSICORI-UNA pudo vigilar el volcán 24/7 durante unos pocos meses en el 2016 utilizando todo el personal.

La mayor parte de la información generada por los dos grupos de vigilancia está disponible en tiempo real en sus respectivos sitios web* y las bases de datos están disponibles a pedido para la investigación en colaboración. Los datos son accesibles de forma remota, lo que permite realizar investigación virtual 24/7 desde cualquier dispositivo de cómputo.

*<http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php>; <https://rsn.ucr.ac.cr/>

Tabla 1: Distribución de la red de monitoreo volcánica del OVSICORI-UNA (normal) y de la RSN (UCR-ICE) (**en negrita**) en el 2019. BA = sismómetros de banda ancha; CP = sismómetros de corto periodo; C = Campaña de mediciones

Equipos	Volcán								
	Turrialba	Poás	Rincón de la Vieja	Irazú	Arenal	Miravalles-Tenorio	Barva	Platanar	Orosí
BB	5 + 5	4 + 2	2 + 1	4 + 2	1 + 1	2 + 2	1 + 2	1 + 3	-
SP	-	-	5	-	4	12	-	-	-
Infrasound	2	1	1	1	-	-	-	-	-
GPS	6+6C	4+1C	3 + 1	6+4C	3	4	-	-	1+1C
MultiGAS	1	1	(1)*	1	C	-	-	-	-
DOAS	1	1	C	-	-	-	-	-	-
Webcam	2 + 2	3 + 2	2 + 2	-	-	-	-	-	-
Radar	1	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₂ ExpoGAS	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Spring	-	-	2	-	-	-	1	-	-
Meteo	1**	1**	1	1*	-	-	1	-	-

* Destruído

** Gestionado por el IMN (Instituto Meteorológico Nacional)

3 PELIGRO VOLCÁNICO Y MITIGACIÓN

Las cimas de los principales complejos volcánicos en Costa Rica están ubicados en parques nacionales, lo cual reduce el riesgo de exposición humana a amenazas volcánicas. Sin embargo, estas áreas son también destinos turísticos, vitales para la economía del país. Además, en los alrededores se desarrollan actividades de agricultura y ganadería—otro importante sector económico—y plantas hidroeléctricas y geotérmicas. Como resultado, gran parte de la población del país vive dentro de un radio de 50 km alrededor de un volcán activo.

Para abordar esta vulnerabilidad, los mapas de amenaza volcánica han evolucionado desde mapas basados exclusivamente en geología a mediados de los 80s, hasta los más recientes que incluyen modelamiento y Sistemas de Información Geográfica (SIG). También se han utilizado mapas de amenaza cualitativos y administrativos con varios fines en diferentes situaciones.

Una comunicación eficiente también es clave en la protección de los intereses nacionales. El OVSICORI-UNA es el principal responsable de comunicar los niveles de actividad de todos los volcanes de Costa Rica. Con este propósito, el instituto desarrolló una escala para describir los diferentes niveles de actividad, que va desde 0 (sin desgasificación, sin deformación y sin actividad sísmica; i.e. volcán dormido) hasta 5 (erupción importante en progreso o esperada, actividad sísmica constante de gran amplitud, deformación rápida, o desgasificación intensa) (Figura 3). Además, ambas entidades (el OVSICORI-UNA y la RSN) proveen información técnica de expertos a la CNE, la institución gubernamental a cargo del manejo de amenazas y prevención de riesgos, mapas de amenazas, nivel de alerta y toma-

dores de decisiones. La RSN y la CNE también trabajan en mapas de amenaza (los primeros se realizaron para Arenal en 1979 y en 1986 para la cordillera volcánica Central, el cual fue hecho por Paniagua y Soto [1986]), y el OVSICORI-UNA está desarrollando la capacidad de simular diferentes amenazas volcánicas relacionados a diversos escenarios eruptivos con el fin de mejorar la evaluación de la amenaza y el riesgo, así como la mitigación. Los mapas geológicos de la mayoría de los edificios volcánicos, disponibles a escala de 1:50000, o más grandes, han sido desarrollados por el personal del ECG de la UCR y el RSN, y actualmente varios de estos mapas están bajo revisión.

Cuando se detecta una erupción, OVSICORI-UNA envía, como primera respuesta, una alerta vía correo electrónico, grupos de mensaje tipo chat (grupos de *WhatsApp*) y llamadas telefónicas a la CNE, a los Parques Nacionales, al *Volcanic Ash Advisory Centre* (VAAC), al aeropuerto internacional Juan Santamaría (SJO) cerca de San José y, a las compañías turísticas y de aviación privadas. El OVSICORI-UNA y la RSN igualmente publican la información en las redes sociales* seguidas por los medios de prensa y la población en general (e.g., Facebook y algunas comunidades organizadas comparten esta información vía grupos de *WhatsApp*).

Durante una crisis volcánica, el OVSICORI-UNA automáticamente corre modelos de dispersión y deposición de ceniza dos veces al día, utilizando el método Ash3D [Schwaiger et al. 2012]. Este método, es un modelo tridimensional euleriano que depende de los parámetros de entrada de la erupción (localización de la fuente, altura de la columna eruptiva, duración, etc.) y de los parámetros atmosféricos globales de NOAA,

*<https://www.facebook.com/OVSICORI/>; https://twitter.com/OVSICORI_UNA; <https://www.facebook.com/RSN.CR>

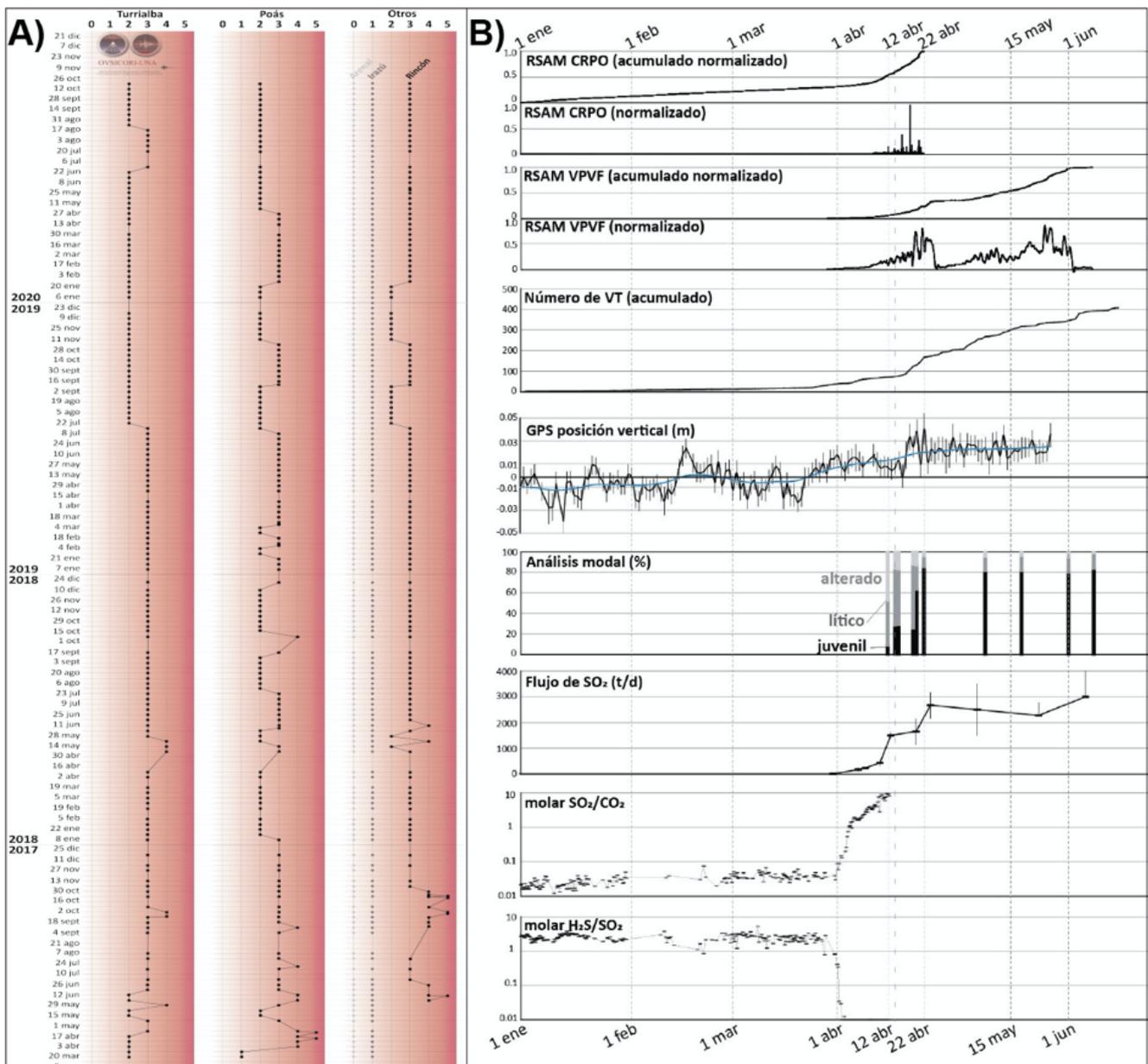


Figura 3: [A] Ejemplo de la evolución del nivel de actividad de los volcanes, actualizado semanalmente, como se puede ver en la página web del OVSICORI-UNA. La escala comienza con un nivel 0 (dormido), pasa por un nivel 3 (el volcán se considera en erupción), y alcanza un máximo de 5 (emisión intensa de ceniza, alta sismicidad, deformación rápida o desgasificación intensa). [B] Secuencia de los datos sísmicos, de deformación, de la química de los gases y de petrología para la crisis eruptiva del volcán Poás en 2017 registrados por la red de monitoreo del OVSICORI-UNA.

para simular la dispersión y depositación de la ceniza. Los resultados de los modelos se publican en la página web del OVSICORI-UNA y se utilizan para anticipar las áreas con mayor posibilidad de afectación en caso de un evento volcánico. Asimismo, el OVSICORI-UNA complementa sus resultados utilizando otro modelo implementado por NOAA, llamado Trayectoria Integrada Lagrangiana de Partícula Única Híbrida (HySPLIT, por sus siglas en inglés), el cual rastrea la trayectoria de una partícula emitida a la atmósfera en un lugar y elevación específica [Stein et al. 2015]. Las plataformas de redes

sociales son utilizadas para confirmar la información de áreas afectadas.

Debido a las crisis volcánicas de Turrialba y Poás desde 2014, el OVSICORI-UNA inició evaluaciones de la calidad del aire en centros urbanos que han sido expuestos a caída de ceniza (analizando automáticamente PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀, así como SO₂ en el aire). Específicamente, en el Parque Nacional Volcán Poás se implementó un sistema de alerta por concentraciones de SO₂, llamado ExpoGAS, instalado en el mirador turístico. Conjuntamente, el OVSICORI-UNA y otros institu-

tos (Laboratorio de Química de la Atmósfera, LAQAT-UNA, Escuela de Ciencias Ambientales, EDECA-UNA, y el Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas, IRET-UNA) cuantifican el posible impacto y alcance de los efectos de las emisiones volcánicas en la población, visitantes a las inmediaciones de los cráteres volcánicos y en el medio ambiente [Herrera et al. 2014].

4 DIFUSIÓN Y DISEMINACIÓN DE LA INFORMACIÓN

El OVSICORI-UNA, la RSN y la CNE participan activamente en la comunicación a nivel nacional. El grupo de vigilancia volcánica del OVSICORI-UNA se reúne cada semana, o en cualquier momento que la actividad volcánica lo justifique, para actualizar su interpretación y comunicación (Figura 3)*. El OVSICORI-UNA publica un boletín diario, semanal y anual. La RSN también publica su boletín semanal y boletines especiales cuando la actividad cambia. Ambos institutos usan correos electrónicos y las redes sociales: *Facebook* (aprox. 13% y 8% de la población de Costa Rica sigue las páginas *Facebook* de OVSICORI-UNA y de la RSN, respectivamente), *Twitter*, *Instagram* y *WhatsApp*. La RSN tiene un canal *YouTube*[†] donde muestran las cámaras web en vivo y explicaciones volcanológicas. Ambos institutos envían actualizaciones, explicaciones, y material educativo directamente a la población mediante los medios de comunicación clásicos (televisión, periódico y radio), y hacen intervenciones directas en las comunidades y escuelas.

Desde el 2015, la RSN programa exitosamente actividades en escuelas alrededor de los volcanes Turrialba y Poás[‡]. Adicionalmente, se han organizado capacitaciones para los guías turísticos de los parques nacionales por parte de la CNE y el OVSICORI-UNA, y capacitaciones para profesores de las escuelas alrededor del volcán Turrialba por parte del RSN-UCR y el *Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales* (LANAME-UCR), en conjunto con el *Japan International Cooperation Agency* (JICA). En el 2017, doce profesores del Ministerio de Educación Pública (MEP) se graduaron del programa llamado “Maestros del Volcán”[§].

La RSN y el OVSICORI-UNA reciben visitas de profesores y niños de primaria con frecuencia. Debido a la pandemia de la COVID-19 en el 2020, esta forma de comunicación se trasladó a virtual, así como los cursos universitarios de ambos institutos.

*<http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/nivel-de-actividad-volcanica>

†<https://www.youtube.com/user/RSNCostaRica>

‡<https://www.ucr.ac.cr/noticias/2016/11/28/proyecto-capacitara-a-turrialbenos-para-entender-y-actuar-en-caso-de-actividad-volcanica.html>; <https://www.elpais.cr/2016/05/28/ucr-comparte-informacion-del-volcan-con-comunidad-turrialbena/>

§<https://www.nacion.com/ciencia/aplicaciones-cientificas/turrialba-gradua-a-sus-primeros-maestros-del-volcan/M64EWHBO TJDXPFMARUPUJOMI/story/>; <https://www.youtube.com/watch?v=wKEv0H0MVw>

Además, ambos grupos de monitoreo son asesores técnicos de la CNE, y están en comunicación frecuente con las autoridades de los parques nacionales debido a que cada complejo volcánico es un parque nacional diferente. Los grupos participan en capacitaciones de guías turísticos, responden a las solicitudes de los políticos, y a las expectativas públicas o personales relacionadas con los peligros y riesgos volcánicos y sísmicos, así como en relación a sus impactos sobre la población expuesta [van Manen et al. 2015; Ortiz-Apuy 2020; Sáenz-Vargas 2020].

Gracias a una base de datos de más de cuatro décadas de monitoreo, numerosos y diversos tópicos de investigación en geofísica y geoquímica volcánica fueron abordados a partir de colaboraciones con científicos nacionales e internacionales. Algunos ejemplos de estas colaboraciones incluyen: (i) la instalación y mantenimiento exitoso, por parte de OVSICORI-UNA, de una red de DOAS como parte del programa NOVAC y MultiGAS+DOAS para el monitoreo de gases en Costa Rica [Galle et al. 2010; de Moor y Kern 2015; de Moor et al. 2016a], (ii) el monitoreo y estudio de la química de los gases sobre el segmento volcánico Costa Rica-Nicaragua [Aiuppa et al. 2014; de Moor et al. 2017], (iii) el estudio del ciclo de los volátiles y de los isótopos estables en los fluidos volcánicos [Fischer et al. 2015; Ramírez-Leiva et al. 2017; Barry et al. 2019], (iv) experimentos e investigación en sismología volcánica (VOLUME Project, Bean et al. [2009]), y (v) talleres internacionales en técnicas de monitoreo (PASI: *Volcanic Hazards and Remote Sensing in Pacific Latin America* en el 2011[¶]; Rose et al. [2013]; Soto et al. [2015]; taller NOVAC en el 2015^{||}; taller GPS para los observatorios de América Latina en el 2019).

A principios de 2020, el CNE inició, junto con otras instituciones estatales, un programa intensivo para la colocación de señales informativas de advertencia, así como grandes paneles educativos con información sobre estructura volcánica, historia y ejemplos de peligros volcánicos pasados.

Otro ejemplo es la edición múltiple y reimpresión de libros educativos e informativos sobre los volcanes costarricenses desde 1989. Entre ellos se encuentra el libro geocientífico más vendido a nivel nacional que contiene información completa sobre todos los volcanes [Alvarado 2021].

5 NECESIDADES, RETOS, Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En 2020, el OVSICORI-UNA, la RSN y la CNE realizaron juntos un “gap analysis” para evaluar las debilidades y coordinar esfuerzos futuros para monitorear mejor los volcanes en Costa Rica. Este análisis siguió la

¶<https://vhub.org/resources/303>

||<https://deepcarbon.net/feature/report-5th-novac-meeting-turrialba-volcano-costa-rica>

metodología descrita por Ewert [2007], la cual consiste en clasificar los volcanes según el riesgo que ellos representan. De esta manera, se asocia una puntuación a cada volcán según su actividad pasada y actual, la afectación ocurrida en el pasado y la actividad humana presente así como su vulnerabilidad. La red de monitoreo fue evaluada dando 10 puntos por equipo permanente (Tabla 1), sin incluir sismómetros de corto periodo, reflejando de esta manera el nivel de atención en el monitoreo a principios del 2020. Este análisis señaló el alto nivel de riesgo volcánico debido al reducido tamaño del país y la concentración de actividad humana alrededor de unos pocos volcanes frecuentemente activos, particularmente el Irazú. De hecho, a partir del empleo de este método, Estados Unidos consideró volcanes de alto riesgo aquellos por encima de 120 puntos, valor que incluiría a 9 de 14 volcanes en Costa Rica. Por lo tanto, se definieron 3 niveles adaptados a la situación local, como se muestra en la Figura 2A. Este análisis también enfatizó las deficiencias en la red de monitoreo, particularmente alrededor del Arenal y Rincón de la Vieja. Sin embargo, la principal debilidad detectada en este análisis es la falta de conocimiento de la actividad pasada de cada volcán, en términos de historia volcánica, áreas afectadas en el pasado y dataciones. Existe un desconocimiento general sobre la estratigrafía volcánica y el conocimiento histórico antes del siglo XVIII (Figura 2A), en gran parte debido a los bosques tropicales que cubren los depósitos. Una excepción de esto es el volcán Arenal, que tiene una historia detallada y bien conocida [Soto y Alvarado 2006].

Tanto el OVSICORI-UNA como la RSN operan a través de un presupuesto compuesto que proviene de las respectivas universidades (salarios y presupuestos operativos) y del Transitorio I a la Ley N° 8488 de Emergencias y Prevención del Riesgo, la cual expira en el 2023 (para compra de equipos de vigilancia y otros materiales). El presupuesto del OVSICORI-UNA ronda un promedio anual de US\$ 3 millones (~33% dedicado a salarios y gastos relacionados a los ~30 funcionarios y ~67% de materiales y otros gastos administrativos). El presupuesto de la RSN es de aproximadamente US\$ 1 millón (~40% en salarios y gastos relacionados y un 60% en gastos de materiales). Hoy, ambos institutos están limitados en recursos humanos y enfrentados a la amenaza de la expiración del financiamiento a través del Transitorio I a la Ley de Emergencias. A pesar de haberse implementado una mayor colaboración entre la RSN y el OVSICORI-UNA para coordinar esfuerzos, se requiere de una mayor organización, unificación y sincronización entre los institutos para asegurar la sostenibilidad de fondos y de las redes de vigilancia. Igualmente, ambos institutos están trabajando en la automatización y procesamiento de grandes volúmenes de datos geofísicos y geoquímicos a través del uso de herramientas de *machine learning*.

En términos de accidentes ocurridos en volcanes, se ha logrado un gran éxito (solamente 2 muertes en lo que

va de este siglo en comparación con 101 del siglo anterior), a pesar de que los volcanes Arenal, Poás, Turrialba y Rincón de la Vieja han estado muy activos y eruptivos durante las dos últimas décadas. Esto se ha debido principalmente a las restricciones obligatorias para los visitantes y en parte a que desde 1968 no han ocurrido erupciones con un IEV >2. Para no depender del azar, los institutos se han involucrado profundamente en la educación de la población y de los tomadores de decisiones, así como en la disminución de la vulnerabilidad en el sitio (i.e., señalización, protocolos, ejercicios de simulacros, refugios y mediciones de concentración de gas). La necesidad de un mapeo de amenazas que sea estandarizado, moderno (con topografía, historia volcánica, mapas geológicos de los diez complejos volcánicos, modelación de amenazas y sus resultantes en mapas de peligros), y que tenga en cuenta los esfuerzos previos de fuentes heterogéneas, es vital para mantener los parques nacionales volcánicos seguros. Varios volcanes requieren mayor atención en cuanto al monitoreo, como el Rincón de la Vieja, donde el terreno, el clima, la actividad volcánica y el vandalismo hacen que sea extremadamente difícil instalar y mantener equipo de monitoreo. De manera similar, los volcanes inactivos en calderas como Miravalles y Barva, que presentan enjambres sísmicos episódicos y gran deformación, requieren mayor atención. A pesar de la frecuente actividad volcánica cerca de la capital, el financiamiento para el monitoreo no está asegurado. Sin embargo, el ejercicio de "gap analysis" realizado, así como la contribución de este artículo, se encuentran entre los resultados prometedores para un progreso futuro en el esfuerzo por mejorar la investigación de los volcanes en Costa Rica.

AGRADECIMIENTOS

La RSN y el OVSICORI-UNA no habrían podido monitorear los volcanes sin la Ley Nacional de Emergencias y Prevención de Riesgos de Costa Rica N° 8488, Transitorio I. La calidad de los datos volcánicos es responsabilidad de los autores; sin embargo, no sería posible sin el apoyo de los ingenieros y técnicos de los institutos (en orden alfabético): Luis Anchía, José Francisco Arias, Mario Arroyo, José Miguel Barrantes, John Bolaños, Dagoberto Boniche, Luis Fernando Brenes, Guido Calvo, Jean Paul Calvo, Christian Garita, Oscar Guzmán, Enrique Hernández, Juan Carlos López, Luis Madrigal, Antonio Mata, Marco Miranda, Marco Naranjo, César Quesada, Arturo Ramos, Luis Andrey Rodríguez, Warren Rodríguez, Daniel Rojas, Wendy Sáenz, Carlos Sánchez, Ricardo Sánchez, Magda Taylor y Hairo Villalobos. Ningún trabajo sería posible tampoco, sin el apoyo del grupo administrativo. Floribeth Vega es la responsable de la labor de comunicación en redes sociales en el OVSICORI-UNA. Agradecemos a los parques nacionales en los volcanes de Costa Rica y a sus guar-

da parques por su colaboración. Agradecemos a Eveling Espinoza, Rafael Orozco y Pablo Forte, Magdalena Oryaëlle Chevrel, Heather Wright y Robin Campion, el editor y revisores por sus comentarios constructivos.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Geoffroy Avard escribió el manuscrito, hizo las figuras y generó datos de monitoreo petrológico. Mauricio Mora proporcionó datos e información sobre la RSN. Henriette Bakkar proporcionó información sobre el OSIVAM. Guillermo Alvarado proporcionó información histórica sobre las redes de monitoreo volcánico, los peligros volcánicos y la gestión de riesgos. Mario Angarita generó figuras y herramientas de monitoreo informático. Maarten de Moor generó datos de monitoreo de gases y comentarios constructivos. María Martínez generó datos de monitoreo geoquímico. Cyril Muller proporcionó datos de monitoreo geodésico. Javier Pacheco proporcionó datos de monitoreo sísmico. Paulo Ruiz brindó información sobre comunicación y educación. Gerardo J. Soto proporcionó información histórica, sobre peligros y mapas de peligros volcánicos. Todos los autores revisaron el manuscrito.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Ambos institutos involucrados en este informe presentan datos de monitoreo en vivo a través de sus páginas web oficiales. La base de datos así como los datos procesados (no en tiempo real) están disponibles a través de una colaboración personal o institucional únicamente (solicitar por correo electrónico al instituto o directamente al investigador encargado). Los mapas de peligros están disponibles en la página web de la CNE (https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/tipo_amenazas/vulcanismo.aspx), y sobre las páginas web de la RSN o de sus investigadores (<https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/informativos/informes-de-volcanes>; <https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Soto-4>).

DERECHOS DE AUTOR

© Autor(es) 2021. Este artículo se distribuye bajo los términos de la [Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando se dé el crédito apropiado al/los autor(es) original(es) y la fuente, proporcionando un enlace a la Creative Commons License, e indicando si se realizaron cambios.

REFERENCIAS

- Aiuppa, A., P. Robidoux, G. Tamburello, V. Conde, B. Galle, G. Avard, E. Bagnato, J. M. de Moor, M. Martínez y A. Muñoz (2014). “Gas measurements from the Costa Rica–Nicaragua volcanic segment suggest possible along-arc variations in volcanic gas chemistry”. *Earth and Planetary Science Letters* 407, págs. 134-147. ISSN: 0012-821X. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.09.041.
- Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. EUCR, EUNA, ETCR. ISBN: 978-9968-46-776-6.
- Alvarado, G. E., D. Mele, P. Dellino, J. M. de Moor y G. Avard (2016). “Are the ashes from the latest eruptions (2010–2016) at Turrialba volcano (Costa Rica) related to phreatic or phreatomagmatic events?” *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 327, págs. 407-415. ISSN: 0377-0273. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.09.003.
- Argüello, A., F. Rivera, O. H. Lücke, A. Gutiérrez y J. P. Solano (2019). “Estructura del cono piroclástico Pasquí a partir de interpretación indirecta de datos de gravedad”. *Revista Geológica de América Central* 60, págs. 61-81. DOI: 10.15517/rgac.v2019i60.36463.
- Barry, P. H., J. M. de Moor, D. Giovannelli, M. Schrenk, D. R. Hummer, T. Lopez, C. A. Pratt, Y. A. Segura, A. Battaglia, P. Beaudry y et al. (2019). “Forearc carbon sink reduces long-term volatile recycling into the mantle”. *Nature* 568 (7753), págs. 487-492. ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/s41586-019-1131-5.
- Battaglia, A., J. M. de Moor, A. Aiuppa, G. Avard, H. Bakkar, M. Bitetto, M. M. M. Fernández, P. Kelly, G. Giudice, D. Delle Donne y H. Villalobos (2019). “Insights Into the Mechanisms of Phreatic Eruptions From Continuous High Frequency Volcanic Gas Monitoring: Rincón de la Vieja Volcano, Costa Rica”. *Frontiers in Earth Science* 6. ISSN: 2296-6463. DOI: 10.3389/feart.2018.00247.
- Bean, C., A. Braiden, I. Lokmer, F. Martini y G. O’Brien (2009). *Volume Project: Volcanoes, Understanding Sub-surface Mass Movement*. Dublin, Ireland: School of Geological Sciences, University College Dublin. ISBN: 978-1-905254-39-2.
- de Moor, J. M., A. Aiuppa, G. Avard, H. Wehrmann, N. Dunbar, C. Muller, G. Tamburello, G. Giudice, M. Liuzzo, R. Moretti y et al. (2016a). “Turmoil at Turrialba Volcano (Costa Rica): Degassing and eruptive processes inferred from high-frequency gas monitoring”. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121 (8), págs. 5761-5775. ISSN: 2169-9313. DOI: 10.1002/2016jb013150.
- de Moor, J. M., A. Aiuppa, J. Pacheco, G. Avard, C. Kern, M. Liuzzo, M. Martínez, G. Giudice y T. Fischer (2016b). “Short-period volcanic gas precursors to phreatic eruptions: Insights from Poás Volcano, Costa Rica”. *Earth and Planetary Science Letters* 442, págs. 218-227. DOI: 10.1016/j.epsl.2016.02.056.

- de Moor, J. M. y C. Kern (2015). *Report on the 5th Network for the Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC) meeting, Turrialba Volcano, Costa Rica*. URL: <https://deepcarbon.net/feature/report-5th-novac-meeting-turrialba-volcano-costa-rica> (visitado 01-08-2020).
- de Moor, J. M., C. Kern, G. Avarad, C. Muller, A. Aiuppa, A. Saballos, M. Ibarra, P. LaFemina, M. Protti y T. P. Fischer (2017). "A New Sulfur and Carbon Degassing Inventory for the Southern Central American Volcanic Arc: The Importance of Accurate Time-Series Data Sets and Possible Tectonic Processes Responsible for Temporal Variations in Arc-Scale Volatile Emissions". *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18 (12), págs. 4437-4468. ISSN: 1525-2027. DOI: [10.1002/2017gc007141](https://doi.org/10.1002/2017gc007141).
- de Moor, J. M., J. Stix, G. Avarad, C. Muller, E. Corrales, J. A. Diaz, A. Alan, J. Brenes, J. Pacheco, A. Aiuppa y T. P. Fischer (2019). "Insights on Hydrothermal-Magmatic Interactions and Eruptive Processes at Poás Volcano (Costa Rica) From High-Frequency Gas Monitoring and Drone Measurements". *Geophysical Research Letters* 46 (3), págs. 1293-1302. DOI: [10.1029/2018gl1080301](https://doi.org/10.1029/2018gl1080301).
- Ewert, J. W. (2007). "System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes". *Natural Hazards Review* 8 (4), págs. 112-124. DOI: [10.1061/\(asce\)1527-6988\(2007\)8:4\(112\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2007)8:4(112)).
- Fischer, T., C. Ramírez, R. Mora-Amador, D. Hilton, J. Barnes, Z. Sharp, M. Le Brun, J. M. de Moor, P. Barry, E. Füre y et al. (2015). "Temporal variations in fumarole gas chemistry at Poás volcano, Costa Rica". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 294, págs. 56-70. ISSN: 0377-0273. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.02.002).
- Galle, B., M. Johansson, C. Rivera, Y. Zhang, M. Kihlman, C. Kern, T. Lehmann, U. Platt, S. Arellano y S. Hidalgo (2010). "Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC)—A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description". *Journal of Geophysical Research* 115 (D5). ISSN: 0148-0227. DOI: [10.1029/2009jd011823](https://doi.org/10.1029/2009jd011823).
- Herrera, J., J. F. Rojas, M. Martinez, G. Avarad, J. M. de Moor, W. Sáenz, V. H. Beita, A. Rodriguez y A. Agüero (2014). "Comparación de la composición química de partículas PM10 y PM2, 5 colectadas en ambientes urbanos y zonas volcánicas del área metropolitana de Costa Rica". *Revista de Ciencias Ambientales* 1 (48), págs. 54-64. DOI: [10.15359/rca.48-2.5](https://doi.org/10.15359/rca.48-2.5).
- Lücke, O. H. y A. Calderón (2016). "Characterization of the ashes from the 2014-2015 Turrialba Volcano eruptions by means of Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy". *Revista Geológica de América Central* 54. ISSN: 0256-7024. DOI: [10.15517/rgac.v54i0.23281](https://doi.org/10.15517/rgac.v54i0.23281).
- Madrigal, P. y O. H. Lücke (2017). "Petrographic Analysis of the Volcanic Bombs and Blocks from Poás Volcano: April-June 2017 Eruptive Period". *Revista Geológica de América Central* (57). ISSN: 0256-7024. DOI: [10.15517/rgac.v0i57.30336](https://doi.org/10.15517/rgac.v0i57.30336).
- Mora, M. M., P. Lesage, F. Albino, G. J. Soto y G. E. Alvarado (2013). "Continuous subsidence associated with the long-lasting eruption of Arenal Volcano (Costa Rica) observed by dry-tilt stations". *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards*. Ed. por W. Rose, J. Palma, H. Delgado Granados y N. Varley. Geological Society of America, págs. 45-56. DOI: [10.1130/2013.2498\(03\)](https://doi.org/10.1130/2013.2498(03)).
- Muller, C., R. del Potro, J. Biggs, J. Gottsmann, S. K. Ebmeier, S. Guillaume, P.-H. Cattin y R. Van der Laet (2014). "Integrated velocity field from ground and satellite geodetic techniques: application to Arenal volcano". *Geophysical Journal International* 200 (2), págs. 863-879. ISSN: 0956-540X. DOI: [10.1093/gji/ggu444](https://doi.org/10.1093/gji/ggu444).
- Ortiz-Apuy, E. (2020). "Evaluación de los efectos causados por la exposición a gases en ambientes frecuentados por parte de funcionarios de los parques nacionales volcán Poás y volcán Turrialba." Tesis doct. Escuela de Química Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Paniagua, S. y G. Soto (1986). "Reconocimiento de los riesgos volcánicos potenciales de la Cordillera Central de Costa Rica". *Ciencia y Tecnología* 10 (2), págs. 49-72.
- Protti, M., V. Gonzáles, J. Freymueller y S. Doelger (2012). "Isla del Coco, on Cocos Plate, converges with Isla de San Andrés, on the Caribbean Plate, at 78 mm/yr". en. *Revista de Biología Tropical* 60, págs. 33-41. ISSN: 0034-7744.
- Ramírez-Leiva, A., R. Sánchez-Murillo, M. Martínez-Cruz, H. Calderón, G. Esquivel-Hernández, V. Delgado, C. Birkel, E. Gazel, G. Alvarado y C. Soulsby (2017). "Stable isotopes evidence of recycled subduction fluids in the hydrothermal/volcanic activity across Nicaragua and Costa Rica". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 345, págs. 172-183. ISSN: 0377-0273. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2017.08.013](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.08.013).
- Rose, W., J. Palma, H. Delgado Granados y N. Varley, eds. (2013). *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards*. Vol. 498. Geological Society of America. ISBN: 9780813724980. DOI: [10.1130/SPE498](https://doi.org/10.1130/SPE498).
- Sáenz-Vargas, W. (2020). "Señales isotópicas de la naciente Santuarium en el sistema magmático hidrotermal del volcán Rincón de la Vieja." Tesis doct. Escuela de Química Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Salvage, R. O., G. Avarad, J. M. de Moor, J. F. Pacheco, J. Brenes Marin, M. Cascante, C. Muller y M. Martinez Cruz (2018). "Renewed Explosive Phreatomagmatic Activity at Poás Volcano, Costa Rica in April 2017". *Frontiers in Earth Science* 6. ISSN: 2296-6463. DOI: [10.3389/feart.2018.00160](https://doi.org/10.3389/feart.2018.00160).

- Schwaiger, H. F., R. P. Denlinger y L. G. Mastin (2012). "Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B4), n/a-n/a. ISSN: 0148-0227. DOI: [10.1029/2011jb008968](https://doi.org/10.1029/2011jb008968).
- Soto, G. J. y G. E. Alvarado (2006). "Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 157 (1-3), págs. 254-269. ISSN: 0377-0273. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2006.03.041](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.041).
- Soto, G. J., M. M. Mora y H. Delgado-Granados (2015). "Volcanes y vulcanólogos en América Latina". *Revista Geológica de América Central* (52). ISSN: 0256-7024.
- Stein, A. F., R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen y F. Ngan (2015). "NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System". *Bulletin of the American Meteorological Society* 96 (12), págs. 2059-2077. ISSN: 1520-0477. DOI: [10.1175/bams-d-14-00110.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00110.1).
- van der Laat, L. (2020). "Un análisis de los precursores sísmicos de los periodos eruptivos de 2010, 2013 y 2016 en el volcán Turrialba, Costa Rica." Tesis doct. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- van Manen, S., G. Avaró y M. Martínez-Cruz (2015). "Co-ideation of disaster preparedness strategies through a participatory design approach: Challenges and opportunities experienced at Turrialba volcano, Costa Rica". *Design Studies* 40, págs. 218-245. ISSN: 0142-694X. DOI: [10.1016/j.destud.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.06.002).