

Modelado 3D de la estructura interna del volcán Poás, Costa Rica: uso del software Leapfrog Geo

3D modeling of the internal structure of Poás volcano, Costa Rica: using Leapfrog Geo software

Marianela Molina^{1,2*}, Carlos Vargas³ y Percy Denyer^{1,2}

¹ Universidad de Costa Rica (UCR), Escuela Centroamericana de Geología (ECG), San José,
Costa Rica

² Universidad de Costa Rica (UCR), Centro de Investigación en Ciencias Geológicas (CICG),
San José, Costa Rica

³ Barrick Gold Company, Toronto, Canadá

*Autora para contacto: nela.molr@gmail.com

(Recibido: 24/02/2025; aceptado: 30/07/2025)

RESUMEN: El volcán Poás, uno de los más activos y estudiados de Centroamérica, presenta una alta actividad y complejidad en sus procesos geodinámicos, haciendo fundamental el estudio de su estructura interna. Este trabajo se centra en el modelado tridimensional del reservorio magmático del volcán Poás, utilizando para ello diversas publicaciones enfocadas en el volcán. Se seleccionaron mapas y perfiles relevantes, los cuales fueron georreferenciados e integrados en el software Leapfrog Geo. Adicionalmente, se incorporaron datos sísmicos para confirmar la ubicación general del reservorio. Se modeló un volumen total de 16 km³ que abarca tanto el volcán Poás como los edificios y estructuras volcánicas cercanas, y se representa también la interacción del vulcanismo con la zona de subducción. Este estudio destaca el potencial del modelado 3D como herramienta para la síntesis y visualización de estructuras geológicas complejas como la del volcán Poás. Si bien el modelo presentado se basa en inferencias a partir de datos limitados, representa un avance en la comprensión de la estructura interna del volcán. Además, resalta la necesidad de futuras investigaciones para mejorar la precisión del modelo y descifrar tanto sus procesos como su evolución geológica.

Palabras clave: reservorio magmático; sistema magmático; modelado volumétrico; representación 3D; subducción; geofísica.



ABSTRACT: Poás Volcano, one of the most active and studied volcanoes in Central America, exhibits high activity and complexity in its geodynamic processes, making the study of its internal structure essential. This work focuses on the three-dimensional modeling of the magmatic reservoir of Poás Volcano, using various publications dedicated to the volcano. Relevant maps and profiles were selected, geo-referenced, and integrated into the Leapfrog Geo software. Additionally, seismic data were incorporated to confirm the general location of the reservoir. A total volume of 16 km³ was modeled, encompassing both Poás Volcano and nearby volcanic edifices and structures, while also representing the interaction between volcanism and the subduction zone. This study highlights the potential of 3D modeling as a tool for synthesizing and visualizing complex geological structures such as Poás Volcano. Although the presented model is based on inferences drawn from limited data, it represents significant progress in understanding the internal structure of the volcano. Moreover, it highlights the need for future research to improve the model's accuracy and to unravel both its processes and geological evolution.

Keywords: magma reservoir; magmatic system; volumetric modeling; 3D representation; subduction; geophysics.

Introducción

El volcán Poás es un estratovolcán complejo que forma parte de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica, que a su vez es un segmento del arco volcánico de América Central, que recorre desde Panamá al sureste, hasta Guatemala al noreste. El volcán Poás se formó por la subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, a una profundidad de entre 90 y 110 km y con una inclinación de 40° a 50° hacia el N30°E (Lücke y Arroyo, 2015) en la parte central de Costa Rica. Está situado en la provincia de Alajuela, alcanza una altitud máxima de 2708 m s.n.m. y su edificio volcánico cubre un área de unos 414 km², lo que implica un volumen de 198 km³ (Alvarado, 2021). Se acompaña por otros volcanes activos: el Barva, Irazú y Turrialba (Fig. 1). La cima del Poás se caracteriza por la presencia de tres conos: Von Frantzius, Botos y el cráter activo actual, este último con una forma elongada en dirección norte-sur y dimensiones de 1746 m por 868 m (Alvarado et al., 2020).

El volcán Poás es un destacado centro de interés científico, debido a su compleja historia eruptiva y sus particularidades. Sobresale, por ejemplo, la existencia de una laguna cratérica que experimenta variaciones en temperatura y nivel del agua (incluyendo periodos de desaparición), las cuales se correlacionan con la dinámica de presión, la solubilidad de gases en la laguna y, de manera indirecta, con la precipitación (Ramírez y Fernández, 2011). Otro aspecto particular de este volcán es el domo de lava que se formó durante el ciclo eruptivo de 1953-1955, también conocido como criptodomo. Originalmente era un pequeño cono piroclástico de 40 metros de altura, fue erosionado por las erupciones tipo géiser y alterado por fumarolas, adquiriendo una forma de cúpula (Martínez, 2008). Finalmente, en 2017, el domo fue destruido durante una serie de erupciones, dando lugar a la formación de una nueva boca eruptiva en su lugar.

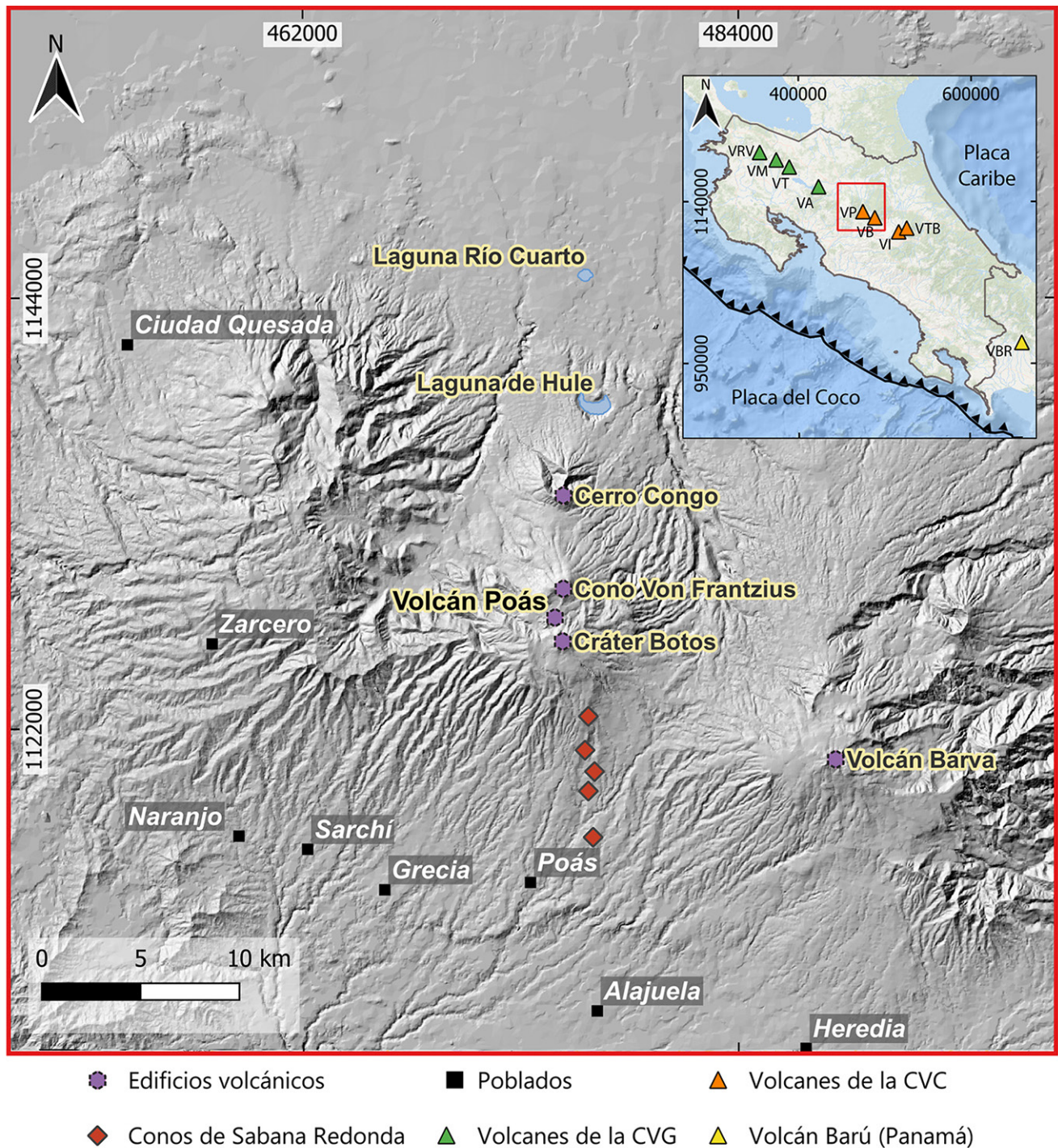


Fig. 1: Ubicación del volcán Poás en el contexto de las estructuras volcánicas asociadas. En el recuadro superior derecho se ubica el territorio de Costa Rica, la interacción de las placas Coco y Caribe y la ubicación de los volcanes activos: Poás (VP), Barva (VB), Irazú (VI) y Turrialba (VTB) de la Cordillera Volcánica Central (CVC), Arenal (VA), Tenorio (VT), Miravalles (VM) y Rincón de la Vieja (VRV) de la Cordillera Volcánica de Guanacaste (CVG) y el volcán Barú en Panamá.

La ubicación de este volcán es muy cercana a centros de población, que podrían verse afectados en una eventual erupción mayor, destacan las poblaciones de Poás, Sarchí, Alajuela y Grecia y, en menor grado, los cantones de Zarcero, Naranjo y una pequeña sección de San Carlos (Barrantes y Malavassi, 2015). Usualmente tiene emanaciones azufrosas que se convierten en lluvia ácida y, con menor alcance, de gases volcánicos que son dirigidas por los vientos de dirección al suroeste, lo que afecta los cultivos y la infraestructura en sus cercanías (Alvarado et al., 2020).

La actividad del Poás se caracteriza por manifestaciones volcánicas singulares, que incluyen la presencia de lavas con características geoquímicas bimodales, que varían desde basálticas hasta dacíticas, con una tendencia hacia la serie toleítica. Es particular la formación de diferentes tipos de materiales explosivos y efusivos, como bombas fusiformes y cilíndricas, coladas de azufre y lapilli. Además, el volcán presenta fumarolas de alta temperatura, erupciones similares a las submarinas y una laguna termomineral extremadamente ácida ($\text{pH} \sim 0$) (Alvarado, 2000). Ha tenido actividad relativamente constante desde el año 1700 hasta hoy, con episodios eruptivos que van desde emisiones de vapores hasta erupciones freatomagmáticas y de lava (Alvarado, 2021).

Para tratar de entender mejor su funcionamiento y así, las implicaciones y riesgos asociados a su existencia, se hace necesario estudiar su estructura interna. Los reservorios magmáticos son sistemas extremadamente complejos y pueden variar en tamaño, forma y composición. Dentro de ellos, el magma coexiste con cristales y gases, formando una mezcla heterogénea que evoluciona constantemente (Edmonds et al., 2019). A diferencia de otros volcanes (Lees, 1992; Husen et al., 2004), no existe una imagen directa de la cámara magmática del volcán Poás. Sin embargo, mediante datos indirectos como la actividad sísmica, la composición geoquímica de los depósitos y geomorfología se pueden hacer inferencias sobre la cámara magmática.

Una de las herramientas de estudio que se ha desarrollado en los últimos años, gracias al mejoramiento digital, ha sido el modelado en 3D. Su capacidad para generar modelos complejos permite sintetizar y visualizar con detalle la distribución de las diferentes estructuras, los componentes y los procesos asociados. En este contexto, este trabajo pretende explorar la utilización del modelado 3D para mejorar la comprensión de una estructura sobresaliente y compleja como la del volcán Poás, y de esta forma presentar algunas bases para determinar implicaciones y consecuencias hacia una futura evaluación del riesgo volcánico. Cabe recalcar que se carece de información más precisa y sofisticada, principalmente geofísica, que aporte datos para mejorar este modelo, que se presenta como un intento preliminar, que debe ser mejorado en un futuro próximo. Además, se pretende con este trabajo exponer algunas de las posibilidades del uso del software Leapfrog Geo, cuyas características lo posicionan como una herramienta excepcional de modelado geológico, para ser usado, tanto en la academia como en la industria.

Investigaciones previas

Las erupciones freáticas y la actividad fumarólica que ha presentado el volcán en las últimas décadas han incentivado diferentes investigaciones, dentro de las que destacan los estudios geofísicos.

A partir de mediciones gravimétricas, Thorpe et al. (1981) obtienen una amplia anomalía negativa superpuesta por una anomalía positiva en el área del cráter activo. Descartan la idea de una gran cámara magmática superficial, y sugieren que la anomalía positiva se debe a un cuerpo cilíndrico de magma

solidificado, indicando un conducto de alimentación estrecho. Esto implica que el volcán solo puede almacenar volúmenes de magma relativamente pequeños a la vez. Siguiendo esta idea, Rymer et al. (1987) concluyen la existencia de un intrusivo cilíndrico, de aproximadamente 1 km de diámetro, ubicado bajo el cráter activo. Determinan que se trata de un cuerpo parcialmente fundido, por debajo de los 500 m de profundidad, y que por encima la estructura está solidificada y se estrecha, hasta unos 200 m de diámetro lo que actúa como fuente de transmisiones hidrotermales en el conducto principal del cráter.

Rowe et al. (1989), con base en análisis químicos, describen la laguna Caliente formada en el cráter como una expresión superficial de un sistema hidrotermal bajo el volcán, dominado por vapor, a una profundidad desconocida. Los fluidos de la laguna se infiltran y descienden en el edificio volcánico formando celdas de convección, que se mezclan con los gases calientes y viajan hacia los flancos del volcán. Locke et al. (2003) utilizan estos datos gravimétricos, junto con nueva información, para identificar variaciones en escala horizontal de decenas a cientos de metros, como posible resultado de cambios en el nivel de magma en el conducto superficial, ubicado en la parte superior del volcán (menos de 200 m de profundidad). Con los datos geofísicos obtenidos hasta ese momento, Rymer et al. (2005) revelan fluctuaciones cíclicas en la masa debajo del cráter, indicando cambios en la fuente de actividad, producto de la naturaleza localizada de las intrusiones dendríticas (un flujo general descendente en el norte y un aumento en el oeste). Concluyen que, a pesar de las variaciones en la ubicación del foco de actividad, el volcán parece mantener un estado de equilibrio de masa en general.

En estudios posteriores, Lücke et al. (2010) desarrollaron un modelo de densidad basado en anomalías de Bouguer, revelando la presencia de un cuerpo de baja densidad en la corteza superior subyacente a los volcanes Barva y Poás. Este cuerpo de gran volumen, que se extiende hasta casi 6 km de profundidad, fue interpretado como una indicación no solo de reservorios magmáticos, sino también de alteración hidrotermal, flujos de calor elevados y la posible presencia de fundidos.

Metodología

Para este estudio, se empleó Leapfrog Geo como herramienta principal de modelado geológico en 3D. Este programa es un software de modelado eficaz e intuitivo para la creación, visualización, análisis y simulación de modelos geológicos. Permite la integración de datos geológicos de diversas fuentes y/o formatos, además posibilita la visualización interactiva de modelos en tiempo real, incluyendo herramientas de simulación que ayudan a calcular volúmenes y distancias a escala. El modelado 3D del volcán Poás se llevó a cabo en una serie de pasos, los cuales combinaron interpolación de datos geofísicos, estructurales, análisis de secciones geológicas y modelado de unidades geológicas. Leapfrog es un programa de modelado y visualización en 3D desarrollado por Seequent, pionero en la utilización del modelado implícito en geología, con el que se facilita el aprovechamiento de datos geológicos de campo y las interpretaciones en la elaboración de modelos geológicos conceptuales y cuantitativos (Cowan et al., 2004). Leapfrog emplea el método de RBFs (Función de Base Radial) para realizar el modelado implícito (Carr et al., 2001; Cowan et al., 2003; Cowan et al., 2004; Knight et al., 2007).

Inicialmente se hizo un recuento de los diferentes volcanes de Costa Rica y las investigaciones de carácter geológico realizadas en cada uno de ellos. Con base en esto se escogió el volcán Poás como el tema de esta investigación. En una primera fase se realizó una revisión bibliográfica de más de 40

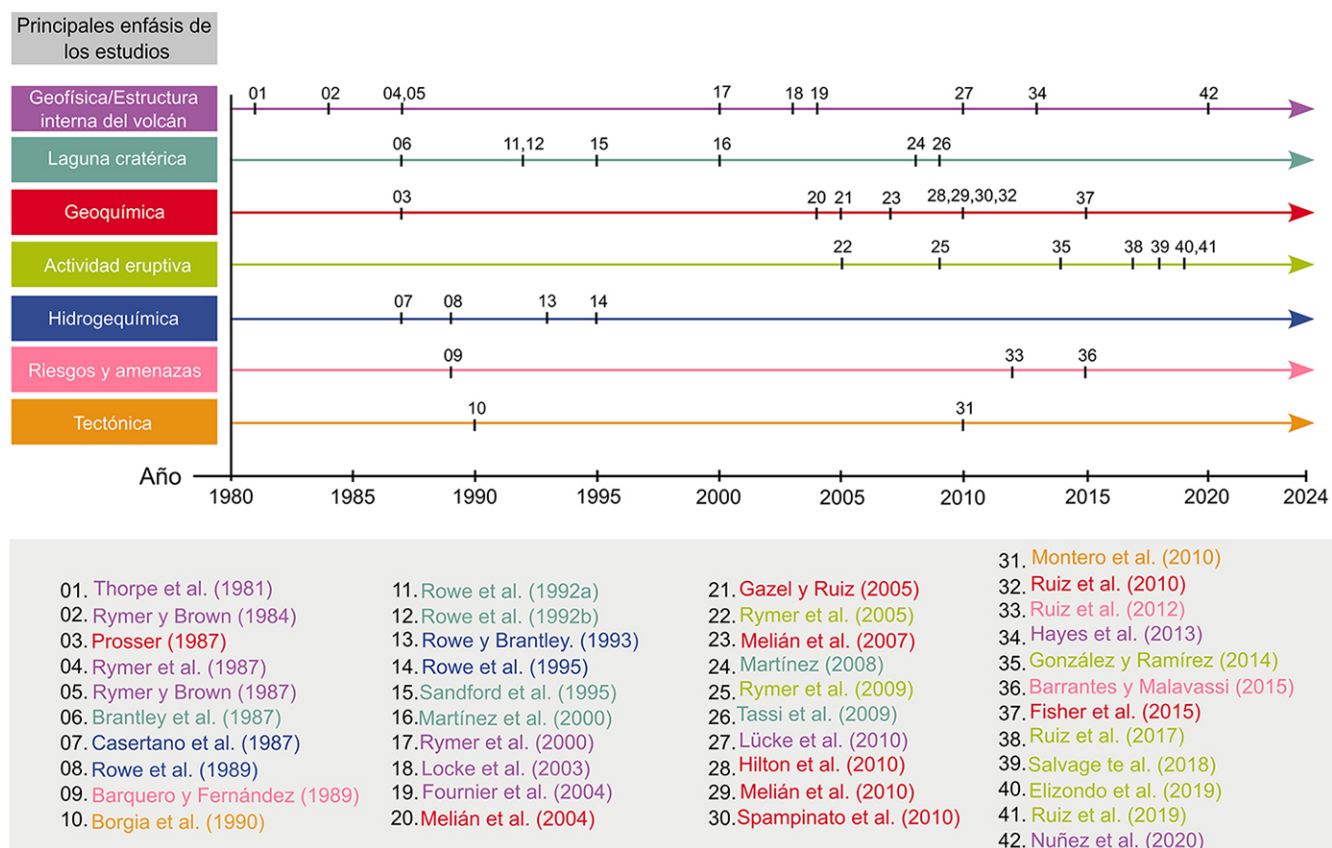


Fig. 2: Línea de tiempo de estudios relevantes realizados en el Volcán Poás entre 1980 y 2024, abarcando diversos enfoques. (1) Thorpe et al. (1981), (2) Rymer y Brown (1984), (3) Prosser (1987), (4) Rymer et al. (1987), (5) Rymer y Brown (1987), (6) Brantley et al. (1987), (7) Casertano et al. (1987), (8) Rowe et al. (1989), (9) Barquero y Fernández (1989), (10) Borgia et al. (1990), (11) Rowe et al. (1992a), (12) Rowe et al. (1992b), (13) Rowe et al. (1993), (14) Rowe et al. (1995), (15) Sanford et al. (1995), (16) Martínez (2000), (17) Rymer et al. (2000), (18) Locke et al. (2003), (19) Fournier et al. (2004), (20) Melián et al. (2004), (21) Gazel y Ruiz (2005), (22) Rymer et al. (2005), (23) Melián et al. (2007), (24) Rymer et al. (2009), (25) Tassi et al. (2009), (26) Lucke et al. (2010), (27) Hilton et al. (2010), (28) Melián et al. (2010), (29) Spampinato et al. (2010), (30) Montero et al. (2010), (31) Ruiz et al. (2010), (32) Ruiz et al. (2012), (33) Hayes et al. (2013), (34) González y Ramírez (2014), (35) Barrantes y Malavassi (2015), (36) Fischer et al. (2015), (37) Ruiz et al. (2017), (38) Martínez (2018), (39) Salvage et al. (2018), (40) Elizondo et al. (2019), (41) Ruiz et al. (2019), (42) Nuñez et al. (2020).

publicaciones científicas (Fig. 2), de las cuales se extrajeron los mapas y secciones transversales que contuvieran información relevante para el modelado. Los elementos gráficos seleccionados se importaron y georreferenciaron en Leapfrog Geo. La topografía utilizada se generó a partir de curvas de nivel con intervalos cada 20 metros, provenientes de las hojas topográficas de Aguas Zarcas, Río Cuarto, Quesada, Poás, Naranjo y Barva.

A partir de la información georreferenciada, se generaron modelos de las estructuras principales, específicamente de las fallas cercanas al volcán Poás y de la propia estructura interna del volcán. Las fallas se trazaron utilizando como referencia mapas tectónicos de la región (Montero et. al, 2010). Se hicieron

perfiles geológicos y se incorporó la información geofísica para así tratar de visualizar y representar las dimensiones horizontales, la profundidad y el ángulo de inclinación de las fallas.

En cuanto al modelado del reservorio magmático, se utilizó como guía inicial el perfil geofísico que muestra un cuerpo de baja densidad bajo el volcán (Lücke et. al, 2010). Luego de tener una interpretación preliminar de la estructura general del reservorio, fue ajustada mediante el uso de polilíneas, siguiendo las dimensiones y características más adecuadas según la literatura (Acocella, 2021; Cashman et al., 2017; Edmonds et al., 2019).

La Red Sismológica Nacional, proporcionó su base de datos, que abarca desde el 28 de enero de 1975 hasta el 14 de noviembre del 2020. Estos datos sísmicos ofrecieron un indicio de la ubicación general de la cámara magmática del volcán Poás. La representación gráfica de los sismos proporcionó una idea clara de la tendencia de la zona de subducción, lo que le da un entorno regional a la subducción como elemento generador original del vulcanismo de la Cordillera Volcánica Central.

Contexto geológico y tectónico

La geología del volcán Poás se caracteriza por una compleja secuencia de unidades volcánicas superpuestas durante dos etapas principales (Paleo y Neo Poás), así como depósitos simultáneos producto del vulcanismo contiguo (Ruiz et al, 2019). Las unidades se distribuyen espacialmente alrededor del cráter principal, siguiendo la tendencia norte-sur de los edificios volcánicos (Fig. 3). Las unidades están ubicadas en forma cronoestratigráfica en la figura 4. Esta evidente tendencia está regida por la tectónica local, que evidencian una tectónica general de compresión norte-sur, con fallamiento inverso este-oeste, alineación de estructuras volcánicas norte-sur y fallas de desplazamiento de rumbo dextral nor-noroeste. Montero et al. (2010) proponen que los esfuerzos tectónicos en el macizo del volcán Poás se manifiestan a través de una división del deslizamiento, donde fallas dextrales e inversas interactúan. Esta configuración, a su vez, está influenciada por el movimiento relativo del bloque Nicoya respecto a la placa Caribe (Montero et al., 2017).

La interpretación de Ruiz et al. (2019) sugiere que las unidades lávicas Río Cuarto, Poasito y los Conos de Sabana Redondo comparten un origen común relacionado con la extensión de una fractura volcano-tectónica. De manera similar, las unidades Von Frantzuis y Cerro Congo están asociadas a una fractura independiente. Las unidades La Paz, Achiote y Cima Poás, por su parte, son el resultado de erupciones efusivas centradas en el conducto principal o en conductos secundarios. Finalmente, las lagunas de Hule y Río Cuarto ocupan depresiones originadas por actividad explosiva en la parte norte del volcán (Fig. 3).

Modelado geológico

La ubicación y las dimensiones del volumen modelado se basan principalmente en la sección transversal del modelo de densidad realizado por Lücke et. al (2010), en el cual se identificó una geometría de baja densidad ($2,35 \text{ Mg/m}^3$) en la corteza superior bajo el volcán Poás, que está directamente relacionada con

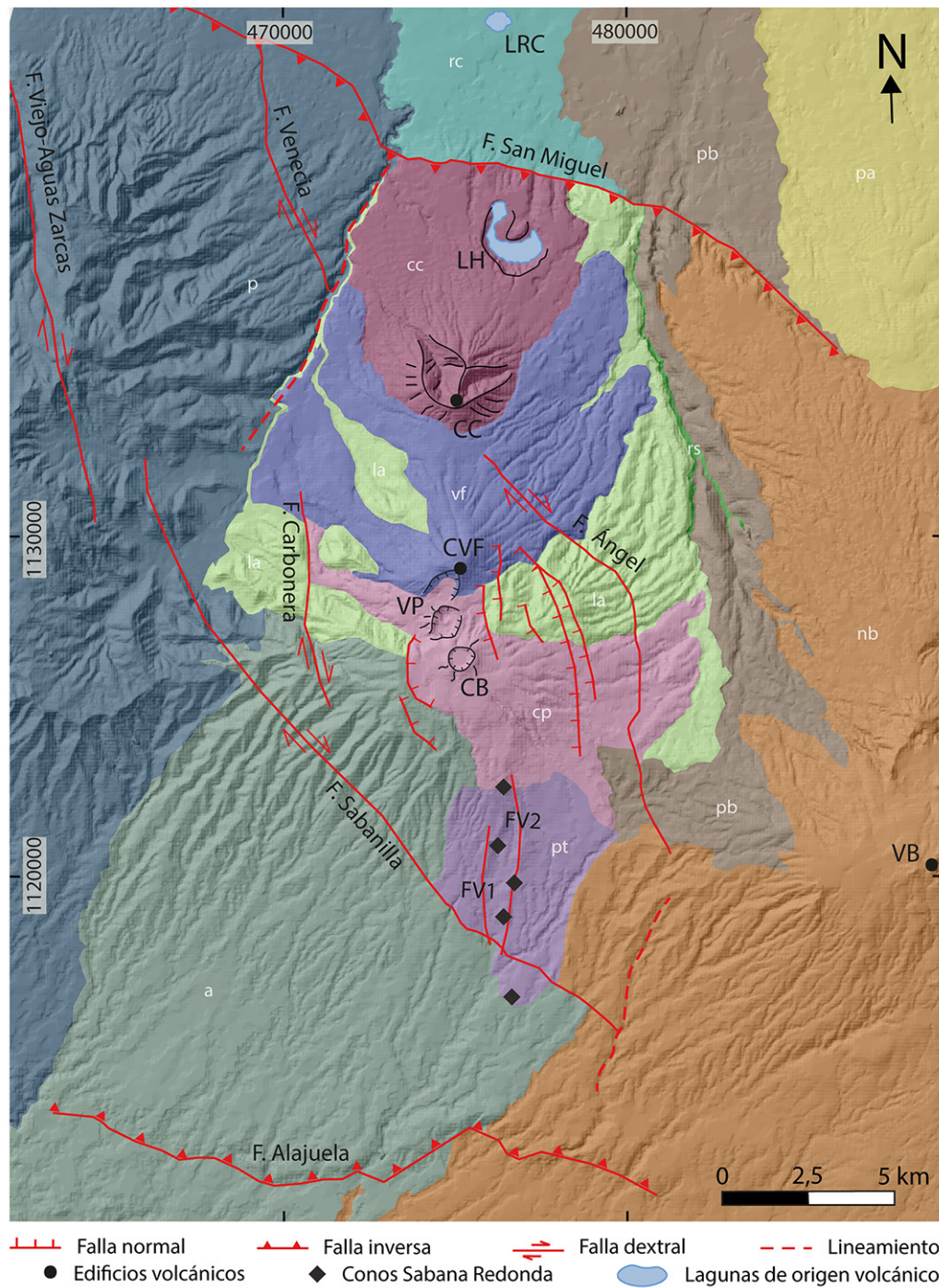


Fig. 3: Mapa geológico del volcán Poás basado en Ruiz et al. (2019). Los colores de la litología corresponden con los mismos de la Fig. 3. Se representan los diferentes edificios y estructuras volcánicas: la Laguna Río Cuarto (LRC), Laguna de Hule (LH), Cerro Congo (CC), Cono Von Frantzius (CVF), cráter activo del volcán Poás (VP), Cráter Botos (CB), fracturas volcánicas 1 y 2 (FV1 y FV2) y volcán Barva (VB).

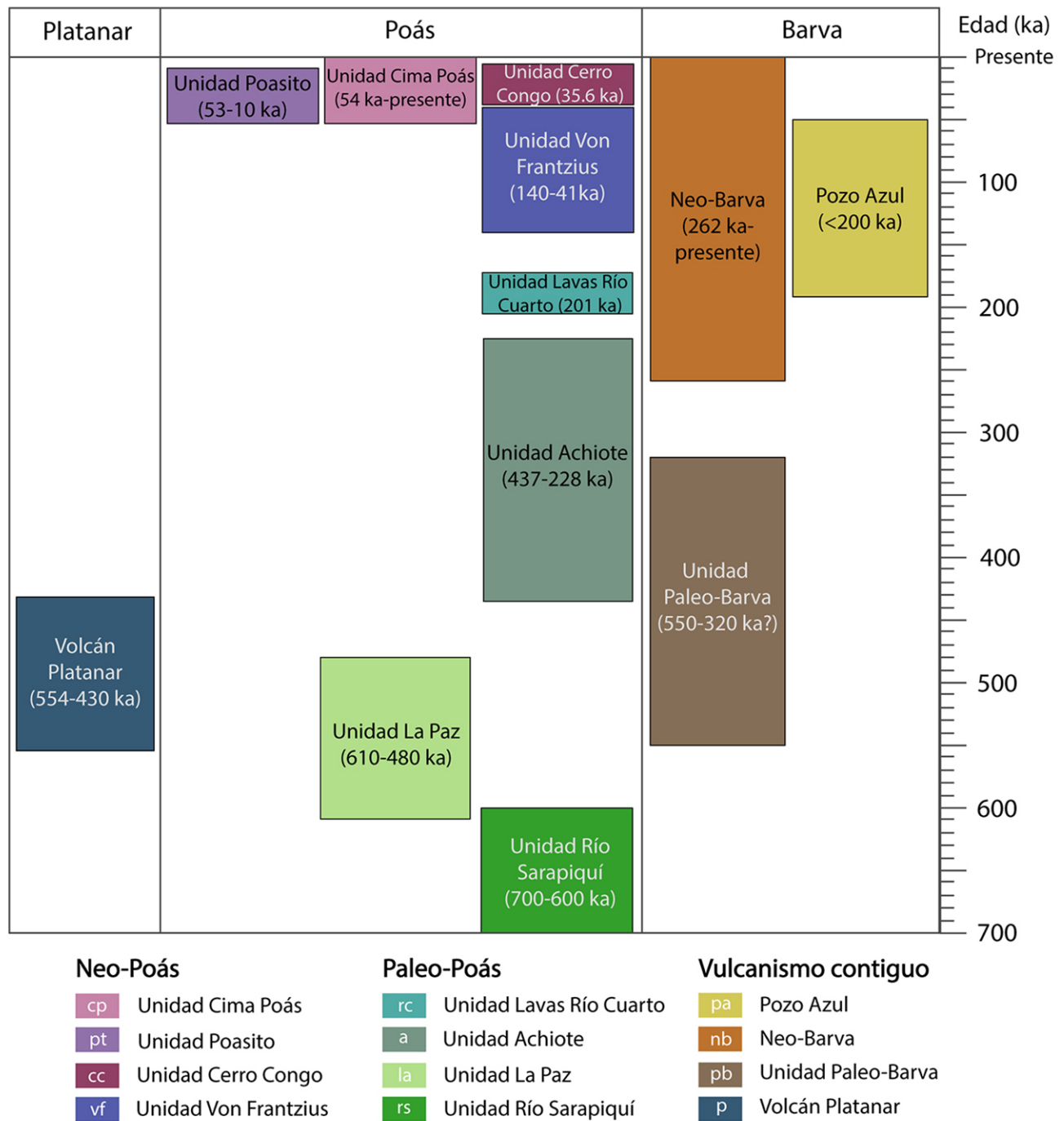


Fig. 4: Cronoestratigrafía de las unidades del volcán Poás. Modificado de Ruiz et al. (2019).

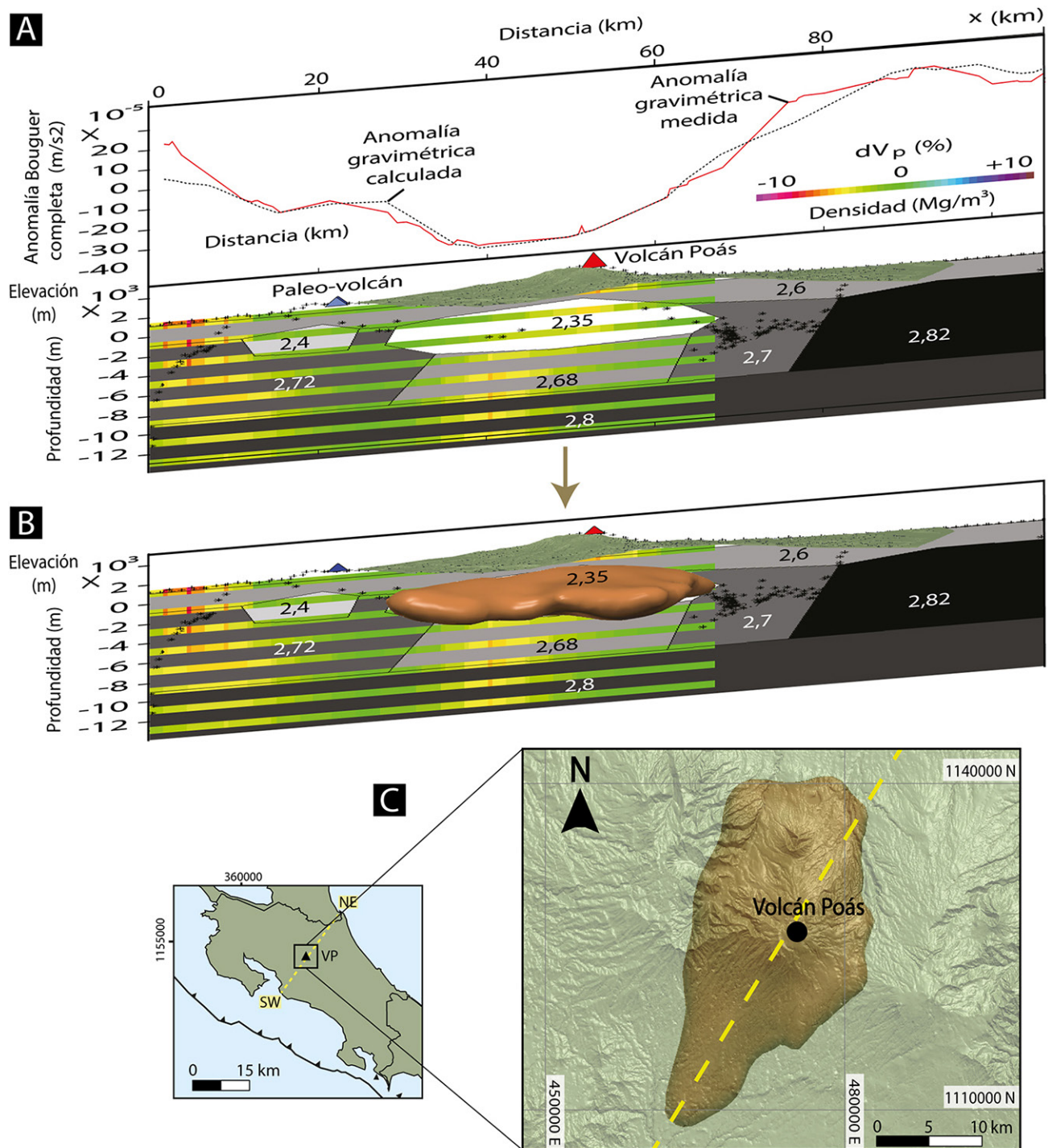


Fig. 5: A) Sección transversal dirección SW-NE modificada de Lücke et. al (2010) utilizada como referencia para el tamaño del volumen. B) Vista lateral del cuerpo de baja densidad modelado en 3D bajo el volcán. C) Vista en planta del volumen modelado V1. La línea discontinua de color amarillo representa la ubicación del perfil correspondiente con A y B.

flujos de calor. Esta geometría se transformó inicialmente en una estructura tridimensional denominada V1 con un tamaño de 1542 km³ ubicada a una profundidad de 4,5 km (Fig. 5). La sección de referencia utilizada es limitada, ya que solo proporciona información en dos dimensiones en dirección SW-NE, por lo que las demás proporciones del volumen general se modelaron calculando un tamaño mínimo, considerando elementos en superficie como los conos de Sabana Redonda y los edificios volcánicos adyacentes.

Es importante considerar la heterogeneidad del volumen de baja densidad. Esta geometría no representa un reservorio ocupado en su totalidad por magma, sino zonas de baja densidad directamente relacionadas con procesos de alteración hidrotermal, altos flujos de calor y presencia de fundidos (Lücke et. al, 2010). Por lo tanto, se consideró caracterizar la proporción y distribución espacial de estos componentes para representar mejor la dinámica del reservorio. Comúnmente las cámaras magmáticas se han dibujado como esferas bien definidas permanentemente llenas de magma fundido, estudios recientes, basados en datos geofísicos y petrológicos, muestran que su distribución es más compleja (Acocella, 2021). De esta forma, se modeló un segundo volumen V2 basado en el modelo de Cashman et al. (2017), representando un sistema de reservorios magmáticos distribuidos a lo largo de la corteza y conectados por una red de conductos y venas, variando en tamaño y contenido (Fig. 6). El volumen V2 tiene un tamaño de 16 km³ considerablemente menor al primer volumen modelado V1.

Esta estructura general propuesta (V2), representa una sucesión de reservorios magmáticos correspondientes con las morfologías evidenciadas en la superficie como los conos volcánicos y los maares, o lagunas de origen volcánico. Estos reservorios individuales, no necesariamente son coexistentes, pueden representar etapas sucesivas de actividad magmática con fases de solidificación parcial (Acocella, 2021), por lo que este volumen podría variar.

Comentarios finales

El origen y actividad del volcán Poás, es producto de la rápida convergencia oblicua entre las placas Coco y Caribe (Álvarez-Gómez et al., 2019). En la figura 7 se muestra una configuración regional, donde interactúan las placas tectónicas dentro del esquema local conceptual del volcán Poás y las diferentes capas más superficiales del planeta. Es entendido que la mayor parte del proceso de formación del magma que desencadena erupciones volcánicas comienza en el manto terrestre, este magma interactúa con la corteza terrestre a medida que asciende hacia la superficie. Durante este ascenso, el magma puede acumularse y persistir durante largos períodos, incluso hasta varios miles de años, antes de que finalmente ocurra una erupción volcánica (White et al., 2019). Estas acumulaciones se pueden dar en diferentes estructuras geológicas, como lentes de magma, cámaras magmáticas o en zonas de “mush”, término que se refiere a secciones del depósito con una concentración de cristales lo bastante elevada como para generar una estructura parcialmente rígida (Wager et al., 1960). Desde este punto de vista, los reservorios magmáticos pueden contener una mezcla de fundido, cristales y volátiles disueltos. La proporción de cada componente puede variar dentro del reservorio, y esto depende de varios factores como la temperatura, la presión, la composición del magma y la historia magmática del sistema en cuestión (Acocella, 2021).

La arquitectura de los reservorios magmáticos, incluyendo su profundidad y dimensiones, varía significativamente entre depósitos debido a una serie de factores complejos. Por ejemplo, el contenido de

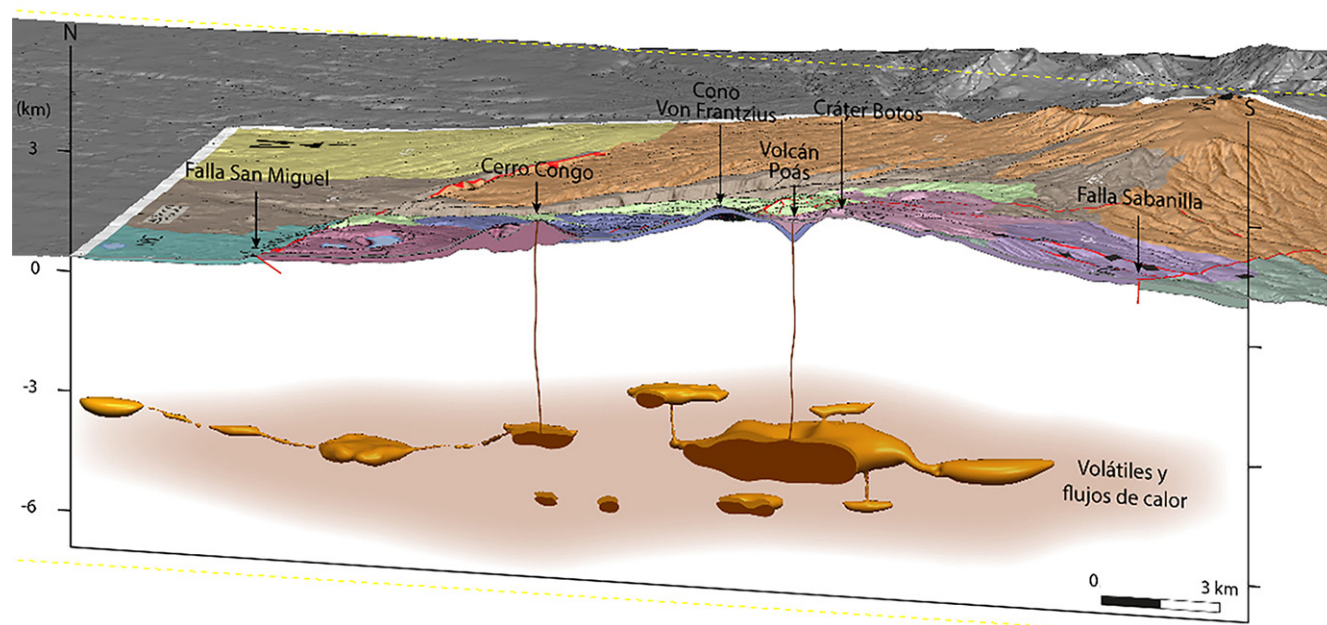


Fig. 6: Sección transversal N-S del reservorio magmático V2 asociado al volcán Poás.

agua en el magma, que determina los estadios del sistema, o el contexto geotectónico que influye en la configuración y dinámica de los reservorios (Edmonds et al., 2019). Por lo tanto, cada depósito de magma presenta una estructura única, reflejando la interacción de estos y otros factores.

Es difícil comprender completamente la estructura y la dinámica de las cámaras magmáticas, sin embargo, elementos como los depósitos volcánicos pueden dar un indicio del tamaño del reservorio magmático que los contiene. Al comparar el volcán Poás con estudios realizados en otros volcanes (Cuadro 1), se puede sugerir que V1 no corresponde en su totalidad con una gran cámara magmática, debido a su gran tamaño. Sin embargo, V2 (Fig. 6) podría ser más acertado, considerando elementos como el tamaño de los depósitos volcánicos.

El volumen del reservorio V2 propuesto para el volcán Poás es significativamente inferior al estimado para estructuras volcánicas más grandes como el Nevado de Toluca. Weber et al. (2020) emplearon datación de circones, geoquímica de elementos traza y estimaciones de volúmenes erupcionados para cuantificar un volumen de aproximadamente 350 km³ de material fundido almacenado bajo el volcán, valor que supera en casi 22 veces al obtenido para el reservorio del Poás (Fig. 8). La notable disparidad entre ambos volúmenes puede explicarse al considerar una combinación de factores, incluyendo el tamaño y la morfología del edificio volcánico, la naturaleza de los productos eruptivos y la evolución temporal del sistema magmático.

El modelado 3D ha demostrado ser una herramienta eficaz para la síntesis y visualización de estructuras geológicas, y permite evidenciar de manera clara las limitaciones de la información disponible. Si bien los resultados dependen en gran medida de los datos de entrada y mantienen un carácter preliminar, este tipo de modelado constituye un recurso fundamental para la planificación y el diseño de futuras investigaciones. Es importante señalar que en ningún caso sustituye la necesidad de contar con datos

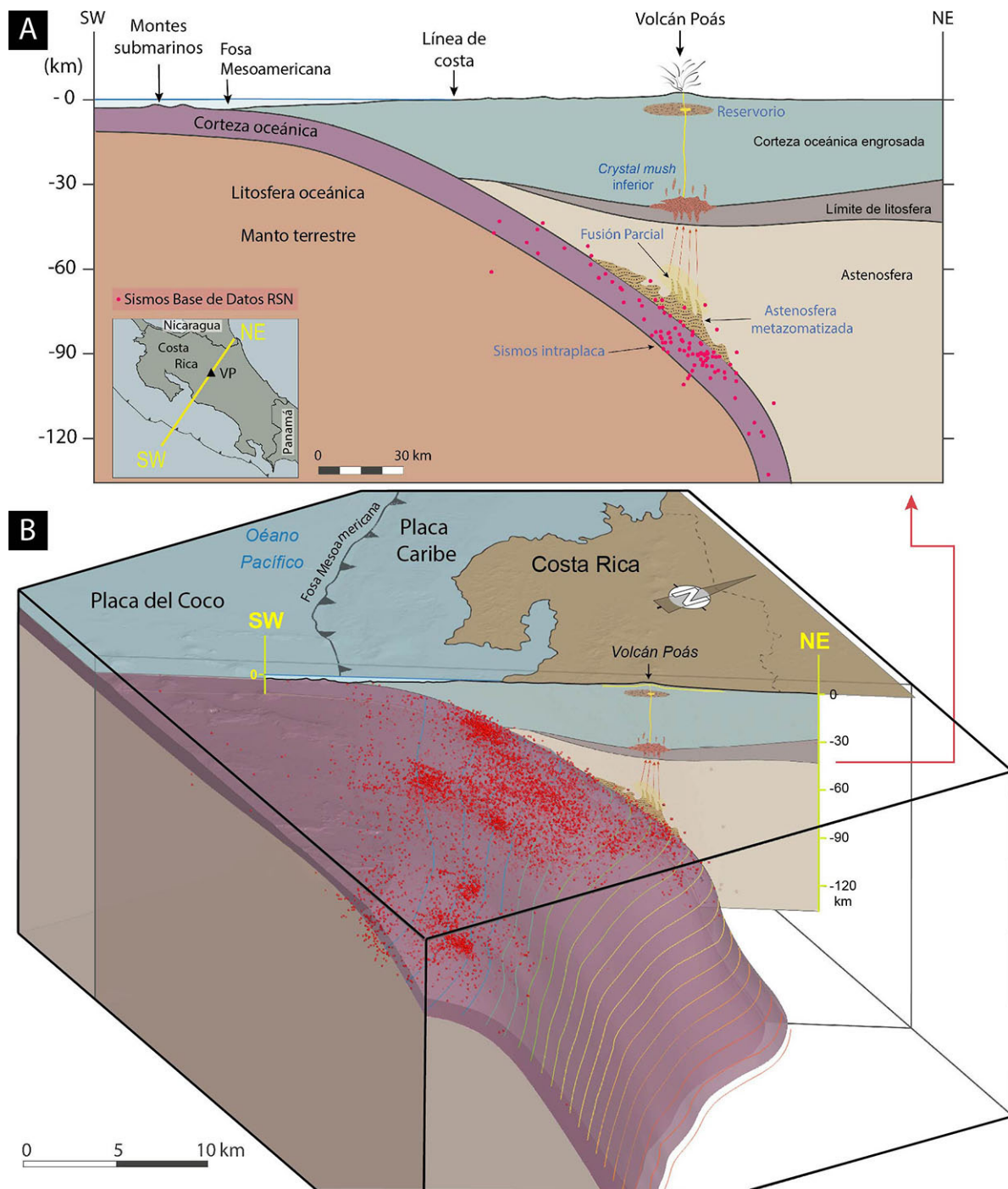


Fig. 7: A) Sección SW-NE de la zona de subducción bajo el volcán Poás. Se representan las diferentes capas de la placas continental y oceánica, así como la zona de fusión y sismos asociados. B) Vista NW del modelo en 3D de la placa del Coco en subducción.

Cuadro 1

Comparación de tamaños de reservorios magmáticos y depósitos volcánicos de algunos volcanes en diferentes regiones del planeta.

Volcán	País	Tipo	Ambiente	Vol. (m ³) / Área (m ²) del reservorio	Vol. de depósitos	Profundidad	Método	Referencia
Poás	Costa Rica	Estratov.	Subd.	16 km ³	97 km ³ (total)	4,5 km	Gravimetría	Este trabajo, Lücke et. al (2010), Carr et al. (2007), Carr (1984)
Eyjafjallajökull	Islandia	Estratov.	Rift	0,05 km ³ (un dique)	0,27 km ³ ± 0,08	4,5-6,5 km	InSAR y GPS (defor- mación)	Sigmundsson et al. (2010), Gudmundsson et al. (2011)
Complejo Volcánico de Colima (Cán- taro, Nevado de Colima y Volcán de Colima)	México	Estratov.	Subd. Graben	300 km ²	>300 km ³	Hasta 6,2 km	Datos gravi- métricos y aeromagné- ticos	Guevara-Be- tancourt et al. (2023)
Rift principal de Etiopía	Etiopía	Caldera	Rift	-	~50 km ³	>15 km basal- tos alcalinos y ~4 y 8 km rioli- tas peralcalinas	Geoquímica InSAR (de- formación)	Iddon y Ed- monds (2020)
Yellowstone	Estados Unidos	Caldera	P.C.	-	~1000 km ³	8 km magma cristalizado 2 km gas	Tomografía sísmica	Husen et al. (2004)
Bezymianny	Rusia	Estratov.	Subd.	-	42000 km ³	0-8 km Alta- mente perme- able y saturado de gas	Tomografía sísmica InSAR	Koulakov et al. (2021)
Socompa	Argentina	Estratov.	Subd.	-	26 km ³	2-7 km	Magneto- telúrica	Guevara et al. (2023)
Kilauea	Estados Unidos	Escudo	P.C.	2-3 km ³	>4 km ³	2- km	Geofísica Geoquímica	Pietruszka y García (1999)
Nevado de Toluca	México	Estratov.	Subd.	355 km ³	60 km ³	6.5-8.5 km	Geoquímica	Weber et al. (2020)
Harrat Rahat	Arabia Saudita	Fisural	Rift	~1000 km ²	05 km ³	10-25 km	Magneto- telúrica	Aboud et al. (2023)

Estratov: estratovolcán; Subd: subducción; P.C: punto caliente; Vol: volumen

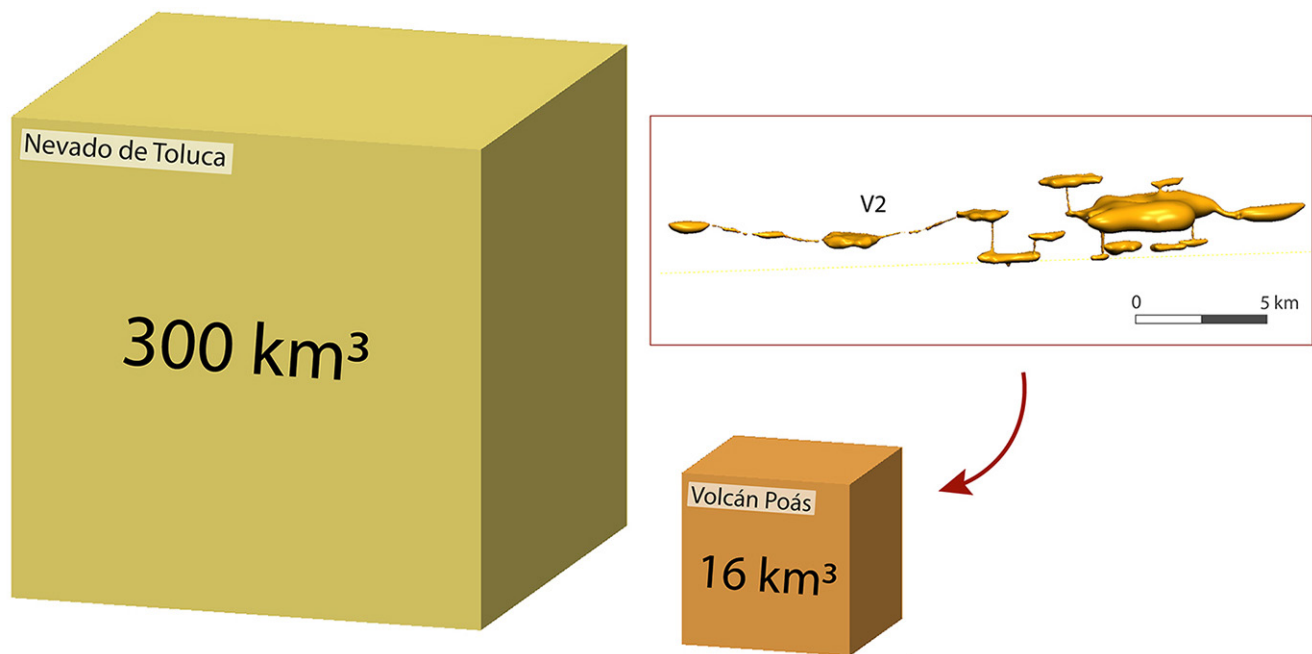


Fig. 8: Comparación del volumen de los reservorios magmáticos del Nevado de Toluca y el volcán Poás.

concretos que aporten parámetros sólidos y permitan ubicar con mayor precisión las estructuras estudiadas. De este trabajo se desprende que aún se requieren estudios geofísicos y geológicos adicionales, complementados con información geoquímica, los cuales podrían mejorar significativamente la calidad y confiabilidad de los modelos generados.

Finalmente, es crucial destacar que la escasez de información sobre los reservorios magmáticos no solo limita este estudio, sino que representa un vacío de conocimiento a nivel global. Avanzar en la conceptualización de la dinámica interna terrestre resulta esencial para generar nuevas perspectivas y cuestionar supuestos establecidos. Además, este conocimiento es fundamental para aplicaciones estratégicas, como la minería y la geotermia, donde comprender la dinámica y la magnitud de los reservorios magmáticos es clave para interpretar los vectores de fluidos y los sistemas hidrotermales.

Agradecimientos

La base de datos sísmicos 1975-2020 fueron gentilmente proporcionados por la Red Sismológica Nacional (RSN). Un especial agradecimiento a Michael Carr y Esteban Gazel por sus valiosos comentarios y sugerencias, que fueron de gran ayuda para la elaboración de este trabajo. Esta investigación se enmarca dentro del proyecto: Avance en el cartografiado geológico y el léxico estratigráfico de Costa Rica (Proyecto 830-C2-158) del Centro de Investigación en Ciencias Geológicas. Seequent Bentley nos ha permitido el uso del software Leapfrog Geo 3D Geological Modelling, que resultó invaluable para la realización de este proyecto.

Referencias

- About, E., Arafa-Hamed, T., Alqahtani, F., Marzouk, H., Elbarbary, S., Abdulfaraj, M., y Elmasry, N. (2023). The geothermal magmatic system at the northern Rahat volcanic field, Saudi Arabia, revealed from 3D magnetotelluric inversion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 437, 107794. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107794>
- Acocella, V. (2021). *Volcano-tectonic processes*. Advances in volcanology. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65968-4>
- Alvarado, G. E. (2000). *Los volcanes de Costa Rica: Geología, historia, riqueza natural y su gente* (3a ed.). Euned.
- Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. Editorial UCR.
- Alvarado, G. E., Esquivel, L., Sánchez, B. E., y Alfaro, J. C. (2020). *Actualización del peligro volcánico del Poás, Costa Rica*. Comisión Nacional de Emergencias. https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/biblioteca/informes/Amenaza%20Volcanica%20Poas%20CNE%202020.pdf
- Álvarez-Gómez, J. A., Vázquez, A. S., Martínez-Díaz, J. J., Canora, C., Alonso-Henar, J., Insua-Arévalo, J. M., y Béjar-Pizarro, M. (2019). Push-pull driving of the Central America Forearc in the context of the Cocos-Caribbean-North America triple junction. *Scientific Reports*, 9(11164). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47617-3>
- Barquero, J., y Fernández, E. (1989). Estado de los Volcanes. Enero 1988 - mayo 1989. *Boletín Vulcanología*, 20.
- Barrantes, G., y Malavassi, E. (2015). Mapa de peligros del volcán Poás. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 157-172. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50219>
- Borgia, A., Burr, J., Montero, W., Morales, L. D., y Alvarado, G. E. (1990). Fault propagation folds induced by gravitational failure and slumping of the central Costa Rica Volcanic Range: Implications for large terrestrial and Martian volcanic edifices. *Journal Of Geophysical Research Solid Earth*, 95(B9), 14357-14382. <https://doi.org/10.1029/jb095ib09p14357>
- Brantley, S. L., Borgiatt, A., Rowe, G., Fernández, J. F., y Reynolds, J. R. (1987). Poás volcano crater lake acts as a condenser for acid metal-rich brine. *Nature*, 330, 470-472. <https://doi.org/10.1038/330470a0>
- Casertano, L., Borgia, A., Cigolini, C., Morales, L. D., Montero, W., Gómez, M., y Fernández, J. F. (1987). An integrated dynamic model for the volcanic activity at Poas volcano, Costa Rica. *Bulletin of Volcanology*, 49, 588-598. <https://doi.org/10.1007/bf01079964>
- Cashman, K. V., Sparks, R. S. J., y Blundy, J. D. (2017). Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes. *Science*, 355(6331). <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- Carr, J.C., Beatson, R.K., Cherrie, J.B., Mitchell, T.J., Fright, W.R., Mccallum, B.C., y Evans, T.R. (2001) Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. *SIGGRAPH Computer Graphic Proceeding, Annual Conference Series*, 67-76. <http://mesh.brown.edu/DGP/pdfs/Carr-sg2001.pdf>
- Carr, M. J. (1984). Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the central american volcanic front. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 20(3-4), 231-252. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90041-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90041-6)

- Carr, M. J., Saginor, I., Alvarado, G. E., Bolge, L. L., Lindsay, F. N., Milidakis, K., Turrin, B. D., Feigenson, M. D., y Swisher, C. C. (2007). Element fluxes from the volcanic front of Nicaragua and Costa Rica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(6). <https://doi.org/10.1029/2006gc001396>
- Cowan, E. J., Beatson, R. K., Ross, H. J., Fright, W. R., McLennan, T. J., Evans, T. R., Carr, J. C., Lane, R. G., Bright, D. V., Gillman, A. J., Oshust, P. A., y Tittley, M. (2003). Practical implicit geological modelling. En S. Dominy (Ed.), *Proceedings of the Fifth International Mining Geology Conference* (pp. 89–99). Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Cowan, J., Lane R.G., y Ross H.J. (2004). Leapfrog's implicit drawing tool: A new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D. *Australian Institute of Geoscientists Bulletin*, 41, 23-25.
- Edmonds, M., Cashman, K. V., Holness, M., y Jackson, M. (2019). Architecture and dynamics of magma reservoirs. *Philosophical Transactions of The Royal Society a Mathematical Physical And Engineering Sciences*, 377(2139), 20180298. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0298>
- Elizondo, V., Alvarado, G. E., y Soto, D. (2019). Evolución espacio-temporal de las bocas eruptivas de los volcanes Irazú, Arenal, Turrialba y Poás en tiempo histórico (Costa Rica). *Revista Geológica de América Central*, 61, 35-55. <https://doi.org/10.15517/rgac.v61i0.40087>
- Fischer, T., Ramírez, C., Mora-Amador, R., Hilton, Barnes, J., Sharp, Z., Brun, M. L., De Moor, J., Barry, P., Füre, E., y Shaw, A. (2015). Temporal variations in fumarole gas chemistry at Poás volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 294, 56-70. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.02.002>
- Fournier, N., Rymer, H., Williams-Jones, G., y Brenes, J. (2004). High-resolution gravity survey: Investigation of subsurface structures at Poás volcano, Costa Rica. *Geophysical Research Letters*, 31(15). <https://doi.org/10.1029/2004gl020563>
- Gazel, E., y Ruiz, P. (2005). Los conos piroclásticos de Sabana Redonda: componente magmático enriquecido del Volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 33. <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/4235/4059>
- González, G., y Ramírez, C. (2014). *Reporte de incandescencia y aparición de chimeneas de azufre en el volcán Poás*. RSN: UCR-ICE. <rsn.ucr.ac.cr/index.php/actividad-volcanica/reportes-volcanicos/nota-tecnica-de-incandescencia-y-aparicion-de-chimeneas-de-azufre-en-el-volcan-poas>
- Gudmundsson, M. T., Hoskuldsson, A., Larsen, G., Thordarson, T., Oddsson, B., Hognadottir, T., Jonsdottir, I., Bjornsson, H., Petersen, N. G., y Magnusson, E. (2011). Eyjafjallajökull April–June 2010: An explosive-mixed eruption of unusually long duration. *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011–12542.
- Guevara-Betancourt, R., Yutsis, V., Varley, N., Almaguer, J., Alvarez, R., Calderón-Moctezuma, A., y Sieck, P. (2023). Insights into the plumbing system of Colima Volcanic Complex from geophysical evidence. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 433, 107711. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107711>
- Guevara, L., Apaza, F., y Favetto, A. (2023). Conductivity distribution beneath Socompa volcano, northwestern Argentina, from 3-D magnetotelluric characterization. *Journal Of Volcanology and Geothermal Research*, 441, 107889. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107889>
- Hayes, J. L., Holbrook, W. S., Lizarralde, D., Van Avendonk, H. J. A., Bullock, A. D., Mora, M., Harder, S., Alvarado, G. E., y Ramírez, C. (2013). Crustal structure across the Costa Rican Volcanic Arc. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14(4), 1087-1103. <https://doi.org/10.1002/ggge.20079>

- Hilton, D. R., Ramírez, C., Mora-Amador, R. A., Fischer, T. P., Füre, E., Barry, P. H., y Shaw, A., M. (2010). Monitoring of temporal and spatial variations in fumarole helium and carbon dioxide characteristics at Poás and Turrialba volcanoes, Costa Rica (2001-2009). *Geochemical Journal*, 44(5), 431-440. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0085>
- Husen, S., Smith, R. B., y Waite, G. P. (2004). Evidence for gas and magmatic sources beneath the Yellowstone volcanic field from seismic tomographic imaging. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131(3-4), 397-410. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(03\)00416-5](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(03)00416-5)
- Iddon, F., y Edmonds, M. (2020). Volatile-Rich Magmas Distributed Through the Upper Crust in the Main Ethiopian Rift. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(6), e2019GC008904. <https://doi.org/10.1029/2019gc008904>
- Knight, R.H., Lane, R.G., Ross, H.J., Abraham, A.P.G., y Cowan, E.J. (2007). Implicit ore delineation. En B. Milkereit (ed.), *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial Conference on Mineral Exploration* (pp. 1165-1169). <https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2015/10/Implicit-Ore-Delineation.pdf>
- Koulakov, I., Plechov, P., Mania, R., Walter, T. R., Smirnov, S. Z., Abkadyrov, I., Jakovlev, A., Davydova, V., Senyukov, S., Bushenkova, N., Novgorodova, A., Stupina, T., y Droznina, S. Y. (2021). Anatomy of the Bezymianny volcano merely before an explosive eruption on 20.12.2017. *Scientific Reports*, 11(1758). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81498-9>
- Lees, J. M. (1992). The magma system of Mount St. Helens: non-linear high-resolution P-wave tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53(1-4), 103-116. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90077-q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90077-q)
- Locke, C. A., Rymer, H., y Cassidy, J. F. (2003). Magma transfer processes at persistently active volcanoes: insights from gravity observations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127(1-2), 73-86. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(03\)00179-3](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(03)00179-3)
- Lücke, O. H., y Arroyo, I. G. (2015). Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zone from 3-D gravity modeling and local earthquake data. *Solid Earth*, 6(4), 1169-1183. <https://doi.org/10.5194/se-6-1169-2015>
- Lücke, O. H., Götze, H., y Alvarado, G. E. (2010). A constrained 3D density model of the upper crust from gravity data interpretation for Central Costa Rica. *International Journal of Geophysics*, 2010, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2010/860902>
- Martínez, M. (2008). *Geochemical evolution of the acid crater lake of Poás volcano (Costa Rica): Insights into volcanic-hydrothermal processes*. [Tesis de doctorado]. Universiteit Utrecht. <https://dspace.library.uu.nl/bitstream/1874/295352/1/Cruz-Maria+Martinez-Geochemical+evolution+of+the+acid+crater+lake+of+Poas+volcano-Costa+Rica-2008-copy.pdf>
- Martínez, M., Fernández, E., Valdés, J., Barboza, V., Van Der Laat, R., Duarte, E., Malavassi, E., Sandoval, L., Barquero, J., y Marino, T. (2000). Chemical evolution and volcanic activity of the active crater lake of Poás volcano, Costa Rica, 1993–1997. *Journal of Volcanology And Geothermal Research*, 97(1-4), 127-141. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(99\)00165-1](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(99)00165-1)
- Melián, G. V., Galindo, I., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Salazar, J. M., Fernández, M., Ramírez, C., Mora, R., y Alvarado, G. E. (2004). Emisión difusa de hidrógeno en el Volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 30, 167-177. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i30.7285>

- Melián, G. V., Galindo, I., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Fernández, M., Ramírez, C., Mora, R., y Alvarado, G. E. (2007). Diffuse Emission of Hydrogen from Poás Volcano, Costa Rica, America Central. En N. M. Pérez, S. Gurrieri, C. Y. King y Y. Taran (eds), *Terrestrial Fluids, Earthquakes and Volcanoes: The Hiroshi Wakita Volume II* (Pageoph Topical Volumes, pp. 2465-2487). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8720-4_7
- Melián, G. V., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Nolasco, D., Marrero, R., Fernández, M., Ramírez, C., Mora-Amador, R., y Alvarado, G. E. (2010). Emisión difusa de CO₂ y actividad volcánica en el volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3462>
- Montero, W., Soto, G. J., Alvarado, G. E., y Rojas, W. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 13-36. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3456>
- Montero, W., Lewis, J. C., y Araya, M. C. (2017). The Guanacaste Volcanic Arc Sliver of Northwestern Costa Rica. *Scientific Reports*, 7(1797). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01593-8>
- Núñez, E., Schimmel, M., Stich, D., y Iglesias, A. (2019). Crustal Velocity Anomalies in Costa Rica from Ambient Noise Tomography. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 941-960. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02315-z>
- Pietruszka, A. J., y García, M. O. (1999). The size and shape of Kilauea Volcano's summit magma storage reservoir: a geochemical probe. *Earth And Planetary Science Letters*, 167(3-4), 311-320. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00036-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00036-9)
- Prosser, J. T., y Carr, M. J. (1987). Poás volcano, Costa Rica: Geology of the summit region and spatial and temporal variations among the most recent lavas. *Journal of Volcanology And Geothermal Research*, 33(1-3), 131-146. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90057-6)
- Ramírez, C., y Fernández, M. (2011). La actividad de los volcanes de la Cordillera Central, Costa Rica, entre 1998-2002. *Revista Geológica de América Central*, 30. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i30.7287>
- Rowe, G. L., y Brantley, S. L. (1993). Estimation of the dissolution rates of andesitic glass, plagioclase and pyroxene in a flank aquifer of Poás Volcano, Costa Rica. *Chemical Geology*, 105(1-3), 71-87. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90119-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90119-4)
- Rowe, G. L., Brantley, S. L., Fernández, J. F., Barquero, J., y Borgia, A. (1989). Observaciones preliminares del sistema hidrotermal del volcán Poás, Costa Rica. *Boletín de Vulcanología*, 20, 23-31.
- Rowe, G. L., Brantley, S. L., Fernandez, J. F., y Borgia, A. (1995). The chemical and hydrologic structure of Poá's Volcano, Costa Rica. *Journal Of Volcanology and Geothermal Research*, 64(3-4), 233-267. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)00079-v](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00079-v)
- Rowe, G. L., Brantley, S. L., Fernandez, M., Fernandez, J. F., Borgia, A., y Barquero, J. (1992a). Fluid-volcano interaction in an active stratovolcano: the crater lake system of Poás volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 49(1-2), 23-51. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90003-v](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90003-v)
- Rowe, G. L., Ohsawa, S., Takano, B., Brantley, S. L., Fernandez, J. F., y Barquero, J. (1992b). Using Crater Lake chemistry to predict volcanic activity at Poás Volcano, Costa Rica. *Bulletin of Volcanology*, 54, 494-503. <https://doi.org/10.1007/bf00301395>

- Ruiz, P., Carr, M. J., Alvarado, G. E., Soto, G. J., Mana, S., Feigenson, M. D., y Sáenz, L.F. (2012). Coseismic landslide susceptibility analyses using LiDAR images and GISs: The case of Poás volcano, Costa Rica, Central America. Conferencia presentada en *International Scientific Conference on Integrated Approaches for Volcanic Risk Management*, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany.
- Ruiz, P., Gazel, E., Alvarado, G. E., Carr, M. J., y Soto, G. J. (2010). Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3457>
- Ruiz, P., Mana, S., Gazel, E., Soto, G. J., Carr, M. J., y Alvarado, G. E. (2019). Geochemical and Geochronological Characterisation of the Poás Stratovolcano Stratigraphy. En F. Tassi, O. Vaselli y R. Mora Amador (eds), *Poás Volcano* (pp. 13-43). Active Volcanoes of the World. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_2
- Ruiz, P., Soto, G. J., y Mora, M., M. (2017). *Informe de observaciones sobrevuelo al Volcán Poás 14 de junio del 2017*. RSN: UCR-ICE. https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Sismicidad_volcanica/2017/informe_sobrevuelo_junio_2017.pdf
- Rymer, H., Cassidy, J., Locke, C., Barboza, M., Barquero, J., Brenes, J., y Van Der Laat, R. (2000). Geophysical studies of the recent 15-year eruptive cycle at Poás Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97(1-4), 425-442. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(99\)00166-3](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(99)00166-3)
- Rymer, H., y Brown, G. C. (1984). Periodic gravity changes at Poás volcano, Costa Rica. *Nature*, 311, 243-245. <https://doi.org/10.1038/311243a0>
- Rymer, H., y Brown, G. C. (1987). Causes of microgravity change at Poás volcano, Costa Rica: an active but non-erupting system. *Bulletin of Volcanology*, 49, 389-398. <https://doi.org/10.1007/bf01046632>
- Rymer, H., Locke, C. A., Brenes, J., y Williams-Jones, G. (2005). Magma plumbing processes for persistent activity at Poás volcano, Costa Rica. *Geophysical Research Letters*, 32(8). <https://doi.org/10.1029/2004gl022284>
- Rymer, H., Locke, C. A., Borgia, A., Martinez, M., Brenes, J., Van Der Laat, R., y Williams-Jones, G. (2009). Long-term fluctuations in volcanic activity: implications for future environmental impact. *Terra Nova*, 21(4), 304-309. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00885.x>
- Rymer, H., Morales, L. D., y Brown, G. C. (1987). Microgravity monitoring at Poás Volcano. *Revista Geológica de América Central*, 6, 75-101. <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/12332/12149>
- Salvage, R. O., Avard, G., De Moor, J. M., Pacheco, J. F., Marin, J. B., Cascante, M., Muller, C., y Cruz, M. M. (2018). Renewed Explosive Phreatomagmatic Activity at Poás Volcano, Costa Rica in April 2017. *Frontiers In Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00160>
- Sanford, W. E., Konikow, L. F., Rowe, G. L., y Brantley, S. L. (1995). Groundwater transport of crater-lake brine at Poá's Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 64(3-4), 269-293. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)00080-z](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00080-z)
- Sigmundsson, F., Hreinsdóttir, S., Hooper, A., Árnadóttir, T., Pedersen, R., Roberts, M. J., Óskarsson, N., Auriac, A., Deciem, J., Einarsson, P., Geirsson, H., Hensch, M., Ófeigsson, B. G., Sturkell, E., Sveinbjörnsson, H., y Feigl, K. L. (2010). Intrusion triggering of the 2010 Eyjafjallajökull explosive eruption. *Nature*, 468, 426-430. <https://doi.org/10.1038/nature09558>

- Spampinato, L., Salerno, G. G., Martin, R. S., Sawyer, G. M., Oppenheimer, C., Ilyinskaya, E., y Ramírez, C. (2010). Thermal and geochemical signature of Poás Volcano, Costa Rica (MARCH 2009). *Revista Geológica de América Central*, 43. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3463>
- Tassi, F., Vaselli, O., Fernandez, E., Duarte, E., Martinez, M., Huertas, A. D., y Bergamaschi, F. (2009). Morphological and geochemical features of crater lakes in Costa Rica: an overview. *Journal Of Limnology*, 68(2), 193-205. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2009.193>
- Thorpe, R. S., Locke, C. A., Brown, G. C., Francis, P. W., y Randal, M. (1981). Magma chamber below Poás volcano, Costa Rica. *Journal of the Geological Society*, 138, 367 - 373. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.138.3.0367>
- Wager, L. R., Brown, G. M., y Wadsworth, W. J. (1960). Types of Igneous Cumulates. *Journal of Petrology*, 1(1), 73-85. <https://doi.org/10.1093/petrology/1.1.73>
- Weber, G., Caricchi, L., Arce, J. L., y Schmitt, A. K. (2020). Determining the current size and state of subvolcanic magma reservoirs. *Nature Communications*, 11, 5477. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19084-2>
- White, R. S., Edmonds, M., Maclennan, J., Greenfield, T., y Ágústssdóttir, Þ. (2019). Melt movement through the Icelandic crust. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 377, 20180010. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0010>