

Unidades morfotectónicas-volcánicas del sector noroeste del volcán Poás, Costa Rica

Morphotectonic-volcanic units of the northwest sector of Poás volcano, Costa Rica

Mario Arroyo-Solórzano*, Adolfo Quesada-Román** y Christian Vargas-Bolaños***

Recibido: 25/11/2020. Aprobado: 24/02/2021. Publicado: 19/05/2021

Resumen. La dinámica tectónica y volcánica de Costa Rica responde principalmente a la interacción de las placas Cocos y Caribe. Con base en la relación entre las estructuras geológicas, rangos altitudinales, parámetros morfométricos y formas de relieve, se definieron diez unidades morfotectónicas-volcánicas (UMTV) que caracterizan el relieve resultante de la evolución del edificio volcánico del volcán Poás en su sector Noroeste. Se elaboró un mapa considerando criterios asociados a elementos y atributos morfotectónicos y morfoestructurales, litoestratigráficos, geomorfológicos y morfométricos. Basados en estudios previos de la zona, así como con la utilización de sensores remotos como tecnología lidar, imágenes de radar y fotografías aéreas, se combinaron criterios que incluyeron la identificación e interpretación de estructuras tectónicas o volcánicas, el rango altitudinal, la geología y el origen de las formas de relieve, la pendiente, la sismicidad, lineamientos y la interpretación de patrones de la red hidrográfica. Las UMTV identificadas integran las diferentes estructuras y la geología de la zona, y permiten reconocer la importancia de la actividad neotectónica en la formación y diferenciación del relieve. Las UMTV constituyen un insumo inicial para la evaluación de amenazas naturales, siendo una herramienta funcional en el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo, con gran potencial de replicación en sitios con características similares a la zona de estudio, en ambientes volcánicos y climas tropicales.

Palabras clave: morfotectónica, geomorfología volcánica, Volcán Poas, parámetros morfométricos, relieve

Abstract. The tectonic and volcanic dynamics of Costa Rica respond mainly to the interaction of the Cocos and Caribbean plates (and the Panama Microplate) near a triple junction where these interact with the Nazca Plate. This work used Lidar images from the Northwest sector of the Poás Volcano generated after the 2009 Cinchona earthquake (Mw 6.2) and supplementary inputs to analyze the morphotectonic traits and propose morphotectonic-volcanic units (UMTV) on a 1:25.000 scale. This sector has been defined as the area of interest because it is the least studied of the Poás Volcano and covers an important part of the national park protection zone. UMTVs were defined from the analysis of the morphometric elements of relief, lithologic conditions, and morphostructural expressions of relief structures. Thus, this study represents an initial step in determining this type of morphostructural relationships of relief in Costa Rica, which can be replicated as a tool in the evaluation of natural hazards in other countries with similar characteristics.

Based on previous studies in the area as and using remote sensors (Lidar, radar images, and aerial photographs), criteria were combined including identification and interpretation

* Escuela Centroamericana de Geología y Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1653-2680>. Email: mario.arroyosolorzano@ucr.ac.cr (*autor de contacto)

** Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6601-5254>. Email: adolfo.quesadaroman@ucr.ac.cr

*** Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), Laboratorio PRIAS. San José, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-2047>. Email: cvargas@cenat.ac.cr

of tectonic or volcanic structures, altitudinal range, geology and origin of relief forms, slope, seismicity, and guidelines and interpretation of patterns in the hydrographic network. Methodological processes were grouped as follows: a) development of the elevation and shading digital model through processing in ArcMap 10.5 for use in morphometric analyses and identification of tectonic structures; b) geomorphological mapping, analysis of relief morphoelements and litho-stratigraphic and seismicity relationships; c) analysis of altimetric ranges and slopes; d) analysis of structural patterns according to the hydrographic network and its morphometry (dissection depth and density); and e) interpretation of radar images and aerial photographs from available sources.

Ten UMTVs were defined that characterize the relief resulting from the evolution of the Poás Volcano northwest sector, based on the relationship between geological structures, altitudinal ranges, morphometric parameters, and relief forms. Besides, these units evidence the importance of neotectonic activity in the formation and differentiation of relief and are a major input in the study of relief forms and natural hazards. Therefore, it is a practical tool for disaster risk mitigation by identifying areas susceptible to seismic and volcanic activity, and those related to extreme hydrometeorological phenomena, such as floods and landslides, under different vulnerability scenarios and multiple-hazard

contexts. The most vulnerable UMTVs are ancient, secondary, or current volcanic cones, areas with major faults or fracturing on moderate-to-high slopes and with tectonic-structural control, corresponding to conic and structural volcanic UMTVs or with active-fault tectonics in areas of steep slopes ($> 15^\circ$). These units display characteristics such as many rivers running through canyons, radial, semi-radial or sub-parallel drainage patterns associated with volcanic geomorphologies, and denudation aspects resulting from ancient landslides.

The greatest advantage of the proposed method is the use of easily accessible morphometric parameters from level curves and the generation of its hydrographic network, which can be replicated in similar territories or contexts with available information on basic local geology and tectonics. A limitation of the modeling method is the scale of some of the source data, as studies of this type require either having of producing accurate maps (at least 1:25.000 scale). The definition of UMTVs represents an initial input for the evaluation of natural hazards, being a valuable tool for land-use planning and risk management, with potential for replication in zones sharing characteristics similar to those of the study area, in volcanic environments and tropical climates.

Key words: Morphotectonics, volcanic geomorphology, Poás Volcano, morphometric parameters, relief.

INTRODUCCIÓN

Centroamérica es conocida por sus altos niveles de amenaza sísmica, volcánica e hidrometeorológica (Shi and Kasperson, 2015). Costa Rica, debido a su localización en la zona intertropical, se caracteriza por alta humedad y temperatura, siendo susceptible a fenómenos hidrometeorológicos. Además se sitúa en el Cinturón de Fuego del Pacífico, lo que implica una elevada amenaza por fenómenos naturales de origen geológico en un marco tectónico dominado por la subducción de la placa Cocos debajo de la placa del Caribe (y la microplaca de Panamá), y cerca de una triple unión, donde estas placas interactúan con la placa de Nazca (Figura 1).

El análisis morfoestructural o morfotectónico es el conjunto de métodos dirigidos a revelar las condiciones estructuro-tectónicas de la corteza terrestre y su papel en la conformación y consolidación del relieve actual, siendo una de las direcciones científicas de la geomorfología moderna (Dramis *et al.*, 2011; Velásquez *et al.*, 2015). Álvarez (2009) considera que es una herramienta básica en el estudio de la geomorfología tectónica y lo define

como el análisis del relieve a partir de mapas, fotografías aéreas, imágenes de satélite, observaciones de campo o datos digitales. Este análisis del relieve busca resaltar estructuras tectónicas de importancia, a partir del reconocimiento de características geomorfológicas así como también el registro de los últimos episodios recientes de fallas activas, siendo una herramienta para evaluar la probabilidad de ocurrencia del siguiente terremoto, e incluso poder dar una aproximación a su magnitud (Lin *et al.*, 2013).

En las clasificaciones morfoestructurales se toman en consideración numerosos criterios para establecer la jerarquización de las unidades que se determinan. Entre ellos están los morfológicos, morfométricos, estructuro-geológicos correlativos, genéticos, geodinámicos y de tendencias de la actividad tectónica en el grado de modelación morfoestructural (Modonesi-Gauteri *et al.*, 2002; Magaz-García *et al.*, 2006; Velásquez *et al.*, 2015). Para obtener estos criterios, en los últimos años, herramientas como la tecnología lidar y los sensores remotos, como, por ejemplo, las imágenes de radar, han venido a reforzar e impulsar los estudios

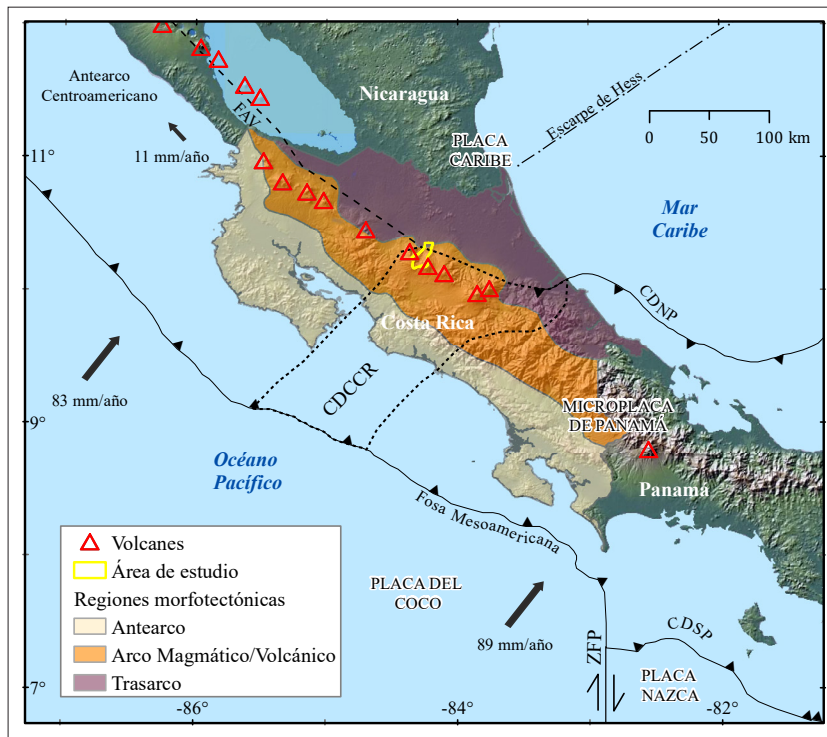


Figura 1. Marco morfoestructónico regional simplificado de Costa Rica. La región contenida dentro de la línea gruesa punteada representa el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR) de acuerdo con Montero (2001). La línea discontinua representa el límite noreste simplificado del Bloque Antearco Centroamericano a lo largo de las Fallas del Arco Volcánico (FAV) de acuerdo con Franco et al. (2012). Otras estructuras tectónicas son: Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP) y Zona de Fractura de Panamá (ZFP).

morfoestructónicos debido a las formas que permiten identificar (Sofia, 2020).

La tecnología lidar calcula distancias iluminando un objetivo con un rayo láser y midiendo el tiempo en que tarda la luz en regresar a la fuente. Al unir millones de puntos a partir de un barrido con un escáner en un área específica, se pueden recrear superficies en tres dimensiones con excelente precisión y detalle, con la posibilidad de omitir la cobertura vegetal (Ruiz *et al.*, 2014). Debido a esto el lidar permite generar modelos del terreno detallados, a pesar de la densa vegetación. Lo anterior facilita una mejor y más completa interpretación geomorfológica del relieve, permitiendo identificar geoformas no apreciables en zonas con gran densidad boscosa, principalmente en ambientes tropicales.

Múltiples estudios han utilizado este recurso para detectar y cuantificar características geomorfoestructónicas muy finas (Arrowsmith y Zielke, 2009; Lin *et al.*, 2013). Estos insumos tecnológicos permiten el análisis de morfoestructuras con poca interferencia de la cobertura vegetal, alta resolu-

ción de las imágenes, así como la capacidad de generar modelos digitales de elevación (MDE) de alta calidad.

Velásquez *et al.* (2015) reseñan que en América Latina se han desarrollado, inicialmente en Cuba, estudios de análisis morfoestructurales del relieve desde la perspectiva geomorfológica, y con un mayor auge en México, debido a la influencia de la escuela rusa (Guerasimov, 1986) y cubana Hernández-Santana *et al.*, 1994). En Costa Rica se han realizado mapeos geomorfológicos a escalas pequeñas 1:1 000 000 (Bergoeing y Brenes, 1978), medianas a 1:350 000 y 1:100 000 (Bergoeing *et al.*, 2010; Bergoeing y Brenes, 2017), y pocos a gran escala 1:50 000 (Bergoeing y Malavassi, 1981). Sin embargo, no existe una cartografía geomorfológica a escala 1:50 000 para todo el país (cartografía base), y hay pocos mapas a escalas 1:25 000 o superiores (Quesada-Román, 2016; Quesada-Román, 2018; Quesada-Román *et al.*, 2019; Quesada-Román y Pérez-Briceño, 2019; Quesada-Román y Zamorano, 2019; Quesada-Román y Mata-Cambronero, 2020; Quesada-Román y Villalobos-Chacón,

2020). Además, las categorizaciones morfotectónicas han sido regionales (Mora, 1983; Denyer *et al.*, 2003), y no se han desarrollado clasificaciones geomorfológicas desde el análisis morfoestructural y de manera local.

En este trabajo utilizamos imágenes lidar del sector noroeste del volcán Poas, generadas posteriormente al terremoto de Cinchona de 2009 (Mw 6,2) (RSN, 2009) e insumos complementarios, para analizar los rasgos morfotectónicos y proponer unidades morfotectónicas-volcánicas (UMTV) a escala 1:25 000. Se ha definido este sector como el área de interés debido a que abarca parte importante de la zona de protección de uno de los parques nacionales más visitados del país como lo es el parque nacional volcán Poás, el cual, a lo largo de su historia, ha presentado grandes muestras de su dinamismo. Además, existen varios proyectos hidroeléctricos, los cuales se estima que generan el 8% del total de la producción eléctrica de Costa Rica. Otro factor relevante por el cual se seleccionó este flanco del volcán es que, en comparación con los otros sectores (noreste y sur), es el menos estudiado.

La definición de las UMTV se realizó a partir del análisis de elementos de carácter morfométrico del relieve, de condiciones litológicas y de expresiones morfoestructurales de estructuras en el relieve (Velásquez *et al.*, 2015). Por ende, este estudio se realizó ya que representa un paso inicial en la determinación de este tipo de relaciones morfoestructurales en el relieve en Costa Rica y otros países con características similares, con utilidad como herramienta en la evaluación de amenazas naturales.

ÁREA DE ESTUDIO Y MARCO GEOTECTÓNICO

Generalidades del área de estudio

El área de estudio se sitúa al nor-noroeste del volcán Poás, en la provincia de Alajuela, Costa Rica, en las coordenadas 10°15' Latitud Norte y 84°16' Longitud Oeste, con una superficie ~200 km² y allí se ubican las cuencas altas de los ríos Toro y Cuarto, las cuales drenan hacia el mar Caribe. Su

delimitación se basó en el linde natural dado por la divisoria de aguas al noroeste del volcán Poás, extendiéndose hacia la vertiente del Caribe de acuerdo con la información geológica disponible en Ruiz (2012). La zona está comprendida según su división político-administrativa, principalmente por el distrito de Toro Amarillo, del cantón de Valverde Vega y el nuevo cantón de Río Cuarto. El distrito de Toro Amarillo posee 273 pobladores, mientras que Río Cuarto 11 074 habitantes, siendo sectores con población en su mayoría rural (INEC, 2011).

El uso del suelo que predomina es de tipo forestal y ha sido categorizado como de protección, sin embargo, se encuentran asentamientos y sectores agropecuarios de importancia. Además, se pueden encontrar varios proyectos hidroeléctricos, como Toro 1, 2 y 3, los cuales son de suma importancia para la producción eléctrica del país. Como principales actividades económicas resaltan la agricultura, la ganadería y el turismo. En cuanto a este último, el Parque Nacional Volcán Poás es el atractivo principal y se han creado negocios turísticos asociados al encadenamiento de la ruta turística que representa dicho volcán. También, se encuentran cerca atractivos turísticos naturales en las estribaciones de dicho volcán, como la catarata de La Paz y la catarata del Ángel, lo cual ha generado turismo rural, ecoturismo y el agroturismo (Municipalidad de Alajuela, 2012).

Con respecto al clima, de acuerdo con la clasificación de las provincias de humedad de Herrera (1985) el área de estudio presenta tres provincias de humedad: húmedo, muy húmedo y excesivamente húmedo. Esto está relacionado con las condiciones orográficas de la zona. Las zonas montañosas de mayor altitud presentan mayor humedad que las llanuras hacia el norte y en el valle del río Toro. Las provincias de humedad se basan en un índice hídrico de acuerdo con datos de precipitación total por año y evapotranspiración potencial anual. Las diferencias se deben a que las zonas montañosas presentan menor evapotranspiración real mientras que en las zonas bajas y planas es mayor. A su vez, en las zonas montañosas la biotemperatura por lo general es menor que en las zonas bajas.

Marco tectónico regional y fallamiento local

El contexto tectónico regional ubica a Costa Rica en un área con alta sismicidad donde tienen influencia las placas Cocos, Caribe, Nazca y la microplaca de Panamá. Además, hay una gran área de deformación cortical llamada Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), el cual es una zona de deformación con una alta densidad de fallas activas (Fan *et al.*, 1993; Goes *et al.*, 1993; Marshall *et al.*, 2000; Montero, 2001; Linkimer *et al.*, 2018) (Figura 1). Montero (2001) define el CDCCR como un sistema de fallas recientes con actividad neotectónica, difuso y ancho, ubicado en el centro del país entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá, delimitado con base en datos neotectónicos así como sísmicos y al cual le asocian un origen relacionado con la colisión del monte submarino del Coco con el sur de Costa Rica. La Cordillera Volcánica Central, dentro de la cual se ubica el volcán Poás, se localiza dentro del CDCCR. Debido a dicha ubicación, es un sector donde las estructuras neotectónicas aledañas al macizo volcánico son controladas por los esfuerzos tectónicos regionales, por procesos volcánicos, o por la interacción entre ambos (Montero *et al.*, 2010).

Estudios como los de Alvarado *et al.* (1988), Borgia *et al.* (1990), Montero (2001), Denyer *et al.* (2003) y Montero *et al.* (2010), identifican cerca del área de estudio seis fallas locales principales: Alajuela, San Miguel, El Ángel, Sabanilla, Viejo-Aguas Zarcas y Carbonera. Las fallas Alajuela y San Miguel son de tipo inversas y delimitan en sentido norte-sur el llamado deslizamiento tectónico y transtensivo del volcán Poas (Montero *et al.*, 2010). Las fallas El Ángel, Carbonera, Sabanilla y Viejo-Aguas Zarcas son fallas de rumbo de tipo dextral, en algunos casos con algún componente de desplazamiento vertical asociado, que se encuentran dentro del deslizamiento tectónico y transtensivo del volcán Poas y con un rumbo preferencial NW-SE y que han sido identificadas principalmente por evidencias geomorfológicas y geofísicas (Montero *et al.*, 2010).

Marco geológico

Las unidades geológicas (Figura 2a) se encuentran relacionadas principalmente a la actividad del vol-

cán Poás, pero también hay litologías vinculadas a la actividad de los volcanes Platanar y Barva (Ruiz, 2012). La secuencia y evolución estratigráfica de la zona de estudio está controlada por los depósitos provenientes de los volcanes mencionados, con edades predominantes de 700 ka al presente (Figura 2b). Estas edades fueron determinadas a partir de los métodos radiométricos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y ^{14}C , identificándose dos fases temporales Paleo y Neo, de acuerdo con la edad de los depósitos (Ruiz *et al.*, 2010).

Fase Temporal Paleo-Poas/Barva/Platanar

A esta fase temporal se le asocia la unidad Paleo Barva (lava y depósitos ignimbríticos), la unidad Volcán Platanar (lava andesítico-basáltica, depósitos piroclásticos y lahares), la unidad Andesitas La Paz (lava y brecha volcánica), la unidad Achioté (lava andesítica y basáltica) y las Lavas Río Cuarto (lavas y depósitos ignimbríticos). La formación de estas unidades comenzó hace ~1 Ma con los depósitos del Paleo Barva y la unidad Volcán Platanar, luego aparecen las unidades Andesita La Paz y la unidad Achioté (610-228 ka), continuando con la unidad Lavas Río Cuarto (200 ka), las cuales representan una fase de transición a la fase temporal Neo-Poás (Ruiz *et al.*, 2010; Ruiz, 2012).

Fase Temporal Neo-Poas

Con esta fase temporal se asocia la unidad Cima Volcán Poás (lavas andesíticas, basales y depósitos piroclásticos), el Miembro Von Frantzius (lavas, brechas y depósitos piroclásticos), el Miembro Congo (lavas y piroclastos andesítico-basálticos), el Miembro Toba-Lapilli Poás (tobas volcánicas), la unidad Laguna Hule y Miembro Bosque Alegre (principalmente piroclastos e ignimbritas), el Miembro Laguna Kopper (ignimbritas y brechas volcánicas) y los depósitos recientes (epiclastos fluviales no consolidados).-La secuencia de estas unidades es posterior a las Lavas Río Cuarto, cuando aparecen los Miembros Von Frantzius y Congo (140-20 ka), seguidos de la unidad Cima Volcán Poás (54 ka), el Miembro Toba-lapilli Poás (40-10 ka) y culminando con el Miembro Bosque Alegre, Laguna Kopper y los nuevos pulsos de Cima

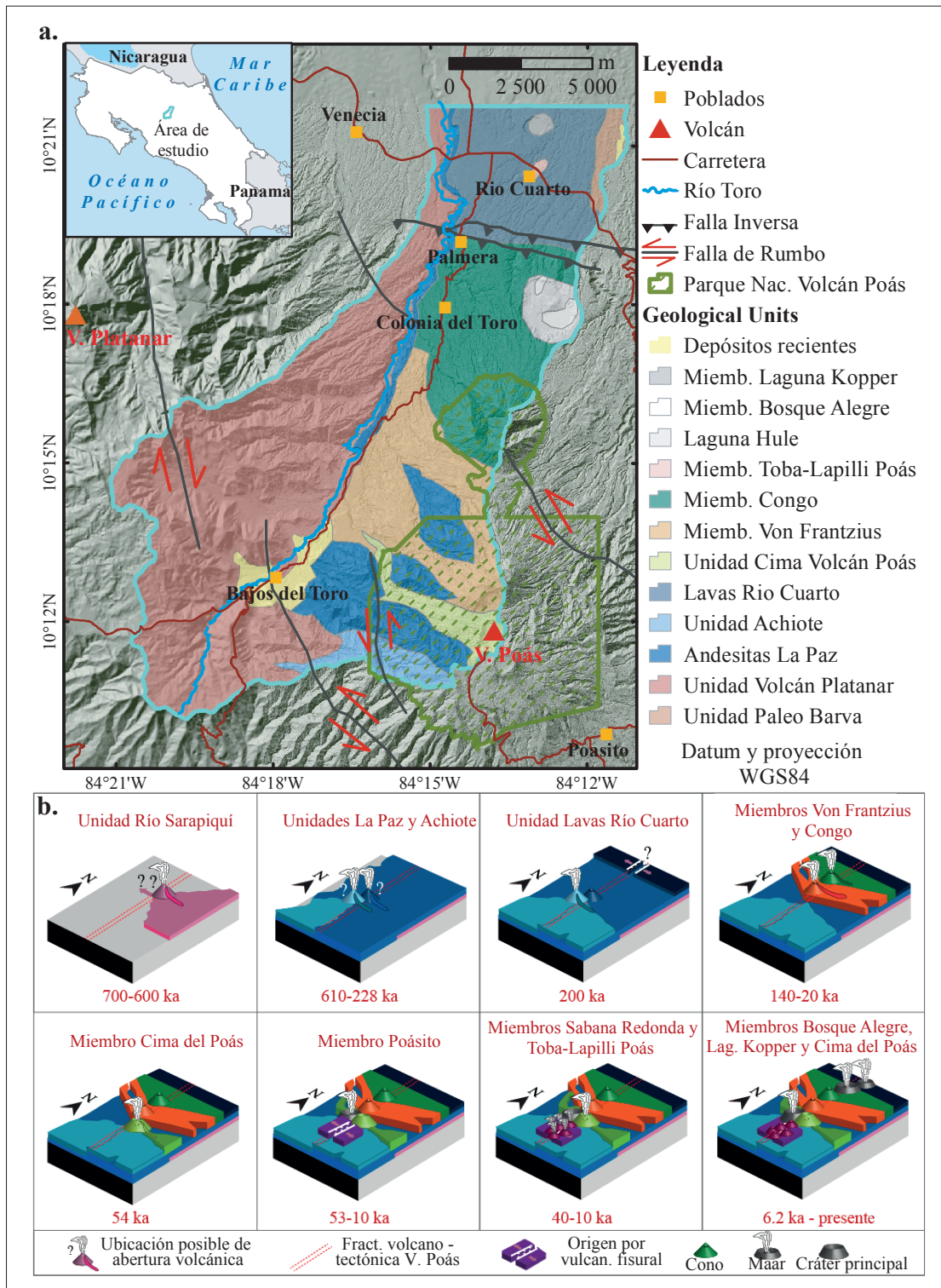


Figura 2. a) Ubicación y mapa geológico local del área de estudio. b) Cronología de la evolución geológica del volcán Poás. Fuente: elaboración propia con base en Ruiz *et al.* (2010) y Ruiz (2012).

Volcan Poás (6.2 ka-presente) (Ruiz *et al.*, 2010; Ruiz, 2012).

ASPECTOS METODOLÓGICOS

Se definieron diez unidades morfotectónicas-volcánicas (UMTV), a escala 1:25 000, basadas en la relación entre las estructuras geológicas y el relieve en el sector noroeste de la fractura volcano-tectónica del volcán Poás (Denyer *et al.*, 2003; Montero *et al.*, 2010). Este proceso se llevó a cabo siguiendo como base metodológica la propuesta por Velásquez *et al.* (2015). Los criterios considerados se evaluaron cualitativamente a partir de la caracterización de los elementos morfotectónicos y morfoestructurales, tomando como referencia la expresión regional y local de las estructuras geológicas del relieve, principalmente fallas, cráteres, maares, conos volcánicos, entre otros (Tabla 1).

Los distintos procesos metodológicos se agruparon de la siguiente manera: a) elaboración del modelo digital de elevación y sombreado, mediante el procesamiento en ArcMap 10.5, como base para los análisis morfométricos y la identificación de estructuras tectónicas; b) mapeo geomorfológico, análisis de morfoelementos del relieve, relaciones litoestratigráficas y de sismicidad; c) análisis de rangos altimétricos y de pendientes; d) análisis de patrones estructurales de acuerdo a la red hidrográfica y su morfometría (profundidad y densidad de disección); y e) interpretación de

imágenes de radar y de fotografías aéreas de fuentes disponibles. El proceso anterior busca identificar relaciones entre sistemas de fallas y morfoelementos, según Kostenko (1975) y Magaz *et al.* (1997), así como relaciones estructurales y morfométricas del relieve, según Palacio-Prieto *et al.* (1991).

De acuerdo con la interpretación y análisis de las hojas topográficas a escala 1:50,000 e imágenes lidar tomadas por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) entre marzo y abril de 2009, con resolución de 50 cm en los ejes X e Y, y de 15 cm en el eje Z, se generó un modelo digital de elevación del terreno (MDE), con curvas de nivel cada 10 m. Con base en el MDE y la información existente de estructuras geológicas del área de interés, se caracterizaron los elementos morfotectónicos y morfoestructurales, tomando como referencia la expresión regional y local de las estructuras geológicas del relieve, en particular fallas locales, cráteres, maares, entre otros. El análisis de aspectos morfométricos como la profundidad de disección, el grado de inclinación de las laderas (pendiente), los niveles altimétricos, entre otros, permite obtener elementos que expresan las características cuantitativas de las formas del relieve (Lugo, 1988). Por último, con base en el procesamiento y la sobreposición de mapas a través del sistema de información geográfica (SIG), se determinó la propuesta de asociaciones del relieve, según las similitudes entre los criterios anteriormente mencionados, generándose el mapa de las UMTV.

Tabla 1. Criterios para la definición de unidades morfotectónicas-volcánicas (UMTV).

Morfotectónicos y morfoestructurales	Fallas, tipo de falla y lineamientos Rasgo tectónico en relieve y orientación de laderas Sentido de buzamiento de fallas o estructuras Sismicidad asociada
Morfométricos	Rango altitudinal y pendientes Patrón de drenaje, densidad y profundidad de disección (erosión)
Litoestratigráficos	Formación o unidad geológica Edad Depósitos de la zona y proveniencia asociada
Forma de relieve y génesis	Tipo de geomorfología Origen de la forma de relieve

Geomorfología, estructuras tectónicas y sismicidad

Las formas de relieve del área de estudio se determinaron tomando como base la geomorfología regional del Atlas Geomorfológico de Costa Rica a escala 1:100 000 (Bergoeing y Brenes, 2017). Las unidades geomorfológicas locales se mapearon a escala 1:25 000 y están relacionadas con la actividad o influencia de los volcanes Poás y Platanar, con relieves principalmente de origen endógeno modelado y tectónico, así como algunos de tipo exógeno fluvial y gravitacional asociados a los ríos y a los procesos derivados de las laderas pronunciadas. Se identifican cuatro tipos de origen y dominios principales, que se encargan de modelar las formas de relieve determinadas: fluvial (F), denudacional (D), estructural (E) y volcánico (V)

(Figura 3a). Otras estructuras tectónicas se han identificado con base en el recuento bibliográfico (Figura 3b). Resalta la fractura volcano-tectónica del volcán Poás (Denyer *et al.*, 2003; Gazel y Ruiz, 2005), la cual es un alineamiento que atraviesa todo el edificio volcánico, asociada a episodios de vulcanismo fisural. También sobresalen los cráteres: principal (activo), Laguna Botos y Von Frantzius; los maeres Río Cuarto y Laguna Hule, así como los conos volcánicos Cerro Congo, Von Frantzius y el localizado en Laguna Hule (Alvarado, 2011) y la caldera donde se localiza el volcán Platanar, de hasta 36 km de diámetro, desde el río Toro al este hasta el río San Lorenzo al oeste (Denyer *et al.*, 2003; Bergoeing y Brenes, 2017).

Para el análisis de la distribución de la sismicidad, se identificaron los sismos superficiales

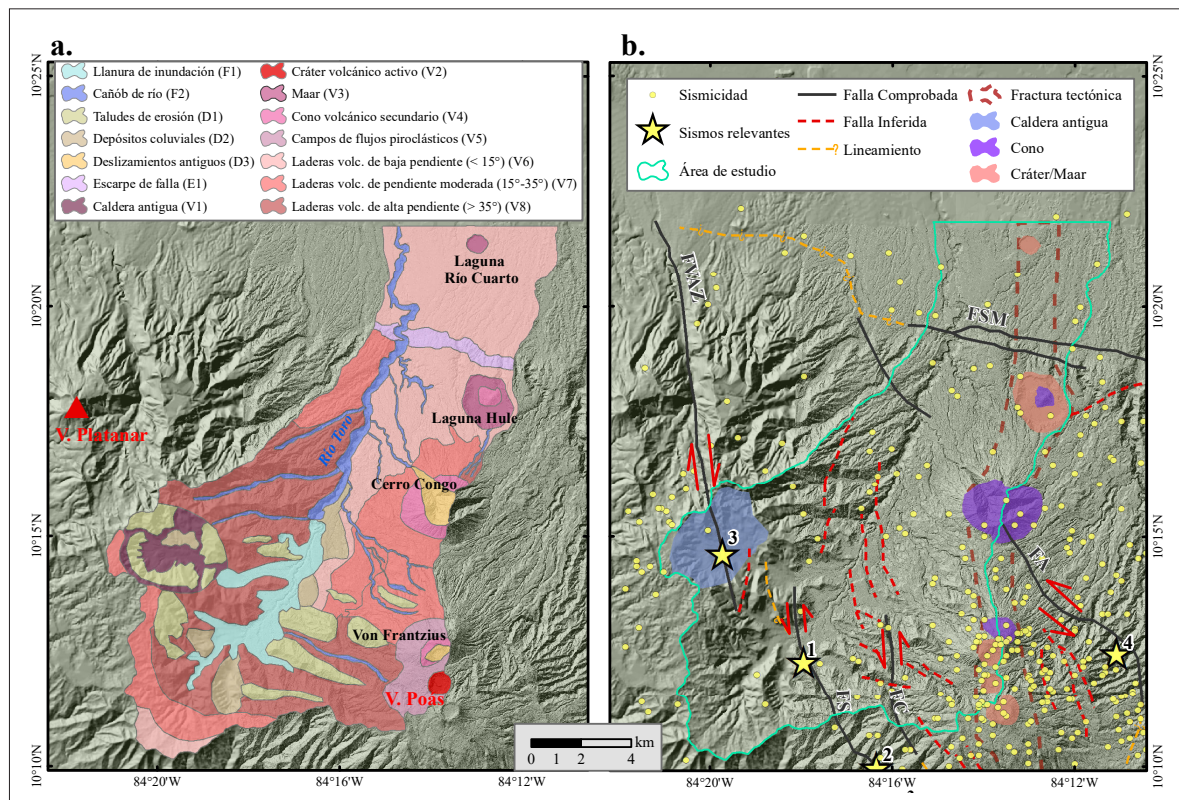


Figura 3. a) Mapa geomorfológico local del área de estudio. b) Estructuras tectónicas-volcánicas locales y sismicidad asociada. Se muestra la Falla San Miguel (FSM), la Falla Viejo-Aguas Zarcas (FVAZ), la Falla El Ángel (FA), la Falla Sabanilla (FS) y la Falla Carbonera (FC), de acuerdo con Montero *et al.* (2010). Se reseñan los terremotos de Bajos del Toro de 1911 y 1912 de 6.0 y 5.5 Mw, respectivamente (1 y 2), el terremoto de 1955 de 6.1 Mw (3) y el terremoto de Cinchona de 2009 de 6.2 Mw (4).

(profundidad ≤ 40 km) con base en el catálogo sísmico de la Red Sismológica Nacional (2019), entre 1975 y 2018. La Figura 3b muestra la distribución espacial de la sismicidad y resalta los sismos históricos que han sido sobresalientes (Alvarado *et al.*, 1988; Montero *et al.*, 2010). Entre los terremotos históricos más importantes destacan el del 15 de febrero de 1772, el de Fraijanes del 30 de diciembre de 1888, el del 28 de agosto de 1911, el del 6 de junio de 1912, el del 1 de setiembre de 1955 y el de Cinchona del 8 de enero de 2009. Del recuento de la sismicidad se observa una concentración de epicentros próximos al límite este del área de estudio, relacionados en su mayoría con la falla Sabanilla, Viejo-Aguas Zarcas y El Ángel (Figura 3b), en específico para esta última falla, resalta el sismo de Cinchona en 2009 de 6.2 Mw.

Análisis morfométrico

Para el mapa altimétrico se determinaron alturas máximas y mínimas a partir de las curvas de nivel y, posteriormente, se definieron intervalos cada 300 m. En el mapa altimétrico quedó representado, de manera general, el relieve originado por el edificio volcánico del Poás y su actividad volcánica del Cuaternario (Figura 4a). Posteriormente, el relieve de la zona se clasificó en siete rangos de pendiente con base en el MDE. Las dos primeras correspondientes a planicies de 0° y $1-4^\circ$; y las cinco clases restantes se determinaron para el relieve montañoso de $4-8^\circ$; $8-16^\circ$; $16-35^\circ$; $35-55^\circ$ y $> 55^\circ$ (Figura 4b). El análisis de los patrones de drenaje se realizó con base en la determinación de la red hídrica a detalle, haciendo una interpretación exhaustiva de los cauces inferidos por la topografía a una escala 1:25 000 (Figura 4c). Con base en la red de drenaje y el MDE se obtienen los parámetros morfométricos de densidad y profundidad de disección. Para esto se dividió el área de estudio en cuadrantes con superficies individuales de 0.1 km^2 y se obtuvo el centroide de cada uno de estos, asignándoles un ID respectivo, con la finalidad de obtener el valor máximo de densidad y profundidad de disección, como factores relacionados a la erosión (Figura 4c).

Imágenes de radar y fotografías aéreas

Se incorporó en el análisis la utilización de sensores remotos para complementar la visualización de rasgos importantes en la identificación de morfoelementos. A partir de imágenes radar del sensor Sentinel 1, se realizó un procesamiento con el software SNAP, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés). Se analizó la coherencia y la interferometría entre imágenes del 28 de febrero y 12 de marzo de 2018 (Figura 5a y 5b). La fase interferométrica se representa en unidades de decibeles (dB) y permite evidenciar deformación, sensibilidad de los cambios en la topografía y desplazamientos como lineamientos y zonas escarpadas, donde valores negativos indican hundimientos y positivos levantamientos. La coherencia permite principalmente identificar el grado de correlación entre dos imágenes, sus valores están en una escala entre 0 y 1. Estos aspectos ayudan a delimitar zonas con características similares como conos volcánicos o cráteres, deslizamientos, así como pistas en trazos de falla (Ryerson *et al.*, 1998; Grunfeld, 2018). Por otra parte, se generó un MDE complementario con el software Agisoft PhotoScan 1.4.0 a partir de las fotografías del proyecto CARTA 2005 (Figura 5c) y se generó un modelo con resolución de 20 m en el eje Z y de tamaño de celda de 10 m (Figura 5d). Esto permite corroborar mejor algunos de los rasgos importantes o sobresalientes, ayudando a la interpretación y análisis asociativo.

RESULTADOS

De acuerdo con las condiciones geológico-geomorfológicas, y los criterios basados especialmente en las estructuras tectónicas o volcánicas, el rango altitudinal, la geología y origen de las formas de relieve, la pendiente, la sismicidad y los lineamientos apreciados se definieron diez zonas o unidades morfotectónico-volcánicas (UMTV) (Figura 6, Tabla 1)

UMTV I: Río Cuarto

Denominada así por el maar o cráter de explosión de río Cuarto. Se compone esencialmente

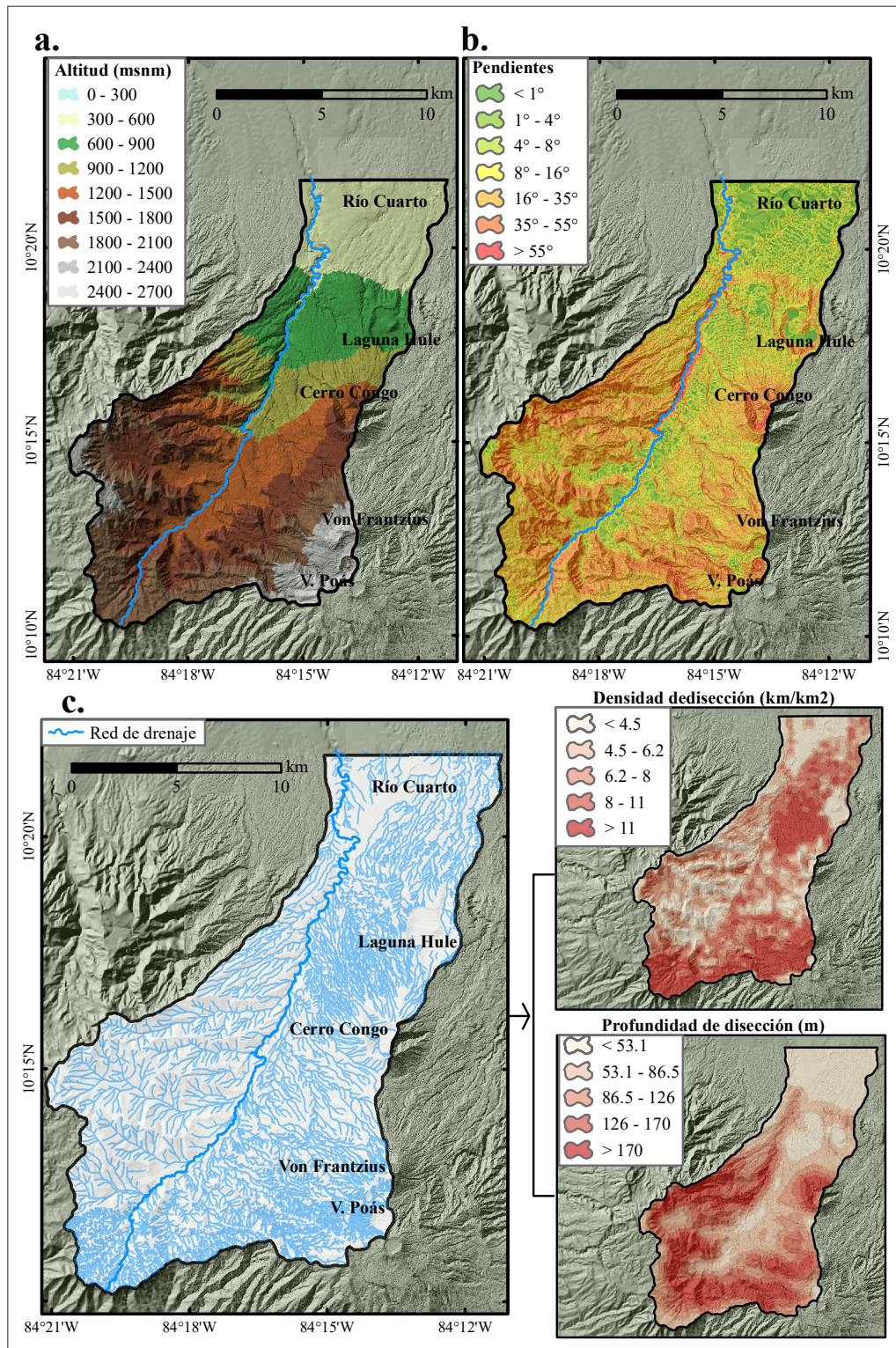


Figura 4. a) Rangos altitudinales. b) Rangos de pendientes. c) Red de drenajes y densidad y profundidad de disección.

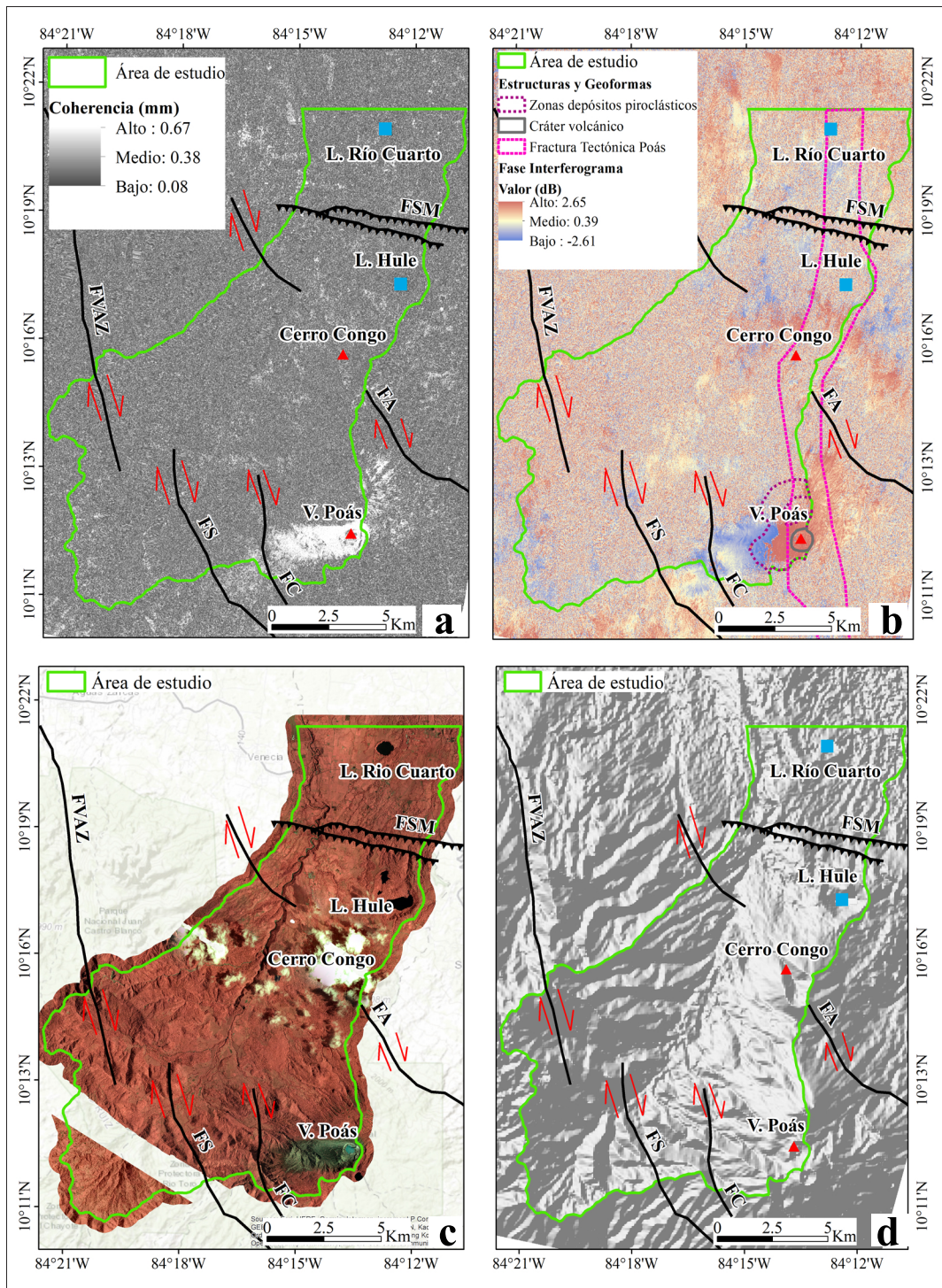


Figura 5. Procesamiento con imágenes satelitales de radar y fotos aéreas. a) Coherencia. b) Fase interferométrica c) Mosaico de fotografías a través del software Agisoft y d) Modelo del relieve resultante. Se muestra la Falla San Miguel (FSM), la Falla Viejo-Aguas Zarcas (FVAZ), la Falla El Ángel (FA), la Falla Sabanilla (FS) y la Falla Carbonera (FC), de acuerdo con Montero et al. (2010).

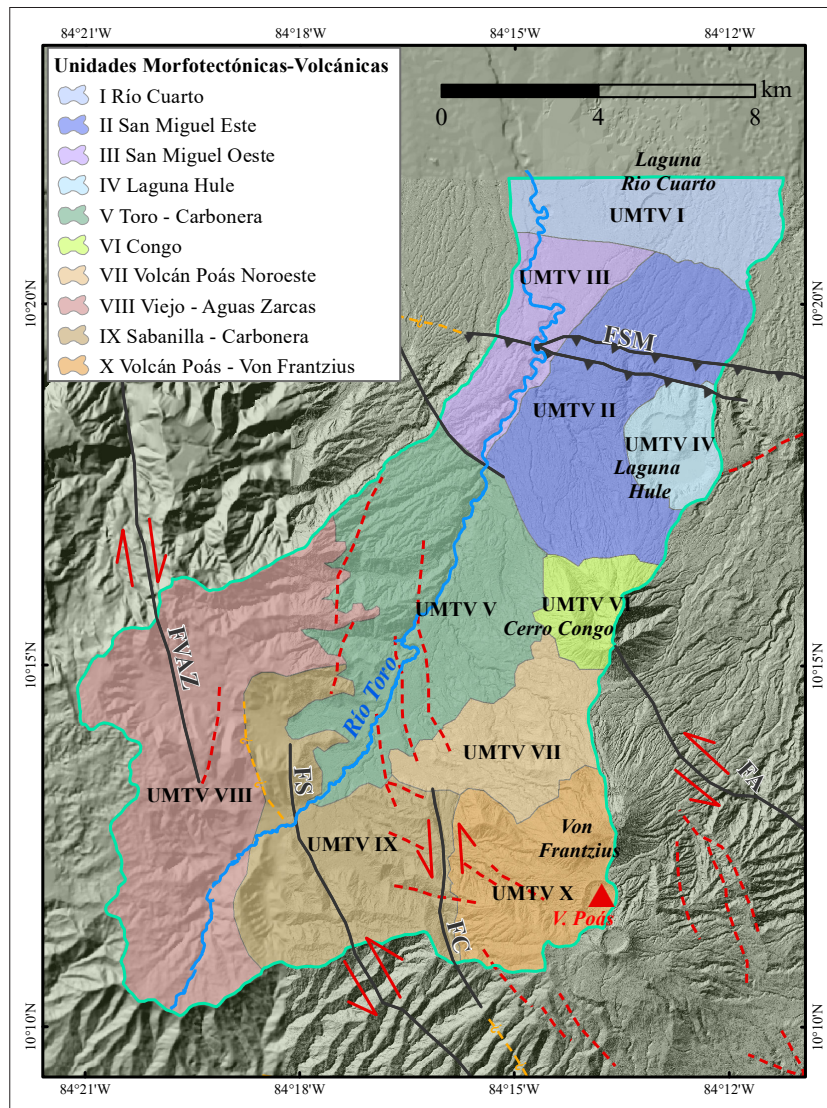


Figura 6. Unidades Morfotectónicas-volcánicas (UMTV) del sector noroeste del Volcán Poás. Se muestran las fallas inferidas y lineamientos de la Figura. 3b, la Falla San Miguel (FSM), la Falla Viejo-Aguas Zarcas (FVAZ), la Falla El Ángel (FA), la Falla Sabanilla (FS) y la Falla Carbonera (FC), de acuerdo con Montero et al. (2010).

de campos poco ondulados con pendientes en su mayoría menores a 5° , a excepción de las paredes de la laguna de río Cuarto (cerca de 30°). El grado de erosión es de moderado a alto, con un patrón de drenaje mayormente radial en los alrededores de la laguna río Cuarto y subparalelo en el resto del área. Corresponde con una planicie de altitudes menores a los 500 msnm y una profundidad de disección de drenaje baja (menor a 50 m) así como una densidad de disección entre moderada y baja. Compuesto por materiales piroclásticos y lavas asociadas principalmente a la fase temporal

Neo Poás. En términos estructurales esta zona no presenta rasgos internos significativos, más allá de la fractura tectónica del Poás, representada por el rasgo geomorfológico de la laguna correspondiente al maar de río Cuarto. Esta zona presenta una sismicidad baja y la fase interferométrica muestra valores bajos.

UMTV II: San Miguel Oeste

En esta unidad sobresale el cañón del río Toro y el sector oeste de la falla San Miguel, la cual es una falla inversa con un plegamiento de curva de

falla de propagación y una longitud aproximada de 15 km. Morfológicamente la falla presenta una hendidura de falla relacionada con un pliegue anticlinal en el frente y un pliegue sinclinal en la parte posterior. Además, se registra una moderada sismicidad asociada posiblemente a esta falla. Esta UMTV presenta altitudes principalmente entre 400 y 800 msnm, con pendientes en su mayoría entre 8 y 35°, a excepción de la zona del río encañonada con pendientes mayores a 60°. Su red de drenaje es en su mayoría subparalela, con una disección vertical intermedia, asociada al encañonamiento del río Toro con valores entre 86 a más de 126 m, y en general presenta de baja a moderada densidad de disección. Las orientaciones de laderas predominantes son hacia el norte y litológicamente esta UMTV se compone mayoritariamente de la unidad volcán Platanar. Como rasgo geomorfológico sobresale en el sector oeste del escarpe de la falla San Miguel y en el sector norte el cañón del río Toro.

UMTV III: San Miguel Este

En esta UMTV adquiere relevancia la bifurcación de la falla San Miguel en su sector este, donde se hace un poco más prominente su escarpe asociado. Además, se registra una moderada sismicidad asociada posiblemente a esta falla. Presenta altitudes principalmente entre 400 y 800 msnm, con pendientes menores a 20°, a excepción de la zona escarpada la cual presenta pendientes mayores a 50°. Su red de drenaje es en su mayoría paralela con una disección vertical de baja a intermedia, asociada principalmente al escarpe de la falla San Miguel, con valores entre 86 a 126 m, y presenta alta densidad de disección. Las orientaciones de laderas predominantes son hacia el norte y litológicamente esta UMTV se compone esencialmente de la unidad Lavas Río Cuarto y del Miembro Congo, compuestas por materiales piroclásticos, epiclastos y lavas, correspondientes principalmente a la fase temporal Neo Poás. Geomorfológicamente resalta el sector central y este del escarpe de la falla San Miguel y se presenta sobre las laderas del cerro Congo en áreas de la imagen de fase interferométrica con cambios significativos con valores entre 1.8 y 2.1 dB.

UMTV IV: Laguna Hule

Sobresale el maar o cráter de explosión de laguna Hule y Pata de Gallo. Se compone de campos poco ondulados con pendientes entre 40° a 60°, donde las mayores pendientes se encuentran en las paredes de la laguna Hule. El grado de erosión es de moderado a alto, con un patrón de drenaje en su mayoría de tipo radial en la laguna Hule. Corresponde con una planicie de altitudes entre 600 a 1000 msnm y una profundidad de disección de drenaje baja en comparación con el resto del área de estudio (menor a 90 m), así como una densidad de disección entre moderada y baja. Compuesto por lavas de los conos internos, pero principalmente por piroclastos de la fase temporal Neo Poás. Estructuralmente no presenta rasgos internos significativos, más allá de la fractura tectónica del Poás, representando como geoformas principales los mares de laguna Hule y Pata de Gallo, así como un sector del escarpe de la falla San Miguel al norte. Posee una sismicidad de moderada a baja y la fase interferométrica muestra valores bajos.

UMTV V: Toro – Carbonera

Es una UMTV con alta fracturación interna, lo cual se refleja en los múltiples trazos inferidos que se pueden asociar a continuaciones de la falla Carbonera hacia el noroeste y a los patrones geomorfológicos como facetas triangulares y alineamientos, así como un aparente control estructural de los afluentes que llegan al río Toro. A su vez, muestran una tendencia relativamente transversal al lineamiento del río. Además, se registra una moderada a alta sismicidad que podría estar asociada a este sistema de fallas menores. Esta unidad presenta altitudes principalmente entre 800 y 1400 msnm, con pendientes variables que en el sector encañonado del río superan los 60°. La red de drenaje es subparalela, con una profundidad y densidad de disección en su mayoría de baja a moderada, a excepción del sector encañonado del río Toro donde la disección vertical supera los 170 m. Esta UMTV se compone principalmente de la unidad volcán Platanar y las Andesitas La Paz, asociadas a la fase temporal Paleo, compuestas por lavas, epiclastos y flujos piroclásticos, con una alta erosión y meteorización. Como rasgos geomorfológicos resalta la

parte principal del cañón del Río Toro, el sector este del edificio volcánico del volcán Platanar y la llanura de inundación del río Toro.

UMTV VI: Congo

El rasgo geomorfológico más relevante es el volcán cerro Congo, el cual es un estratocono que no tiene un cráter bien definido y es poco conocido debido a su difícil acceso y densa cobertura vegetal, ubicado en el sector norte de la zona de estudio, entre el volcán Von Frantzius y la depresión de Bosque Alegre. Se compone principalmente de campos muy ondulados y con fuertes pendientes de entre 30° y 80° que presentan un grado de erosión de leve a moderado, con un patrón de drenaje semiradial. El rango de altitudes es de entre 1300 a 1800 msnm y unas profundidades de disección muy altas (más de 170 m). Litológicamente se compone de lavas, epiclastos y flujos piroclásticos, correspondientes al Miembro Congo de la fase temporal Neo Poás. Estructuralmente al sureste de esta UMTV se tiene parte de la traza de la falla El Ángel, la cual podría atravesar este estratocono en profundidad y tener una continuación hacia el Noroeste con un trazo que se ha asociado a una continuación de dicha falla. Esta falla es de tipo dextral con un pequeño componente normal (Montero, 2001; RSN, 2009; Montero et al., 2010) y una longitud mayor a 20 km, con rasgos como desplazamiento lateral derecho de drenajes, cambios de taludes, valles lineales, así como estanques de hundimiento.

UMTV VII: Volcán Poás Noroeste

Esta UMTV se asocia principalmente con las laderas del noroeste del volcán Poás. Se compone de campos muy ondulados y con fuertes a moderadas pendientes, mayormente entre 15° y 60°, que presentan un grado de erosión de leve a moderado. Su patrón de drenaje es subparalelo y el rango de altitudes es de entre 1400 a 1800 msnm, con profundidades de disección en su mayoría moderada (entre 86 y 126 m), así como también moderadas densidades de disección. Litológicamente se compone de lavas, epiclastos y flujos de brechas y piroclásticos, correspondientes al Miembro Von Frantzius de la fase temporal Neo Poás, así como de las andesitas La Paz de la fase

Paleo Poás. Estructuralmente esta zona no presenta rasgos internos significativos y su sismicidad es de moderada a baja. Geomorfológicamente corresponde con parte del edificio volcánico del Poás en su sector noroeste y presenta algunos cañones de ríos importantes.

UMTV VIII: Viejo-Aguas Zarcas

En esta UMTV se presenta un alineamiento importante asociado a la falla Viejo-Aguas Zarcas en el flanco este del volcán Platanar. Esta falla es de tipo dextral (Montero *et al.*, 2010) y con una longitud aproximada de 25 km, además, presenta valles de ríos alineados principalmente en el sector del río Aguas Zarcas al norte del área de estudio. Esta falla está asociada con el sismo del 1 de setiembre de 1955 de magnitud 6,1 Mw. Morfológicamente, como uno de sus principales rasgos morfológicos, en la zona se presenta una antigua caldera con pendientes irregulares y valles profundamente erosionados. Además, se registra una relativa alta sismicidad, asociada posiblemente a esta falla. Esta unidad presenta altitudes principalmente entre 1500 y 2200 msnm, con pendientes que en su mayoría superan los 45°. Su red de drenaje es en su mayoría subparalela, con una disección vertical que varía entre 120 a poco más de 170 m, y a nivel general presenta una baja densidad de disección. Las orientaciones de laderas predominantes son hacia el sureste y litológicamente esta UMTV se compone de la unidad volcán Platanar. Sus rasgos geomorfológicos principales son una caldera antigua y el sector sur-sureste del edificio volcánico del volcán Platanar, así como zonas de erosión y acumulación de material.

UMTV IX: Sabanilla–Carbonera

Esta UMTV presenta alta fracturación interna, reflejada en los múltiples trazos de falla inferidos y en algunos alineamientos, asociados a las fallas Sabanilla y Carbonera, las cuales son fallas de tipo dextral (Montero, 2001; Montero *et al.*, 2010) y de longitudes de alrededor de 25 y 6.5 km, respectivamente. Se presentan también pequeños escarpes de falla, desplazamientos laterales derechos de sistemas de drenaje, valles lineales y bermas o sillars de falla. A estas fallas, en específico a la falla

Sabanilla, se le asocian los sismos de 1911 y 1912 de 6.0 y 5.5 Mw, respectivamente. Además, se registra de moderada a alta sismicidad. Presenta altitudes principalmente entre 1400 y 2200 msnm, con pendientes que en su mayoría superan los 35°. Su red de drenaje es de paralela a subparalela, con una disección vertical que en su mayoría supera los 170 m, con una alta densidad de esta. Las orientaciones de laderas predominantes son hacia el norte y noroeste y litológicamente se tiene la unidad volcán Platanar, las andesitas La Paz y la unidad Achioté, las dos últimas asociadas a la fase temporal Paleo Poás, compuestas por lavas, epiclastos y flujos piroclásticos, con una alta erosión y meteorización. Geomorfológicamente corresponde con parte del edificio volcánico del Poás en su sector oeste y presenta importantes cañones de ríos, parte de la llanura de inundación del Río Toro, así como zonas de erosión y acumulación de material. Esta unidad presenta una depresión que colinda con la UMTV X, reseñada por valores bajos según la fase interferométrica cerca de la falla Carbonera.

UMTV X: Volcán Poás-Von Frantzius

Los rasgos geomorfológicos más relevantes de esta UMTV corresponden con el cráter activo y el edificio volcánico principal del Poás, así como el cono secundario Von Frantzius y los campos de flujos o depósitos piroclásticos. Se compone de campos muy ondulados y con fuertes pendientes, mayormente entre 20° y 70°, en un rango de altitudes de entre 2000 a 2800 msnm, que presentan un grado de erosión de leve a moderado. Su patrón de drenaje es radial a semiradial, con profundidades de disección en su mayoría muy altas (más de 125 m), así también como muy altas densidades de disección en la mayor parte de la zona. Litológicamente se compone de lavas, epiclastos y flujos de brechas y piroclásticos, correspondientes al Miembro Von Frantzius y Cima del Poás de la fase temporal Neo Poás, así como de las andesitas La Paz y la unidad Achioté de la fase Paleo Poás. Estructuralmente presenta un sistema de pequeñas fallas normales en la cima del Poás de tipo anular, el cual rodea el edificio del cráter principal y los conos Von Frantzius y Botos, todo parte de la

fractura tectónica del Poás. Este sistema de fallas de pequeñas longitudes (entre 2 y 3 km), generó pequeños colapsos en la parte cumbre del relieve, formando así una pequeña pseudo-caldera, siendo esta una morfo-estructura de subsidencia, similar a las calderas de hundimiento, pero no completamente circular, con rasgos como escarpes facetados y ríos paralelos a los trazos de las fallas. Se registra alta sismicidad asociada a este sistema de fallas y al colapso gravitacional de la estructura, así como por la actividad del volcán. En esta UMTV se observa gran variación en la imagen de fase interferométrica, con un color rojo intenso en los alrededores del cráter principal, mostrando alta deformación. Además, en la imagen de coherencia, en este sector se observan los mayores incrementos con un valor de 0.67 mm, posiblemente asociado a cenizas del volcán.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se definieron diez UMTV que permiten identificar zonas con características similares dentro del contexto de dominio volcánico y tectónico de la ladera NW del volcán Poás en Costa Rica. Esta zonificación se elaboró bajo la aplicación del enfoque estructuro-geomorfológico del relieve, mediante la aplicación de los métodos del análisis morfoestructural, sensores remotos y con base en los criterios reseñados: estructuras tectónicas o volcánicas, el rango altitudinal, la geología y el origen de las formas de relieve, la pendiente, la sismicidad y los lineamientos apreciados.

Como mencionan Velásquez *et al.* (2015) este tipo de clasificaciones constituyen una visión geosistémica de la expresión de la estructura y constitución geológica, así como de la actividad neotectónica en la formación y diferenciación del relieve tectónico-volcánico. Por tanto, las diez UMTV definidas son un insumo de gran relevancia dentro del estudio de las formas de relieve y las amenazas naturales. Por ende, es una herramienta práctica para la mitigación del riesgo de desastres mediante la determinación de áreas susceptibles a amenaza sísmica, volcánica y aquellas relacionadas con fenómenos hidrometeorológicos extremos,

como inundaciones y deslizamientos, en diferentes escenarios de vulnerabilidad y ante escenarios multiamenaza.

Las UMTV más expuestas ante el factor de multiamenaza son los conos volcánicos antiguos, secundarios o actuales, zonas con fallas importantes o fracturamiento en pendientes de moderadas a altas y con control tectónico-estructural, lo cual corresponde con UMTV volcánicas de tipo cónico y estructurales o tectónicas de fallamiento activo en geomorfologías con laderas de pendientes mayores a 15°. Dentro de estas características, se identifican las UMTV: VI Congo, X Volcán Poas-Von Frantz, VII Volcán Poas-Noroeste, V Toro-Carbonera y IV Laguna Hule. En estas unidades sobresalen características como: encañonamiento considerable de los ríos, patrones de drenaje radial o semiradial, así como subparalelos, asociados con geomorfologías volcánicas, y aspectos denudacionales producto de deslizamientos antiguos. Además, algunas de éstas son las que presentan mayor deformación asociada al tener valores más negativos o positivos en cuanto a la fase interferométrica, siguiendo una tendencia relacionada con la fractura volcanotectónica del Poás.

Con base en los resultados obtenidos, la mayor virtud del método planteado consiste en el uso de parámetros morfométricos de fácil acceso, a partir de curvas de nivel y la generación de su red hidrográfica que puede ser replicado en territorios o contextos similares, donde se cuente con un conocimiento al menos básico sobre su geología y la tectónica de la zona. Como limitación del método de modelado, se tiene la escala de algunos de los datos fuente, ya que en estudios de este tipo se requiere contar o generar una cartografía precisa (escalas 1:25,000 o de mayor detalle).

Las UMTV constituyen una metodología alternativa que utiliza insumos por lo general de fácil acceso y que podría tener gran utilidad como herramienta inicial en el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo, siendo funcional para identificar sitios más propensos ante amenazas naturales y con un gran potencial de replicación en otros lugares que presenten características similares a la zona de estudio, en ambientes volcánicos y climas tropicales.

REFERENCIAS

- Alvarado, G., Morales, L., Montero, W., Climent, A., y Rojas, W. (1988). Aspectos sismológicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 9, 75-98.
- Alvarado, G. (2011). *Los volcanes de Costa Rica: Geología, historia y riqueza natural* (3ª. ed.). San José: EUNED.
- Álvarez, J. (2009). *Tectónica Activa y Geodinámica en el Norte de Centroamérica*. Tesis Doctoral. Madrid, España: Univ. Complutense de Madrid..
- Arrowsmith, J. R. y Zielke, O. (2009). Tectonic geomorphology of the San Andreas Fault zone from high resolution topography: An example from the Cholame segment. *Geomorphology*, 113 (1-2), 70-81.
- Bergoeing, J. P. y Brenes, L. G. (1978). *Mapa geomorfológico de Costa Rica 1:1.000.000*. Instituto Geográfico Nacional. Costa Rica..
- Bergoeing, J. P. y E. Malavassi. (1981). *Carta geomorfológica del Valle Central. Escala 1:50.000* (9 hojas más texto). Instituto Geográfico Nacional. Costa Rica..
- Bergoeing, J. P., Brenes, L. G., y Salas, D. (2010). *Atlas geomorfológico de Costa Rica. Escala 1:350.000*. Editorial Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). San José, Costa Rica.
- Bergoeing, J. P. y Brenes, L. G. (2017). *Atlas Geomorfológico de Costa Rica: Escala 1: 100000*. Primera Edición. Escala 1:100 000. Heredia, Costa Rica. EUNA.
- 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*, 95 (B9), 14357-1438
- Denyer, P., Montero, W. y Alvarado, G. (2003). *Atlas Tectónico de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica..
- Dramis, F., Guida, D., y Cestari, A. (2011). Nature and aims of geomorphological mapping. En *Developments in earth surface processes* (vol. 15) (pp. 39-73). Elsevier.
- Fan, G., Beck, S. y Wallace, T. (1993). The seismic source parameters of the 1991 Costa Rica aftershock sequence: Evidence for a transcurrent plateboundary. *Journal of Geophysical Research*, 98, 15759-15778.
- Franco, A., Lasserre, D., Lyon-Caen, H., Kostoglodov, V., Molina, E., Guzman-Speziale, M., Monterosso, D., Robles, V., Figueroa, C., Amaya, W., Barrier, E., Chiquin, L., Moran, S., Flores, O., Romero, J., Santiago, J.A., Manea, M., y Manea, V. C. (2012). Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the Cocos Plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala-

- la and El Salvador. *Geophysical Journal International*, 189 (3), 1223-1236.
- 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, 45-60.
- Goes, S, Velazco, A. y Schwartz, S. (1993). The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (MW 7.7) earthquake and its tectonic implications. A broadband study. *Journal of Geophysical Research*, 98, 8127-8142.
- Grunfeld, N.A. (2018). *Introducción a Interferometría SAR – Generación de DEM*. Recuperado de <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/SAR%20Desastres%20Parte%203.pdf>
- Guerasimov, I. P. (1986), *Problemyi globalnoi geomorfologii. Sovremennaya geomorfologiya i teoriya mobilizma geologicheskoi istorii Zemli*, Nauka, Moscú.
- Hernández-Santana, J. R., Ortiz-Pérez, M. A., Magaz-García, A. R., Díaz-Díaz, J. L., y Zamorano-Orozco, J. J. (1994). Estilos geotectónicos bidimensionales y tridimensionales de interrelación interbloques: una nueva categoría neotectónica para la determinación de morfoestructuras montañosas. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México*, 28, 9-32.
- Herrera, W. (1985). *Clima de Costa Rica*. Vegetación y clima de Costa Rica (vol. 2). EUNED. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2011). Costa Rica: Población total por zona y sexo, según provincia, cantón y distrito. Recuperado de <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- Kostenko, N. P. (1975). *Geomorfología estructural aplicada*. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Lin, Z., Kaneda, H., Mukoyama, S., Asada, N. y Chiba, T. (2013). Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey. *Geomorphology*, 182, 104-115.
- Linkimer, L., Arroyo, I.G., Alvarado, G., Arroyo, M. y Bakkar, H. (2018). The National Seismological Network of Costa Rica (RSN): An Overview and Recent Developments, *Seismological Research Letters*, 89 (2A), 392-398.
- Lugo, J. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada (Métodos cartográficos)*. México: UNAM..
- Magaz-García, A. R., Díaz-Díaz J. L. y Hernández-Santana, J. R. (1997), Elementos geomorfológicos básicos para el análisis y determinación de zonas de fallamiento activo en las condiciones de Cuba. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México*, 35, 9-83.
- Magaz-García, A. R., Hernández-Santana, J. R., Díaz-Díaz J. L. y Hernández-Guerrero, I. (2006). Formación y consolidación de las morfoestructuras septentrionales de la región central del archipiélago cubano y su geodinámica reciente. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México*, 61, 7-23.
- Marshall, J., Fisher, D. y Gardner, T. (2000). Central Costa Rica deformed belt: kinematics of diffuse faulting across the Western Panamá Block. *Tectonics*, 19, 468-492.
- Modenesi-Gauttieri, M. C., Takashi Hiruma, S. y Riccomini, C. (2002). Morphotectonics of a high plateau on the Northwestern flank of the continental rift of Southeastern Brazil. *Geomorphology*, 43, 257-271.
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24, 29-56.
- Montero, W., Soto, G. y Rojas, G. A. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 13-36.
- Mora, S. (1983). *Una revisión y actualización de la clasificación morfotectónica de Costa Rica, según la teoría de la tectónica de placas*. Escuela Centroamericana de Geología, UCR. Departamento de Geología (ICE). San José, CR. Recuperado de <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20v2.0/CEDO/pdf/spa/doc11687/doc11687.htm>
- Municipalidad de Alajuela. (2012). Municipalidad de Alajuela. Obtenido de Plan de Desarrollo del cantón de Alajuela. Recuperado de <http://www.munialajuela.go.cr/app/contenido/documentos/PLANDESA-RROLLOCANTONAL2013-2023.pdf>
- Palacio-Prieto, J. L., López-Blanco, J. y Ortiz-Pérez, M. A. (1991). Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México*, 23, 89-101.
- Quesada-Román, A. (2016). *Peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del río General (Pérez Zeledón), Costa Rica*. Maestría en Geografía con énfasis en Geografía Ambiental. Posgrado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Quesada-Román, A. (2018). Cartografía geomorfológica de la cuenca del río Guacimal, Costa Rica. *Revista Geográfica Venezolana*, 59(1), 12-27. Recuperado de <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/44691>
- Quesada-Román, A. y Pérez-Briceño, P. M. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica.

- Journal of Maps*, 15(2), 363-371. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1600592>
- Quesada-Román, A., Stoffel, M., Ballesteros-Cánovas, J. A. y Zamorano-Orozco, J. J. (2019b). Glacial geomorphology of the Chirripó National Park, Costa Rica. *Journal of Maps*, 15(2), 538-545. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1625822>
- Quesada-Román, A. y Zamorano-Orozco, J.J. (2019). Geomorphology of the Upper General River Basin, Costa Rica. *Journal of Maps*, 15(2), 95-101. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1548384>
- Quesada-Román, A. y Mata-Cambronero, E. (2020). The geomorphic landscape of the Barva volcano, Costa Rica. *Physical Geography*, 1, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/02723646.2020.1759762>
- Quesada-Román, A. y Villalobos-Chacón, A. (2020). Flash flood impacts of Hurricane Otto and hydrometeorological risk mapping in Costa Rica. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 1, 142-155. DOI: <https://doi.org/10.1080/00167223.2020.1822195>
- Red Sismológica Nacional (RSN). (2009). *El Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009*. Recuperado de [rsn.ucr.ac.cr: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/terremoto_cinchona.pdf](http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/terremoto_cinchona.pdf)
- Red Sismológica Nacional de Costa Rica (RSN) (2019). *The Costa Rica National Seismological Network Catalog during 1975-2017*. DOI: <https://doi.org/10.15517TC>
- Ryerson, R. A., Morain, S. A., Budge, A. M., Henderson, F. M., Lewis, A. J., Rencz, A. N. y American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (1998). *Manual of remote sensing: Principles and applications of imaging radar*. Nueva York: Wiley.
- Ruiz, P., Garro, J. y Soto, G. (2014). El uso de imágenes lidar en Costa Rica: casos de estudio aplicados en geología, ingeniería y arqueología. *Revista Geológica de América Central*, 51, 7-31.
- Ruiz, P., Gazel, E., Alvarado, G., Carr, M. y Soto, G. (2010). Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 37-66.
- Ruiz, P. (2012). *Reconstruction of the Paleo and Neo stages of Poás and Turrialba volcanoes, Costa Rica: Competing processes of growth and destruction*. Tesis Doctoral. Rutgers, University, New Jersey.
- Shi, P. y Karspersen, R. (eds.). 2015. *World atlas of natural disaster risk*. Heidelberg: Springer.
- Sofia, G. (2020). Combining geomorphometry, feature extraction techniques and Earth-surface processes research: The way forward. *Geomorphology*, 355, 107055.
- Velásquez, G., Alcántara-Ayala, I., Hernández, J. y Garnica-Peña, R. (2015). La zonificación morfotectónica-volcánica en el análisis morfoestructural del relieve: el caso del municipio de Managua, Nicaragua. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México*, (87), 118-140. DOI: <https://dx.doi.org/10.14350/rig.43549>.