

## Unidades morfotectónicas de Costa Rica: caracterización y potencial para el ordenamiento ambiental

Morphotectonical Units of Costa Rica: Characterization and Potential for Environmental Management

Unidades morfotectónicas da Costa Rica: caracterização e potencial para gestão ambiental

*Mario Arroyo-Solórzano*<sup>1</sup>  
*Universidad de Potsdam, Alemania*

*Adolfo Quesada-Román*<sup>2</sup>  
*Universidad de Costa Rica (UCR)*



### Resumen

La dinámica tectónica y geomorfológica de Costa Rica se debe a la interacción de cuatro placas tectónicas en una zona de subducción y a procesos erosivos tropicales. En este estudio se revisan en detalle las clasificaciones y los límites entre unidades morfotectónicas de Costa Rica. Se propone una subdivisión inicial basada en elementos tectónico-estructurales y regiones morfotectónicas, con lo cual se establecen trece unidades morfotectónicas principales que abarcan relieves y características geomorfológicas similares. Por último, se analiza y se relaciona esta clasificación con factores climáticos, vegetación, geomorfología dinámica, suelos y usos del suelo, donde se evalúan las características comunes y se resalta su potencial uso como insumo de partida para el ordenamiento ambiental.

**Palabras clave:** Morfotectónica; geomorfología tectónica; tectónica de placas; paisaje; Costa Rica.

- 1 Magister en Riesgo Sísmico, Licenciado en Geología y Ciencias Geográficas y candidato a Doctor en Geociencias por la Universidad de Potsdam, Alemania. Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Alemania. [marroyo@gfz-potsdam.de](mailto:marroyo@gfz-potsdam.de) orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1653-2680>
- 2 Doctor en Ciencias Ambientales, Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José, Costa Rica. [adolfo.quesadaroman@ucr.ac.cr](mailto:adolfo.quesadaroman@ucr.ac.cr) orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6601-5254>



### Abstract

The tectonic and geomorphological dynamics of Costa Rica result from the interaction of four tectonic plates in a subduction zone, combined with tropical erosive processes. In this study, we extensively review the classifications and boundaries between morphotectonic units in Costa Rica. We propose an initial subdivision based on tectonic-structural elements and morphotectonic regions, whereby we establish thirteen main morphotectonic units that encompass similar relief and geomorphological characteristics. Finally, we analyze and related this classification with climatic factors, vegetation, dynamic geomorphology, soils, and land uses, where we evaluate common characteristics and highlight their potential use as a starting input for environmental planning.

**Keywords:** Morphotectonics; tectonic geomorphology; plate tectonics; landscape; Costa Rica.



### Resumo

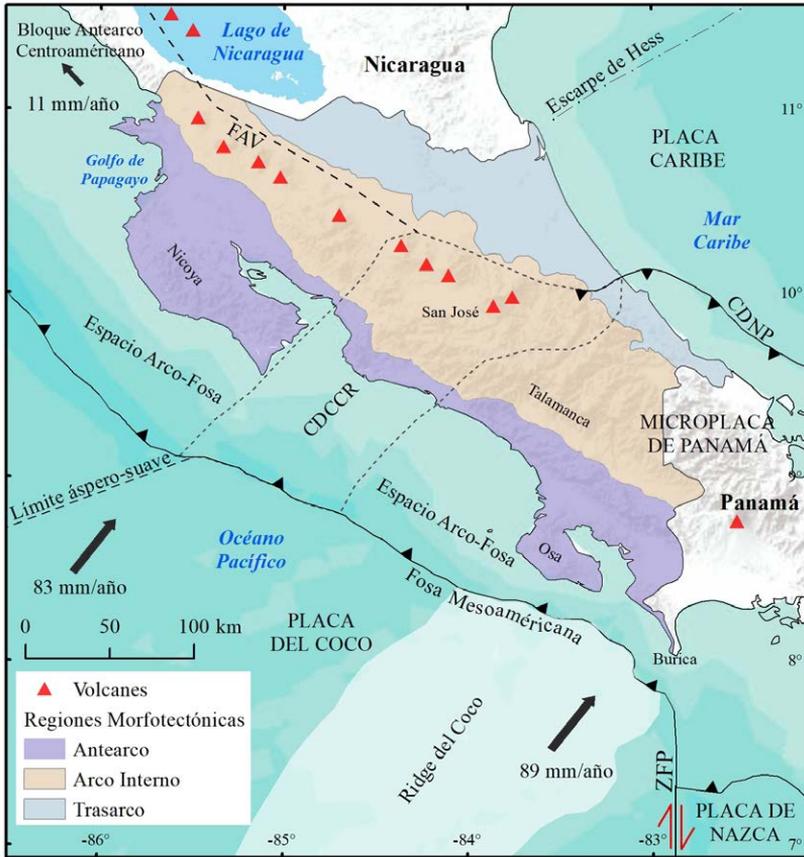
A dinâmica tectônica e geomorfológica da Costa Rica se deve a interação de quatro placas tectônicas em uma zona de subducção e aos processos de erosão tropical. Neste estudo, as classificações e limites entre as unidades morfotectônicas da Costa Rica são revisadas detalhadamente. É proposta uma subdivisão inicial baseada em elementos tectônico-estruturais e regiões morfotectônicas, estabelecendo assim treze unidades morfotectônicas principais que englobam relevos e características geomorfológicas semelhantes. Por fim, esta classificação é analisada e relacionada a fatores climáticos, vegetação, geomorfologia dinâmica, solos e usos do solo, onde são avaliadas características comuns e destaca-se seu potencial uso como insumo inicial para o planejamento ambiental.

**Palavras-chave:** Morfotectônicas; geomorfologia tectônica; placas tectônicas; paisagem; Costa Rica.

## Introducción

Costa Rica está situada dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico en un marco tectónico dominado por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe (y la microplaca de Panamá) a una tasa de 83-89 mm/año (DeMets *et al.*, 2010; Figura 1). El contexto tectónico es altamente complejo, con múltiples fuerzas internas que inducen movimientos corticales y generan varias estructuras tectónicas (Montero y Morales, 1990; Montero *et al.*, 1992). Además, el país se encuentra dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual se caracteriza por una alta humedad y temperatura; esto resulta en una exposición sustancial a estos factores externos que dan forma y desempeñan un papel fundamental en el relieve y la geomorfología del país (Veas-Ayala *et al.*, 2023). Con base en estos factores, se puede afirmar que las formas de relieve de Costa Rica son el resultado de los procesos tectónicos-erosivos combinados (Mora, 1981; Quesada-Román, 2021).

**Figura 1.** Contexto tectónico y regiones morfotectónicas de Costa Rica (Tabla 1).



Fuente: Denyer *et al.*, (2003)

La región contenida dentro de las líneas punteadas representa el Cinturón Deformado de Costa Rica Central (CDCCR). La línea discontinua simboliza el límite noreste simplificado del bloque antearco centroamericano (BAC) a lo largo de las fallas del arco volcánico (FAV). Las líneas rojas representan fallas revisadas del Atlas tectónico de Costa Rica (Denyer *et al.*, 2003) y las líneas discontinuas rosadas son depresiones o fracturas tectónicas (Porras *et al.*, 2021a; Denyer *et al.*, 2003). CDNP-Cinturón Deformado del Norte de Panamá, F-Monte submarino de Fisher, FB-Falla Barranca, FC-Falla Candelaria, FJ-Falla Jaris, FLng-Falla longitudinal,

FM-Falla Morote, FSC-Falla San Carlos, FSlt-Falla Salitre, FTm-Falla Tempisque, FvtP-Fractura volcanotectónica del Poas, LAS-Límite áspero-suave, PQ-Plateau de Quepos, ZFP-Zona de Fractura de Panamá.

Algunas de las estructuras tectónicas más importantes incluyen la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), el Escarpe de Hess, así como extensas zonas de deformación de la corteza propuestas como los límites entre la placa del Caribe y la microplaca de Panamá: el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) y el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCR) (e. g., [Adamek et al., 1988](#); [Fan et al., 1993](#); [Marshall et al., 2000](#); [Montero, 2001](#); Figura 1). Además, están las fallas del arco volcánico (fav) y el bloque de antearco centroamericano, que se mueve hacia el noroeste a una velocidad de 11 mm/año ([Franco et al., 2012](#); Figura 1). Otra estructura tectónica significativa es la cordillera submarina (*Ridge*) de Cocos, con 1200 km de longitud y un ancho de 100-350 km, la cual es subducida en el sector sureste de la costa del Pacífico de Costa Rica ([Alvarado et al., 2017](#)). La Tabla 1 resume las principales características tectónicas de Costa Rica.

**Tabla 1.** Principales aspectos del contexto tectónico de Costa Rica (Figura 1)

Aspectos tectónicos generales	Nombre
<i>Placas tectónicas</i>	Placa del Coco Placa Caribe Microplaca de Panamá Placa de Nazca
<i>Principales estructuras tectónicas</i>	Fosa Mesoamericana Zona de Fractura de Panamá Cinturón Deformado del Norte de Panamá Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica Fallas del arco volcánico Escarpe de Hess Ridge del Coco
<i>Regiones Morfotectónicas</i>	Antearco Arco interno Trasarco

Fuente: [Denyer et al., \(2003\)](#)

Además, el Atlas tectónico de Costa Rica (Denyer *et al.*, 2003), recopila las principales fallas del país (Figura 1). Dentro de estas, se han etiquetado algunas de las principales fallas con actividad neotectónica comprobada y longitudes mayores a 30 km (Figura 1). Con base en esto, se identifica que el país se ve afectado, además de las principales estructuras tectónicas de la Tabla 1, por al menos ocho fallas mayores que involucran, en algunos casos, el basamento y que se localizan principalmente en el antearco, con orientaciones predominantes noroeste-sureste (Denyer *et al.*, 2003; Morell *et al.*, 2012; Porras *et al.*, 2021b). Muchas de estas fallas corresponden con límites tectónicos importantes que definen la extensión de gran parte de las cuencas sedimentarias del país (Astorga *et al.*, 1991). Por último, el país también se ve influenciado por la subducción de estructuras batimétricas como el monte submarino de Fisher y el *Plateau* de Quepos (Figura 1).

Las clasificaciones morfotectónicas forman parte de las tendencias actuales en estudios geomorfológicos y se refieren al agrupamiento de unidades estructurales-tectónicas de la corteza terrestre y su papel en la conformación del relieve actual (Dramis *et al.*, 2011; Velásquez *et al.*, 2015). En su caracterización y clasificación, el objetivo es resaltar estructuras tectónicas importantes basadas en el reconocimiento de características geomorfológicas y procesos tectónicos recientes (Lin *et al.*, 2013). Se consideran numerosos criterios morfoestructurales para establecer la jerarquía de las unidades identificadas. Algunos de los principales criterios son morfológicos, morfométricos, genéticos, geodinámicos y análisis de la actividad tectónica (e. g., Golts y Rosenthal, 1993; Modenesi-Gauttieri *et al.*, 2002; Fodor *et al.*, 2005; Magaz *et al.*, 2006; Cotilla *et al.*, 2007; Arrowsmith y Zielke, 2009; Bathrellos y Antoniou, 2009; Ali *et al.*, 2010; Velásquez *et al.*, 2015; Sofia, 2020; Arroyo-Solórzano *et al.*, 2021). Con base en las definiciones anteriores y la caracterización de las estructuras morfotectónicas, se aclara que no se proponen ni se definen estructuras. El análisis se enfoca en agrupar o subdividir al país en unidades morfotectónicas, tomando como referencia las estructuras existentes y sus rasgos generales. El objetivo es actualizar y simplificar estas clasificaciones para su aplicación práctica, basándose principalmente en características morfológicas, y así dividir al país en distintos dominios.

Las clasificaciones morfotectónicas previas de Costa Rica, refinaron y detallaron subdivisiones del relieve del país, basadas en su origen geotectónico. Los enfoques iniciales surgieron de [Dengo \(1968\)](#) y [Weyl \(1971\)](#), quienes establecieron los primeros esquemas morfotectónicos que luego fueron descritos desde una perspectiva geomorfológica ([Bergoeing y Brenes, 1977](#)). Posteriormente, la primera clasificación formal, alineada con las tendencias globales, la propuso [Mora \(1981\)](#), basada en la terminología proporcionada por [Dickinson \(1974\)](#) con algunas adaptaciones. Desde entonces, múltiples estudios sobre la geodinámica interna de Costa Rica y la investigación centrada en la caracterización sismo-tectónica del país permitieron una mejor comprensión de la evolución de las unidades morfotectónicas y las principales características geomorfológicas en cada una de ellas (e. g., [Duncan y Hargraves, 1984](#); [Morales, 1985](#); [Montero y Morales, 1990](#); [Montero et al., 1992](#); [Goes et al., 1993](#); [Protti y Schwartz, 1994](#); [Di Marco et al., 1995](#); [Kolarsky y Mann, 1995](#); [Westbrook et al., 1995](#); [Marshall et al., 2000](#); [Montero, 2001](#); [Fodor et al., 2005](#); [Bunduschuh y Alvarado, 2007](#); [LaFemina et al., 2009](#); [Kobayashi et al., 2014](#)).

Las propuestas recientes incluyen mapas actualizados que refinan o modifican las estructuras previamente definidas conforme mejora el conocimiento tectónico del país. Entre estos se encuentran el *Atlas Tectónico de Costa Rica* ([Denyer et al., 2003](#)) y el mapa geológico nacional ([Denyer y Alvarado, 2007](#)). Además, otros estudios han refinado la clasificación de [Mora \(1981\)](#), al brindar una descripción integral de estas unidades morfotectónicas e incluir algunas estructuras marinas en las descripciones ([Alvarado y Cárdenes, 2016](#)).

En este estudio se busca proporcionar una síntesis de las clasificaciones de unidades morfotectónicas de Costa Rica hasta la fecha. Es evidente que las unidades principales no varían de forma significativa de propuestas anteriores, pero el mapa y las unidades morfotectónicas presentadas aquí incorporan información de modelos digitales de elevación detallados e implican la combinación o revisión de clasificaciones previas con otros aspectos, por ejemplo, la zonificación sísmica regional ([Alvarado et al., 2017](#)). Se presenta una desagregación y clasificación de unidades morfotectónicas, las cuales se consideran adecuadas y prácticas para un uso generalizado, pues funcionan como referencia en el país. Finalmente, se añade a estas clasificaciones algunas características climáticas, de geomorfología

dinámica y de vegetación, así como usos de suelo, los cuales representan un posible insumo adicional a considerar en el ordenamiento ambiental y una opción de potencial uso de estas agrupaciones morfotectónicas como punto de partida para la planificación territorial.

### **Resumen de la historia y evolución geotectónica**

El basamento geológico de Costa Rica se formó durante el período jurásico-cretácico. Su lecho rocoso se originó a partir de un intenso volcanismo submarino a lo largo de una dorsal oceánica, donde la placa de Farallón se desplazaba hacia el noreste, subduciéndose bajo el borde occidental de ambos continentes (América del Norte y del Sur), y otros bloques tectónicos se desplazaban hacia el este desde la placa Norteamericana, como el Bloque Chortis (Duncan y Hargraves, 1984). La corteza de la placa de Farallón se espesó en su recorrido al pasar sobre el punto caliente de las Galápagos, produciendo la Provincia Ígnea del Caribe (PIC), y el movimiento de la placa de Farallón desplazó rocas originalmente formadas mucho más al suroeste de la posición geográfica actual de Costa Rica, e incluye las rocas ubicadas en las penínsulas de Santa Elena, Nicoya, Herradura y Osa (Di Marco *et al.*, 1995).

Durante el período del paleoceno al eoceno temprano, aproximadamente hace 55 millones de años, es donde ocurre la subducción a lo largo de la Trinchera Mesoamericana, al definir la existencia de la placa del Caribe en el rompecabezas tectónico interamericano (Duncan y Hargraves, 1984). Durante este período, el territorio costarricense adquirió su posición actual, y las características tectónicas comenzaron a parecerse a su configuración actual (Pindell y Barrett, 1990). Esto condujo a la aparición de nuevas islas que formaron el arco frontal actual representando está la edad de sedimentación de las cuencas de primera generación, siendo estas las del talud de la trinchera y del antearco, así como de algunas del trasarco (Astorga *et al.*, 1991).

En el oligoceno y mioceno temprano, el arco volcánico de Costa Rica fue significativamente afectado por la influencia de la dorsal de las Galápagos y los cambios en las condiciones de subducción, lo cual causa una variabilidad composicional en los magmas y que condujo a la configuración actual del arco volcánico en Costa Rica (Gazel *et al.*, 2009; Saginor *et al.*, 2013). Durante el mioceno temprano, aproximadamente hace 20

millones de años, debido a procesos de subducción, la placa de Farallón se fragmentó, y dio origen a la placa de Cocos como una placa tectónica individual (Di Marco *et al.*, 1995).

En este punto, muchos estudios sugieren una rotación antihoraria de la placa del Coco (Meschede *et al.*, 1998; Mescua *et al.*, 2017; Porras *et al.*, 2021b), lo cual favorece la emergencia de numerosos volcanes activos, cuyos restos forman una serie de cuencas de origen tectónico. Hacia el final del mioceno o durante el plioceno se infiere que el Ridge del Coco colisionó con la Trinchera Mesoamericana, causando repercusiones geotectónicas significativas, como el levantamiento de Talamanca (Pindell y Barrett, 1990; Mescua *et al.*, 2017).

En el Plioceno, aproximadamente hace 3.5 millones de años, la intensa actividad volcánica, combinada con el relleno de cuencas sedimentarias y procesos tectónicos, condujo al cierre definitivo del istmo centroamericano (Coates, 1997). Además, en este periodo de contracción, causado por el Ridge del Coco, se dio la configuración actual de la Cordillera de Talamanca, se generó el escape tectónico (*sliver*) y se presentó el vulcanismo de Grifo Alto (Mescua *et al.*, 2017; Porras *et al.*, 2021b). Finalmente, en el período Cuaternario desde hace 1.8 millones de años hasta el presente, comenzó a tomar forma el patrón actual de volcanes activos en Costa Rica, especialmente aquellos ubicados en las cordilleras Central y de Guanacaste.

### Clasificaciones morfotectónicas previas

En esta sección se presenta un resumen de las principales clasificaciones morfotectónicas o subdivisiones geodinámicas en las que se basa la síntesis de este artículo. Se resume brevemente la subdivisión morfotectónica de Mora (1981), las estructuras geodinámicas internas delineadas por Montero *et al.* (1992) y las modificaciones sugeridas por Denyer *et al.* (2003) y Alvarado y Cárdenes (2016).

Mora (1981) definió su clasificación morfotectónica con base en cuatro unidades o elementos tectónicos principales: la placa de Cocos, la Fosa Mesoamericana, la zona de Benioff y la placa del Caribe. Las dos primeras se definen en términos generales porque no abarcan el territorio continental de Costa Rica. En cuanto a la Placa de Cocos, Mora (1981) mencionó la influencia del punto caliente de las Galápagos en sus estructuras batimétricas

como el monte submarino Fisher y la meseta de Quepos, así como las velocidades de movimiento de la placa y la existencia del triple punto de unión con las placas de Nazca y Panamá, a través de la Zona de Fractura de Panamá (Figura 1). En cuanto a la fosa, solo indicó su extensión desde la Zona de Fractura de Panamá hasta la costa sur de México, y la velocidad de convergencia entre placas.

En cuanto a las delimitaciones de la zona de Benioff, [Mora \(1981\)](#) sugirió cuatro segmentos con características distintas según sus respectivos ángulos de inclinación y profundidades de actividad sísmica. Así, definió los segmentos de Guanacaste, Puntarenas, Parrita y Golfito. Esta subdivisión no está cartografiada, pues se refiere a actividad sísmica profunda relacionada con el comportamiento de la losa que se subduce. Para más detalles se recomienda consultar estudios de zonificación sísmica más recientes que proporcionan información sobre estos aspectos (e. g., [Morales, 1985](#); [Climent et al., 2008](#); [Benito et al., 2012](#); [Alvarado et al., 2017](#)).

Por último, [Mora \(1981\)](#) describió diferentes estructuras morfotectónicas del territorio costarricense detallando la Placa del Caribe, pues en ese momento no se reconocía aún la microplaca de Panamá como un bloque litosférico separado. La subdividió en tres dominios principales: el espacio arco-fosa, compuesto por el arco externo y la región intra-fosa; el arco interno, compuesto por las cuencas intra-arco y el arco plutónico-volcánico, el cual abarca las principales cordilleras del país y, finalmente, el área del trasarco. Cada una de estas subdivisiones abarca diferentes relieves y características geomorfológicas. Cabe destacar que esta clasificación sirvió como base para propuestas posteriores, las cuales también se explican a continuación. Asimismo, es la base para la síntesis que se presenta aquí, donde los límites entre cada unidad morfotectónica han sido principalmente refinados, y, en algunos casos, se actualizó la terminología respectiva.

Otro trabajo significativo es el de [Montero et al. \(1992\)](#), el cual se centra en la geodinámica interna de Costa Rica. Estos autores incluyeron un mapa que integraba las clasificaciones de [Mora \(1981\)](#) con información sobre volcanes del plio-pleistoceno, actividad sísmica con mecanismos focales, fallas cuaternarias mapeadas, así como anomalías de gravedad y datos de estrés tectónico. Por su parte, [Montero et al. \(1992\)](#) describieron y destacaron los siguientes dominios morfotectónicos principales: el arco-fosa, la cuenca del arco-fosa, el arco interno, el área de trasarco y la cuenca de

Colombia. Además, en su mapa se agregó y enfatizó el espesor de la corteza donde, como era de esperar, se observa un aumento desde el área oceánica hasta el arco interno, con espesores de hasta 40 km en este último.

Finalmente, están las propuestas más recientes son el *Atlas Tectónico de Costa Rica* (Denyer *et al.*, 2003) y el trabajo de Alvarado y Cárdenes (2016). Estos estudios mejoraron y proporcionaron descripciones detalladas del mapa morfotectónico de Costa Rica, y agregaron nuevas estructuras tectónicas mapeadas después de las primeras clasificaciones, así como actualizaron parte de su nomenclatura. También incluyeron estudios de geología marina y estructuras en el lecho marino de la placa de Cocos. Los autores desglosaron aún más las regiones morfotectónicas que Weyl (1971) y Mora (1981) presentaron, asignando diferentes formas de relieve correspondientes a la génesis tectónica de cada sector. En estas nuevas clasificaciones morfotectónicas se identificaron siete regiones morfotectónicas principales, las cuales abarcan diferentes relieves o características geomorfológicas de Costa Rica:

- Características de la fosa y batimetría (cordilleras y montes submarinos).
- Basamento del arco-fosa (primeros terrenos levantados del país, principalmente las penínsulas).
- Cuencas del arco-fosa (cuencas de deposición de los primeros terrenos levantados).
- Frente magmático (principales cordilleras del país).
- Cuencas del eje intramagmático (depresiones tectónicas dentro del arco volcánico).
- Cinturones de deformación de pliegues y fallas inversas (levantamientos relevantes recientes).
- Cuencas del trasarco (cuencas de deposición y llanuras aluviales).

### **Síntesis de la clasificación morfotectónica para Costa Rica**

En este capítulo se presenta un mapa que recopila los principales trabajos previamente descritos, con un mayor detalle y actualizando la nomenclatura de las clasificaciones iniciales (e. g., Weyl, 1971; Mora, 1981; Montero *et al.*, 1992), pero al mismo tiempo proporciona una síntesis o agrupación de dominios morfotectónicos a partir de clasificaciones

morfoestructónicas más recientes (e. g., [Denyer et al., 2003](#); [Alvarado y Cárdenes, 2016](#)), con el objetivo de lograr un mapa simplificado para uso práctico. Además, al delimitar cada una de las unidades morfoestructónicas propuestas, se realiza un análisis detallado del relieve basado en un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) con una resolución de 10 m, así como una revisión de la superposición y la comprobación de la correspondencia entre la geología y las clasificaciones morfoestructónicas previas, basadas en el mapa geológico de Costa Rica a una escala de 1:400,000 ([Denyer y Alvarado, 2007](#)). Además, se utilizó la zonificación sísmica más reciente para América Central ([Alvarado et al., 2017](#)) como criterio adicional y complementario para definir algunos de los límites entre las unidades.

La Tabla 2 resume el agrupamiento donde el territorio costarricense se divide en tres regiones morfoestructónicas principales: 1) antearco, 2) arco interno y 3) trasarco (Figura 1). Estas regiones se encuentran controladas y definidas por relaciones tectónicas regionales resultantes de la interacción de las principales estructuras tectónicas mencionadas en la Tabla 1. Con base en estas regiones morfoestructónicas principales, cada una de ellas se desagregó para establecer diez unidades morfoestructónicas principales, y dentro de cada una de estas, se presentan los principales sistemas de relieve y características geomorfológicas que las componen (Figura 2 y Tabla 2).

Además de las principales unidades morfoestructónicas dentro del territorio costarricense, también se encuentran estructuras como la Fosa Centroamericana y los dominios de la morfología del fondo marino en la costa del Pacífico de Costa Rica, así como morfoestructuras que se encuentran sobre la placa del Cocos, donde destacan el monte submarino de Fisher (*Fisher Seamount*), la meseta submarina de Quepos (*Plateau de Quepos*) y el *Ridge* de Cocos (Figura 1). Siendo esta última, la cordillera más larga de Costa Rica, con una extensión de aproximadamente 815 km en el territorio marino ([Von Huene et al., 2000](#)).

### ***Antearco***

Representa la zona de transición entre el arco interno y la zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa del Caribe/Microplaca de Panamá. Esta región se clasifica de acuerdo con los sectores que presentan deformación reciente producto del ciclo sísmico, diferenciando entre arco

externo con y sin deformación reciente. Asimismo, se identifican depresiones tectónicas, levantamientos costeros recientes y la notable cordillera solevantada en la Fila Costeña. Esta región se denomina también como la zona de “promontorios ofiolíticos”, donde se encuentran las rocas más antiguas y el basamento geológico de Costa Rica. Principalmente consiste en rocas ígneas básicas como basaltos, gabros y sedimentos volcánicos clásticos de edad cretácica a eocena temprana (65-45 Ma) (Denyer y Alvarado, 2007; Alvarado y Cárdenes, 2016).

**Tabla 2.** Agrupamiento y subdivisión de unidades morfotectónicas de Costa Rica

Región morfotectónica	Unidad morfotectónica	Nombre
1. Antearco	1a. Arco externo con deformación reciente	- Penínsulas de Santa Elena, Nicoya, Osa y Burica
	1b. Arco externo sin deformación reciente	- Antearco de Nicaragua - Promontorios de Herradura y Quepos
	1c. Depresiones tectónicas del antearco	- Golfo de Nicoya y Golfo Dulce - Valles del Tempisque, Parrita, Diquís y Coto-Colorado
	1d. Levantamientos tectónicos recientes	- Costas de Liberia, Nicoya, Pacífico Central, Dominical y Zona Sur
	1e. Cordillera solevantada	- Fila Costeña
2. Arco Interno	2a. Arco volcánico 2b. Arco magmático/plutónico	- Cordilleras volcánicas de Guanacaste y Central - Cordilleras de Tilarán, Aguacate y Talamanca
	2c. Depresiones tectónicas intra-arco	- Valles Central, de Orosi, de Turrialba, de Talamanca y del General Coto-Brus - Depresión del Arenal
3. Trasarco	3a. Cinturón deformado de Limón Sur 3b. Plataforma levantada del Caribe	- Valle de la Estrella, Punta Uva, Manzanillo y Cahuita
	3c. Cuenca de Limón Norte	- Tortuguero, Barra del Colorado, Isla Calero
	3d. Cuenca de San Carlos	- Llanuras de San Carlos
	3e. Depresión tectónica y trasarco de Nicaragua	- Graben y Caribe de Nicaragua

Fuente: Elaboración propia

### *Arco externo con deformación reciente (1a)*

Sus principales características geomorfológicas son las penínsulas de Santa Elena, Nicoya (Figura 3a y 3b) y Osa. En el caso del antearco externo de Nicoya, este se compone y delimita por algunas fallas principalmente de tipo inverso, de rumbo y en algunos casos normales (Gursky, 1988). Para Osa, las fallas que delimitan el arco externo al igual que en Nicoya son mayormente de rumbo e inversas, con algunas fallas menores de tipo normal (Gardner *et al.*, 2013). Esto sugiere que el levantamiento del antearco está principalmente dominado por la subducción, generándose un relieve diferencial producto de las fallas que delimitan los antearcos de Nicoya y Osa. Las fallas inversas y la tectónica de subducción en ambas penínsulas ha generado levantamientos que forman montañas y colinas costeras, mientras que las fallas normales y de rumbo han dado lugar a áreas de subsidencia y cuencas (Gursky, 1988; Gardner *et al.*, 2013).

### *Arco externo sin deformación reciente (1b)*

En esta unidad sobresalen los promontorios de Quepos y Herradura (Figura 2). Se ha diferenciado del arco externo con deformación reciente, debido a que en este sector el ciclo sísmico interplacas reciente no muestra una influencia tan marcada en el terreno como si lo hacen fallas corticales como la Candelaria (Figura 1). Porras *et al.* (2021b) sugieren que esta unidad está compuesta por una serie de estructuras tectónicas, principalmente fallas de rumbo como la Candelaria, que se sugiere podría conectar con el *sliver* (Montero *et al.*, 2017) y fallas inversas. Estas fallas determinan la creación de relieves montañosos y costeros abruptos, así como la formación de valles de subsidencia y fracturas que moldean la costa del Pacífico Central de Costa Rica.

### *Depresiones tectónicas del antearco (1c)*

Esta unidad incluye depresiones tectónicas rellenas de sedimentos con más de 4.5 km de estratos que abarcan diversas edades (Astorga *et al.*, 1991). Estos sedimentos incluyen depósitos carbonatados marinos poco profundos del eoceno medio, sedimentación de aguas profundas desde el oligoceno hasta el mioceno, y depósitos de fango y arenisca poco profundos a subaéreos desde el mioceno hasta el plioceno. Les siguen rocas volcánicas clásticas de edad plioceno a cuaternario inferior, así como arenas y gravas no marinas de edad cuaternaria (Denyer y Alvarado, 2007;

Alvarado y Cárdenes, 2016). Las observaciones anteriores implican el paso de un ambiente somero a uno profundo, a través de una tectónica extensional, pasando luego a depósitos someros, lo cual indica colmatación de la cuenca entre el mioceno y el plioceno (Astorga *et al.*, 1991).

Los principales ríos en esta área fluyen a través de valles controlados por fallas normales y de rumbo, lo cual genera estructuras de *pull-apart* (Montero, 2001), donde se han depositado sedimentos costeros neógenos-cuaternarios, escombros volcánicos clásticos y bloques de depósitos piroclásticos (Denyer y Alvarado, 2007). Las principales características geomorfológicas de esta unidad son los golfos de Nicoya y Dulce (Figura 3c), así como los valles de Tempisque, Parrita, Diquís y Coto-Colorado (Figura 2).

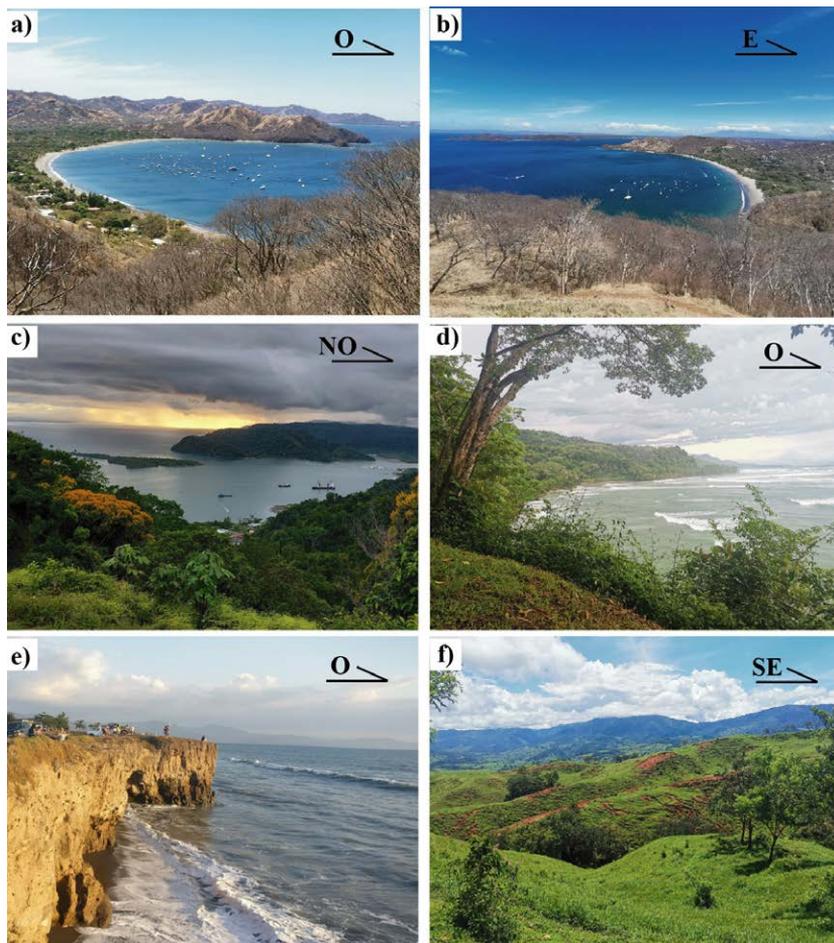
**Figura 2.** Unidades morfoestructónicas de Costa Rica (Tabla 2).



Fuente: Elaboración propia

Los límites tectónicos son los mismos de la Figura 1. Ag = cerros del Aguacate, AL = Lago Arenal, CVC = Cordillera Volcánica Central, CVG = Cordillera Volcánica de Guanacaste, FC = Fila Costeña, P = Parrita, Q = Quepos, SE = península de Santa Elena, Ti = cerros de Tilarán, VTa = Valle de Talamanca, VC = Valle Central, VCC = Valle de Coto-Colorado, VD = Valle del Diquís, VGC = Valle del General Coto-Brus, VO = Valle de Orosi, VT = Valle de Turrialba.

**Figura 3.** Ejemplos de paisajes y geoformas del Antearco (Figura 2).



Fuente: Elaboración propia

**Arco externo con deformación reciente (1a):** a) vista al sur de playas del Coco, Guanacaste; b) vista al norte del golfo de Papagayo, Guanacaste; **Depresiones tectónicas del Antearco (1c):** c) vista al suroeste del golfo Dulce, Puntarenas; **Levantamientos tectónicos recientes (1d):** d) vista al sur de playa Dominical, Puntarenas; e) vista al sur del acantilado de Guacalillo, Puntarenas; **Cordillera solevantada (1e):** f) vista al noreste de la Fila Costeña, sur de Pérez Zeledón.

### *Levantamientos tectónicos recientes (1d)*

Las terrazas marinas levantadas y los depósitos de paleo-playas indican una emergencia activa a lo largo del periodo Cuaternario tardío dentro o cerca de las penínsulas del arco-fosa (Gardner *et al.*, 2001; Denyer y

Alvarado, 2007). Estos levantamientos se deben, principalmente, a terremotos significativos que ocurren dentro del ciclo sísmico (Protti *et al.*, 2014). Además, se propone que el levantamiento de estas terrazas está vinculado a la subducción de montes submarinos a lo largo de la tendencia proyectada del monte submarino Fisher (Gardner *et al.*, 2001) en el caso del sur de la península de Nicoya y los promontorios de Quepos y Herradura.

Al respecto, Arias (2003) atribuye el levantamiento diferencial en el bloque de Herradura principalmente a las fallas inversas y la subducción, enfocándose en el levantamiento vertical desigual de bloques tectónicos. En contraste, Marshall *et al.* (2000) argumentan que el levantamiento resulta de una deformación más compleja que incluye fallas de rumbo y cizalla, por lo que se destaca el papel combinado de la compresión vertical y los movimientos horizontales en la configuración del relieve.

En esta unidad la deformación continua se evidencia por la presencia de plataformas erosionadas levantadas a lo largo de la costa de la península de Osa (Corrigan *et al.*, 1990). Asimismo, la forma alargada de norte a sur de la península de Burica es una consecuencia de la influencia de la ZFP (Alvarado y Cárdenes, 2016). Algunos ejemplos son playa Dominical en Puntarenas (Figura 3d), playa Flamingo en Guanacaste, el acantilado de Guacalillo en Puntarenas (Figura 3e), Samara-Puerto Carrillo, Cóbano-Montezuma, y el borde interno de la península de Osa (Figura 2).

### *Cordillera solevantada (1e)*

En este estudio, incluimos esta unidad como parte del sector arcofosa porque se encuentra entre el arco interno y la trinchera. Esta cordillera, también conocida como Fila Costeña, se formó principalmente por la subducción y las fallas inversas durante el Mioceno tardío a Plioceno temprano producto de la contracción inducida por el arribo del *Ridge* del Coco (Morell *et al.*, 2012; Gardner *et al.*, 2013). La región muestra actividad tectónica reciente, sin embargo, sus tasas de actividad sísmica no son muy altas (Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021), caracterizándose por fallas inversas orientadas de noroeste a sureste, resultado de tensiones compresivas (Morell *et al.*, 2008). Morfológicamente, se caracteriza por escarpes significativos, representados por la Fila Costeña (Figura 2 y Figura 3f), una cordillera de cerca de 150 km de longitud y 15-25 km de ancho, con elevaciones máximas que van desde 1100 m hasta 1400 m. La Fila Costeña

discurre paralela a la costa del Pacífico Sur en dirección noroeste-sureste (Morell *et al.*, 2008).

### *Arco interno*

Lo subdividimos en tres unidades principales: el arco volcánico de actividad cuaternaria, el arco magmático/plutónico con actividad en el mioceno-plioceno, y las depresiones tectónicas intra-arco. El arco volcánico representa el eje de Costa Rica y está compuesto por dos cordilleras volcánicas activas: la Cordillera Central y la de Guanacaste. Por su parte, el arco magmático/plutónico se conforma principalmente por cordilleras volcánicas extintas, como la de Tilarán-Aguacate, Sarapiquí y la de Talamanca. Además, las depresiones tectónicas intra-arco también están presentes como las zonas planas en esta región (Figura 2).

#### *Arco volcánico (2a)*

Entre las cordilleras volcánicas, destacan la Cordillera de Guanacaste (de 90 km de longitud) y la Cordillera Central (de 105 km de longitud), compuestas por complejos estratovolcanes y volcanes de escudo andesíticos. Los volcanes Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, Irazú y Turrialba han mostrado la mayor actividad en las últimas décadas (Alvarado y Gans, 2012). Algunos ejemplos de paisajes geomorfológicos dentro de esta unidad morfoestructónica incluyen la Cordillera Volcánica Central (Figura 4a) y los conos monogenéticos en el volcán Irazú (Figura 4b).

#### *Arco magmático/plutónico (2b)*

Dentro de las cordilleras plutónicas, destacan especialmente la Cordillera de Talamanca (de 190 km de longitud, caracterizada por elevaciones topográficas superiores a 3500 m) y la Cordillera Tilarán-Aguacate (de 100 km de longitud, compuesta por restos densamente disectados de estratovolcanes). Se sugiere que la actividad volcánica en estas cordilleras cesó en el plioceno, siendo la Cordillera de Talamanca la que presenta las altitudes más elevadas del país (Alvarado y Gans, 2012). Según Alvarado y Gans (2012), la diferenciación del vulcanismo activo viene dada por la proyección de la batimetría rugosa que se subduce (limite áspero-suave, Figura 1), que le concede un origen tectónico a Talamanca distintivo, terminando dicha cordillera en los cerros de Escazú. Algunos ejemplos de

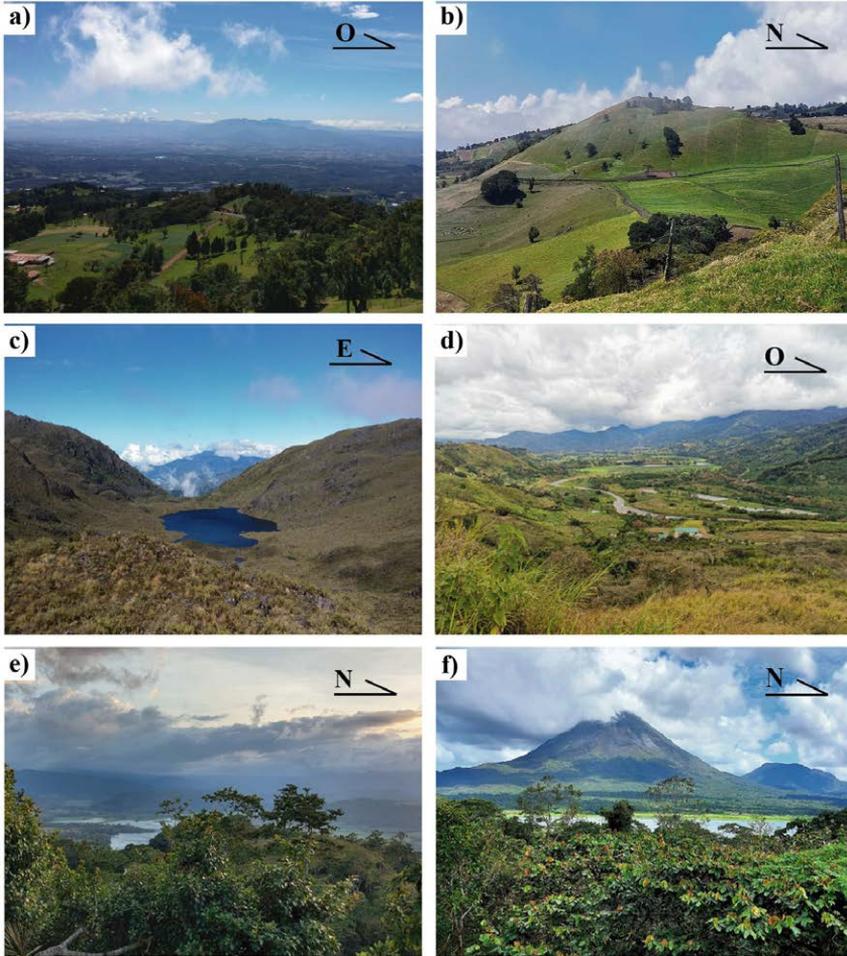
paisajes geomorfológicos dentro de esta unidad morfotectónica son la cordillera de Talamanca y el cerro Chirripó (Figura 4c).

### *Depresiones tectónicas intra-arco (2c)*

Las depresiones tectónicas intermontanas e intramontanas (Figura 2) son principalmente de origen tectónico, llenas de sedimentos volcánicos, fluviales y de laderas (Mora, 1981). Entre ellas, destaca el Lago Arenal (Figura 4f), ubicado entre el volcán Arenal y los remanentes erosionados de los volcanes de Monteverde, y limitado por fallas activas de rumbo y normales. También es notable el Valle Central (Figura 4a), situado entre los volcanes activos de la Cordillera Volcánica Central y los remanentes volcánicos erosionados de las cordilleras de Aguacate y Talamanca, lleno de una gruesa acumulación de productos volcánicos. Además, se destacan los valles General y Coto-Brus en el sur de Costa Rica (Alvarado y Cárdenes, 2016). Otras depresiones intra-arco menores incluyen el Valle de Orosi (Figura 4d), el Valle de Turrialba (Figura 4e) y el Valle de Talamanca.

Estas depresiones tectónicas concentran algunos de los centros poblados más importantes como la Gran Área Metropolitana, así como las ciudades de La Fortuna en San Carlos, Valle de Orosi, Turrialba, San Isidro del General y Buenos Aires de Puntarenas. Además, se incluye en esta unidad al Valle de la Estrella en Limón. Las depresiones tectónicas mencionadas son principalmente tipo graben, formadas por subsidencia entre fallas inversas y normales. Estas depresiones son típicamente cuencas sin-orogénicas formadas por sistemas transpresivos o transtensivos (Marshall *et al.*, 2000; Denyer y Alvarado, 2007; Morell *et al.*, 2012).

**Figura 4.** Ejemplos de paisajes y geoformas del arco interno (Figura 2).



Fuente: Elaboración propia

**Arco volcánico (2a):** a) vista al sur de la Cordillera Volcánica Central; b) vista al oeste de un cono monogenético del volcán Irazú, Cartago. **Arco magmático/plutónico (2b):** c) vista al norte del Cerro Chirripó, Talamanca. **Depresiones tectónicas intra-arco (2c):** d) vista al sur del valle de Orosi; e) vista al oeste del valle de Turrialba; f) vista al oeste del Lago Arenal.

### Trasarco

El trasarco de Costa Rica se compone en el sector Caribe por las cuencas de Limón Norte y Limón Sur, donde esta última se puede diferenciar entre la zona del cinturón deformado y la plataforma costera levantada. Asimismo, en la zona norte se encuentran la cuenca de San Carlos y la

depresión tectónica del graben nicaragüense, caracterizada por diferentes configuraciones estructurales. Incluye principalmente las llanuras del norte y caribe del país (Figura 2 y Figura 5). Esta región está compuesta por sedimentos clásticos, marinos y continentales, y algunos centros volcánicos alcalinos están presentes (Astorga *et al.*, 1991). Además, se ha evidenciado una tectónica compresional activa, principalmente en Limón Sur (e. g., Mora, 1981; Camacho *et al.*, 2010; Alvarado *et al.*, 2017).

**Figura 5.** Ejemplos de paisajes y geoformas del trasarco (Figura 2).



Fuente: Elaboración propia

*Cinturón deformado de Limón Sur (3a):* a) Río La Estrella. *Plataforma levantada del Caribe (3b):* b) Playa Cahuita. *Cuenca de Limón Norte (3c):* c) Llanuras de Tortuguero. *Cuenca de San Carlos (3d):* d) Llanuras de San Carlos.

### *Cinturón deformado de Limón Sur (3a)*

Se caracteriza por un fuerte régimen compresivo que incluye varios terremotos históricos (Brandes *et al.*, 2007; Alvarado y Cárdenes, 2016). Estructuralmente, pertenece al Cinturón Deformado del Norte de Panamá, que es una amplia zona de pliegues y fallas inversas en el margen caribeño de Panamá, sugerida como una zona de subducción incipiente, por lo que

causa una doble subducción en el sur de Costa Rica (e. g., [Camacho et al., 2010](#); [Arroyo y Linkimer, 2021](#); [Bourke et al., 2023](#)). Alternativamente, [Brandes et al. \(2007\)](#) y [Morell et al. \(2012\)](#) proponen que esta unidad morfoestructónica podría ser el resultado de compresión intracontinental formada por una colisión regional, deformación por fallas de rumbo, o procesos de *rifting*, en lugar de una subducción incipiente. Estas teorías ofrecen diferentes mecanismos tectónicos para explicar la formación y estructura del cinturón de empuje en la región.

El sistema de fallas inversas de Limón Sur se caracteriza por una serie de anticlinales asimétricos, fallas listricas y planos predominantemente de rumbo noroeste ([Zamora et al., 2021](#)). El límite estructural entre esta cuenca y la cuenca de Limón Norte es una zona de sismicidad activa conocida como Alto Moín (Figura 2), lo cual marca la transición entre el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica Central (CDCCR; [Monte-ro, 2001](#)) y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP, [Protti y Schwartz, 1994](#)). Las principales características geomorfológicas de esta unidad son el Valle de la Estrella (Figura 5a), Punta Uva y Manzanillo.

### *Plataforma levantada del Caribe (3b)*

Esta región fue intensamente afectada por el Terremoto de Limón en 1991, lo cual generó levantamiento de la línea de costa y plataformas calcáreas que dieron origen a los principales poblados (Limón, Cahuita, Puerto Viejo y Manzanillo), además de procesos de licuefacción ([Quesada-Román, 2021](#)). Por otro lado, en años recientes esta zona ha presentado intensa erosión costera ([Barrantes et al., 2020](#)). La principal zona de levantamiento reciente de esta unidad se presenta en la costa de Cahuita (Figura 5b).

### *Cuenca de Limón Norte (3c)*

La Cuenca de Limón Norte presenta una morfología de llanura costera relativamente recta (Figura 2), con crestas litorales paralelas a la costa. Es un depocentro amplio y estructuralmente homogéneo, con fallas listricas normales que estuvieron activas durante el cuaternario ([Brandes et al., 2007](#); [Zamora et al., 2021](#)). Esta cuenca se ve afectada por terremotos de magnitud baja a moderada, relacionados principalmente con fallas activas paralelas la costa, principalmente en el sector oriental del río Parismina

(Zamora *et al.*, 2021). Además, existe un enjambre sísmico conocido como el “nido de Parismina”, el cual se destaca por estar en una zona de baja sismicidad (Linkimer *et al.*, 2018; Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021; Hidalgo-Leiva *et al.*, 2023). Las principales características geomorfológicas de esta unidad son las llanuras de Tortuguero (Figura 5c), Barra del Colorado e Isla Calero.

Los límites tectónicos entre la cuenca de Limón Norte y la cuenca de San Carlos hacia el noroeste están definidos principalmente por la Falla de San Carlos, y otras fallas como la Viejo-Aguas Zarcas (Denyer *et al.*, 2003), así como las depresiones tectónicas de San Carlos, Machuca y Venado (Porrás *et al.*, 2021a). Estas fallas y zonas de deformación crean las fronteras tectónicas que separan y limitan estas cuencas en la región. Dentro de esta unidad se encuentra el arco de Sarapiquí, el cual no denota una morfoestructura particular, pero vale la pena reseñarlo como parte de la actividad volcánica del oligoceno (Gazel *et al.*, 2009).

#### *Cuenca de San Carlos (3d)*

La Cuenca de San Carlos está principalmente cubierta por depósitos aluviales y volcánicos recientes, excepto en algunos sitios a lo largo del río San Juan y en la Falla Venado (Porrás *et al.*, 2021a). En esta cuenca, se han identificado discordancias tectónicas en la sucesión del neógeno, asociadas con diferentes estilos estructurales de extensión y compresión. La cuenca tiene dos principales morfoestructuras descritas por Ballesterio *et al.* (1995) y nombradas por Porrás *et al.* (2021a) como las estructuras Venado y Machuca en los márgenes norte y sur, respectivamente, definidas por depresiones topográficas llenas de depósitos volcánicos y sedimentarios en la parte central de la cuenca (Porrás *et al.*, 2021a). Las principales características geomorfológicas de esta unidad son las llanuras de San Carlos (Figura 2 y Figura 5d).

#### *Depresión tectónica y trasarco de Nicaragua (3e)*

Estructura relacionada con un régimen extensional, caracterizada por fallas predominantemente normales en el borde suroeste del Lago de Nicaragua, con una orientación NW-SE e inclinadas hacia el nores-te, formando un graben (Alonso-Henar *et al.*, 2015; Porrás *et al.*, 2021a). Aunque su origen tectónico no está completamente establecido, se han

propuesto diferentes modelos para explicar la formación del graben, que comúnmente implica un proceso de retroceso de la losa y migración del frente volcánico (Porrás *et al.*, 2021a). Desde el punto de vista geomorfológico, corresponde a tierras bajas que abarcan una extensa llanura aluvial, típicamente a una elevación de menos de 100 m, e incluye relieve volcánico. Los principales ríos drenan hacia la cordillera volcánica, atravesando las tierras bajas aluviales y transportando una alta carga de sedimentos que se deposita en amplias llanuras aluviales en el interior (Alvarado y Cárdenes, 2016).

## Discusión

### *Procesos tectónicos, sismicidad y unidades morfoestructónicas*

Las unidades morfoestructónicas siguen en mayor o menor medida la influencia de las estructuras tectónicas principales de Costa Rica. Sin embargo, es interesante que algunas de estas estructuras en realidad no muestran una clara influencia en esta clasificación. En este sentido, es claro como la subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe y la microplaca de Panamá, juega un papel trascendental en la orientación de la mayoría de las unidades morfoestructónicas, donde la mayoría de ellas se extiende en dirección noroeste-sureste, concordante con la orientación de la Fosa Mesoamericana (Figuras 1 y 2). Siendo así, deducimos que la etapa de deformación contraccional del mioceno tardío es la principal responsable de la mayoría de los rasgos morfológicos distinguibles en las unidades morfoestructónicas identificadas. Esto es concordante con lo sugerido por otros autores y derivado de procesos como el debilitamiento termal o la subducción de la litosfera oceánica muy joven, así como una convergencia ortogonal entre las placas de Cocos y del Caribe en esa época (e.g., MacMillan *et al.*, 2004; Mescua *et al.*, 2017; Porrás *et al.*, 2021b).

Por otra parte, estructuras tectónicas inferidas a partir de deformación cortical o sismicidad, como el CDCCR y el escape tectónico del Bloque Antearco Centroamericano (BAC) o *sliver*, no muestran una influencia real en las unidades morfoestructónicas identificadas. En el caso del CDCCR corresponde con un límite difuso, y a pesar de que algunos estudios reconocen su relevancia en modelaciones geodésicas y sismotectónicas en lo concerniente al potencial sísmico (Carvajal-Soto *et al.*, 2020;

Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021), se puede concluir que no presenta rasgos morfológicos diferenciables (Figura 2). En el caso del *sliver*, este se alinea a las FAV (Figura 1), pero tampoco se identifican rasgos diferenciables por esta estructura (Figura 2), donde únicamente sigue la cadena volcánica de Guanacaste hacia el norte de Centroamérica (Montero *et al.*, 2017). La proyección hacia el sur del *sliver* no es bien conocida y algunos autores sugieren una posible conexión con la falla Candelaria (Figura 1) hacia el sur (Montero *et al.*, 2017), en vez del límite dado por la zona de deformación cortical inferida del CDCCR.

Es importante considerar diversas teorías sobre la evolución tectónica de Costa Rica para explicar el desarrollo de sus morfoestructuras. Un ejemplo es la comparación entre el *Limón thrust belt* y el proceso de subducción en el Caribe (zona del CDNP). El *Limón thrust belt* sugiere la existencia de fallas que influyen en la deformación y elevación del terreno (e. g., Brandes *et al.*, 2007), mientras que la subducción del Caribe plantea un modelo de placas tectónicas que interactúan directamente bajo la región (e.g., Camacho *et al.*, 2010; Bourke *et al.*, 2023). Otro ejemplo viene dado por el arribo del *Ridge* del Coco, lo cual ha sido debatido en términos de su cronología y su significado para la evolución tectónica (e. g., Meschede *et al.*, 1998; Gazel *et al.*, 2009; Saginor *et al.*, 2013). Su arribo es estimado entre 0.5 y 8 Ma, con diversas implicaciones en la consecución de los distintos procesos tectónicos y el desarrollo de estructuras según la edad de arribo que se asuma. A pesar de esto, la mayoría de los autores sugieren que su colisión habría generado un aumento en la actividad volcánica y deformaciones en la corteza, moldeando las estructuras actuales del país (Morell *et al.*, 2015; Gardner *et al.*, 2013; Mescua *et al.*, 2017; Porras *et al.*, 2021b). Con base en esto, se infiere que la mayoría de las estructuras del antearco deben mucho de su morfología actual al arribo del *Ridge* del Coco, principalmente el caso de la Cordillera Solevantada. Asimismo, la deformación de la placa superior y el cese de la actividad volcánica del mioceno tardío tendría una relación directa con el arribo del *Ridge* del Coco.

Las diversas teorías en cuanto a procesos tectónicos que controlan o controlaron distintos momentos de la historia geológica de Costa Rica destacan las complejidades de su entorno geodinámico. Esto resalta la importancia de seguir integrando datos estructurales, geofísicos y morfológicos para comprender mejor su desarrollo y soportar o descartar las teorías

que se han planteado. En este estudio se da énfasis en los rasgos morfológicos actuales que diferencian las unidades morfotectónicas y algunas descripciones generales que han sido las mayormente adoptadas, por lo tanto, ahondar en dicha discusión se sale del alcance de este trabajo. Sin embargo, se sugiere para el futuro una mayor atención a teorías alternativas y más soporte de datos geofísicos, geodésicos y geoquímicos, para una mejor definición de los procesos responsables de moldear el terreno y de conformar las unidades morfotectónicas diferenciables hoy en día.

Además, se ha analizado la clasificación de unidades morfotectónicas propuestas, con respecto a la zonificación sísmica más reciente para Costa Rica y Centroamérica. [Alvarado et al. \(2017\)](#) presentan en su zonificación de 29 zonas sísmicas que corresponden con el territorio costarricense o sus vecindades. De estas 29, 19 corresponden con zonas de placa superior, 5 con segmentos del interplaca y 5 del intraslab. Es clara la relación de las unidades del antearco externo asociadas con deformación reciente (1a) y los levantamientos tectónicos recientes (1d), con los segmentos del interplaca que presentan ciclos sísmicos más cortos y de mayor potencial sísmico (Nicoya y Osa). De este análisis y de acuerdo con las tasas de sismicidad reportadas ([Arroyo y Linkimer, 2021](#)), es claro que el antearco es dominado por la sismicidad interplacas. Por su parte, en las zonas corticales asociadas con el arco interno, las tasas de sismicidad y las magnitudes máximas esperables son considerablemente más altas en el sector del arco volcánico (2a) que en el plutónico (2b). Esto puede deberse a una mayor deformación causada por los edificios volcánicos activos. Por último, en la región trasarco la sismicidad es más baja, lo cual dificulta diferenciar regímenes sismotectónicos. Esta zona tiene la amenaza sísmica más baja del país ([Hidalgo-Leiva et al., 2023](#)), a excepción de la zona del Cinturón Deformado de Limón Sur o del Norte de Panamá, donde la sismicidad es un poco más frecuente y con mayor potencial.

Finalmente, resulta interesante evaluar el papel de algunas de las principales fallas con respecto a las unidades morfotectónicas establecidas. Se resalta la influencia de las fallas Tempsique, Candelaria y Longitudinal (Figura 1) en los límites de las depresiones tectónicas del antearco (1c) con el arco externo de deformación reciente (1a), el arco magmático-Plutónico (2b) y la Cordillera Solevantada (1e), respectivamente. De igual forma ocurre con las fallas Jaris y Salitre (Figura 1), delimitando las depresiones

tectónicas intra-arco (2c) del arco interno plutónico (2b). Adicionalmente, también se observa cómo las depresiones tectónicas de la zona norte del país juegan un papel clave en la diferenciación de las cuencas del trasarco con respecto al arco volcánico (2a). Estos aspectos, junto con la zonificación sísmica, permiten reflejar como estructuras neotectónicas y de alta o baja sismicidad asociada, juegan un papel clave en los límites de algunas unidades morfotectónicas, fungiendo en algunos casos como marcadores morfológicos de su actividad y, a la vez, denotando el paso entre regiones con morfologías determinadas por comportamientos tectónicos distintos.

### ***Unidades morfotectónicas como insumo para el ordenamiento ambiental***

En esta subsección, se analizan las características generales de las unidades morfotectónicas previamente definidas, integrando factores productivos, demográficos, tipos de suelo, clima, entre otros. A partir de estos aspectos, se proponen estrategias para incorporar la zonificación morfotectónica en los planes de ordenamiento ambiental, con el objetivo de optimizar el uso sostenible del territorio.

En la región del antearco, la unidad del arco externo presenta contrastes climáticos marcados, con precipitaciones que varían desde los 1500 mm anuales en la árida península de Santa Elena hasta más de 5000 mm en la húmeda península de Osa. Estas diferencias se reflejan en la vegetación, la cual varía desde el bosque seco tropical en el Pacífico Norte hasta el bosque siempreverde basal en Osa. Los usos del suelo en estas áreas van desde extensos bosques y pastizales hasta cultivos anuales y perennes, especialmente en las zonas de baja altitud cercanas al mar.

Las depresiones tectónicas del antearco presentan dinámicas deposicionales activas, en especial durante eventos de precipitación extraordinaria, como los asociados a ciclones tropicales o temporales (Quesada-Román, 2022; Hidalgo *et al.*, 2024; Quesada-Román *et al.*, 2024). Estas áreas, caracterizadas por llanuras inundables, albergan importantes ecosistemas de humedales y manglares, que compiten con los usos del suelo dominados por la agricultura intensiva, como la caña de azúcar, la palma africana y el arroz. Estos usos del suelo, aunque productivos, requieren un manejo cuidadoso para no comprometer los frágiles ecosistemas presentes (Silva-Benavides, 2009; Acuña-Piedra y Quesada-Román, 2021).

En cuanto a los levantamientos tectónicos recientes del antearco, estos generan un paisaje de cerros y montañas costeras rocosas que en las últimas décadas se han dedicado principalmente al turismo de playa, con el desarrollo de miradores, hoteles y residencias. Sin embargo, estas áreas deben gestionarse de manera sostenible para minimizar el impacto en los entornos naturales cercanos. Por último, la Fila Costeña, con suelos de Ultisoles, Inceptisoles y Entisoles, presenta una matriz de bosques intercalada con actividades agrícolas y pastizales (Quesada-Román *et al.*, 2023).

En el arco interno, las cordilleras volcánicas, además de presentar peligros sísmicos y volcánicos significativos, representan una amenaza latente debido a su proximidad a las áreas más densamente pobladas del país. Las lluvias estacionales y eventos extremos de precipitación, combinados con la actividad tectónica, pueden desencadenar deslizamientos y flujos de lodo, afectando a estas poblaciones (Alvarado, 2021; Arroyo-Solórzano *et al.*, 2022; Arroyo-Solórzano, 2023). Las depresiones tectónicas intrarco, como el Valle Central, son áreas tradicionalmente habitadas debido a sus suelos fértiles y acceso a agua superficial y subterránea. Los suelos predominantes, como los Andisoles, Inceptisoles, Ultisoles y Oxisoles, favorecen actividades agrícolas como el cultivo de café, piña y pastos, pero requieren una gestión adecuada del uso del suelo para evitar la degradación (Camacho *et al.*, 2020; Cortés *et al.*, 2024).

El trasarco, especialmente en la región del Caribe Sur, está dominado por actividades agrícolas como el cultivo de banano y la ganadería, aunque el turismo y el transporte marítimo también juegan un papel relevante en la economía local. Las llanuras aluviales del Caribe Norte, como las de la Cuenca de Limón Norte, son planas y fértiles, aunque vulnerables a inundaciones. Los meandros abandonados y las llanuras aluviales se entremezclan con lagunas y barras costeras a lo largo de sistemas de canales fluviales, en una matriz de pantanos boscosos o yolillales (Quesada-Román y Pérez-Briceño, 2019). En la Cuenca de San Carlos, los suelos van desde los Entisoles hasta los Ultisoles, con Oxisoles en áreas más estables morfológicamente, donde se han desarrollado cultivos como piña, pastos y granos básicos (Camacho *et al.*, 2021). Al final, la depresión tectónica de Nicaragua presenta humedales que han sido históricamente drenados para la agricultura (Quesada-Román y Villalobos-Chacón, 2020).

La información generada sobre las unidades morfotectónicas constituye un insumo valioso para el diseño de políticas de zonificación y regulaciones en el marco del ordenamiento ambiental en Costa Rica. Las diferencias geomorfológicas, tectónicas y climáticas entre las unidades establecen parámetros claros para el tipo de uso del suelo más apropiado en cada región. Por ejemplo, en las depresiones tectónicas del antearco, donde los riesgos de inundación son altos, se debe priorizar la conservación de los humedales y manglares, al integrar prácticas de agricultura sostenible que no pongan en peligro estos ecosistemas (Quesada-Román, 2024). En zonas como el Valle del Tempisque y el Golfo Dulce, donde los ciclos de inundación natural son frecuentes, la planificación del uso del suelo debe centrarse en mantener estos procesos naturales, al permitir el almacenamiento de agua y la recarga de acuíferos. La promoción de prácticas agrícolas como la agroforestería, combinando cultivos perennes y especies nativas de árboles, puede reducir la erosión y mejorar la retención de agua en estas áreas, con lo cual se evitan impactos negativos en los ecosistemas de humedal (Quesada-Román, 2022; Acuña-Piedra y Quesada-Román, 2021). Asimismo, en estas zonas es fundamental implementar corredores biológicos que conecten ecosistemas clave como los manglares, facilitando la movilidad de la fauna y protegiendo la biodiversidad.

En los levantamientos tectónicos recientes, particularmente en áreas costeras dedicadas al turismo, es fundamental establecer regulaciones estrictas sobre el uso del suelo para prevenir la expansión descontrolada de desarrollos turísticos y residenciales. Ejemplos de estas áreas incluyen las costas a lo largo del Pacífico, donde los desarrollos turísticos han crecido rápidamente en las últimas décadas. La planificación en estos sitios debe considerar la protección de las zonas de recarga hídrica en las montañas costeras y las áreas de alto valor ecológico, como los ecosistemas de bosque seco tropical y matorral costero. Por ejemplo, en la zona de Dominical se puede restringir la expansión urbana en pendientes pronunciadas para evitar la deforestación y reducir la probabilidad de deslizamientos (Quesada-Román *et al.*, 2023). Además, se deben aplicar directrices claras para el manejo de aguas residuales y la gestión de residuos sólidos, para evitar la contaminación de las cuencas hidrográficas cercanas y los sistemas marinos adyacentes.

Otro ejemplo relevante es el caso de las cordilleras volcánicas del arco interno, donde los riesgos volcánicos y sísmicos son una constante. Las cordilleras de Guanacaste y Central, por ejemplo, presentan suelos fértiles que fomentan actividades agrícolas, como el cultivo de café y hortalizas, pero estas actividades deben realizarse bajo un marco de sostenibilidad que minimice el impacto de los desastres y la erosión. En estos lugares, es crucial fomentar la reforestación de áreas cercanas a los volcanes activos para reducir la erosión y los riesgos asociados a la caída de ceniza o lahares, que pueden afectar la productividad agrícola y poner en peligro la seguridad alimentaria de la región (Alvarado, 2021). También debe contemplarse la creación de zonas de amortiguamiento alrededor de áreas de alto riesgo, limitando los desarrollos urbanos y agrícolas en proximidad a los volcanes activos.

En el trasarco, específicamente en las cuencas de Limón Norte y San Carlos, el uso del suelo ha sido históricamente dominado por la agricultura de gran escala, con cultivos como la piña y el banano. Sin embargo, la planificación territorial debe enfocarse en mitigar los problemas de degradación del suelo y la contaminación de los cuerpos de agua por el uso intensivo de agroquímicos (Zamora-Espinoza *et al.*, 2024). En estas regiones, las estrategias de manejo de cuencas son esenciales para controlar la erosión del suelo, proteger los acuíferos y prevenir las inundaciones en las áreas bajas. En la Cuenca de San Carlos, por ejemplo, la implementación de prácticas de agricultura regenerativa, como la rotación de cultivos y el uso de cobertura vegetal permanente, puede ayudar a preservar la calidad del suelo y reducir la dependencia de insumos químicos (Camacho *et al.*, 2021).

Finalmente, en las zonas de la Depresión Tectónica de Nicaragua y el Caribe Norte, caracterizadas por suelos aluviales y extensas áreas de humedales, es vital establecer regulaciones que protejan estas áreas de actividades de drenaje y expansión agrícola no planificada. En la región de Tortuguero, por ejemplo, se pueden diseñar planes de manejo que limiten la conversión de humedales en tierras agrícolas, manteniendo las funciones ecológicas de estos ecosistemas, los cuales son esenciales para la regulación hídrica y la protección contra inundaciones (Quesada-Román y Villalobos-Chacón, 2020).

La zonificación ambiental basada en las unidades morfotectónicas ofrece una base integral para el manejo racional y sostenible del territorio. Al integrar esta información en la planificación territorial, se puede garantizar un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación de los recursos naturales, minimizando los riesgos derivados de los desastres y optimizando los beneficios ecosistémicos.

### **Conclusiones**

Se revisaron las principales clasificaciones morfotectónicas para Costa Rica, y se presenta un nuevo mapa que integra, sintetiza y proporciona una representación actualizada con suficiente detalle y utilidad para su uso práctico y simplificado. Se propone una clasificación que distingue entre los principales elementos tectónicos, incluyendo: 1) placas tectónicas que interactúan o tienen influencia sobre Costa Rica, 2) los elementos tectónicos-estructurales más grandes y relevantes, y 3) las regiones morfotectónicas (sector arco-fosa, arco interno y trasarco).

Se determinaron diez unidades morfotectónicas específicas, que abarcan los principales paisajes geomorfológicos y características de Costa Rica. Estas unidades fueron delimitadas cuidadosamente mediante una revisión y superposición de clasificaciones morfotectónicas anteriores, análisis de modelos digitales de elevación detallados, el mapa geológico de Costa Rica e incluso zonificaciones sísmicas recientes. El sector arco-fosa se subdividió en cuatro unidades, que consisten en el antearco, las depresiones tectónicas intra-fosa, las zonas recientes de levantamiento tectónico y el cinturón de deformación de fallas de cabalgamiento. El arco interno se dividió en dos unidades: el arco plutónico/volcánico, que comprende las principales cordilleras del país, y las depresiones tectónicas intra-arco, las cuales constituyen regiones intermontanas planas y las áreas más densamente pobladas del país. Finalmente, el trasarco se subdividió en las cuencas de Limón Sur y Norte, la cuenca de San Carlos y la depresión tectónica de Nicaragua, que comprenden las principales llanuras del país.

En conclusión, el relieve y la composición morfotectónica de Costa Rica deben su origen a la interacción histórica y evolución de varios procesos geotectónicos que ocurrieron en el territorio, así como a la formación y modificación de algunas estructuras tectónicas o elementos principales generados por la fuerza motriz de la tectónica de placas. Las regiones y unidades

morfotectónicas se crearon principalmente debido a la interacción entre las placas de Cocos y del Caribe, y la microplaca de Panamá, siendo esta interacción el principal generador de las tensiones tectónicas y del régimen tectónico dominante en el país (subducción). Sin embargo, a través del desglose de las unidades morfotectónicas en subunidades más pequeñas, se puede afirmar que muchos otros elementos estructurales tienen una influencia significativa en el relieve de Costa Rica, como el Cinturón Deformado del Norte de Panamá, algunas de las fallas mayores del antearco y arco interno, el *Ridge* del Coco y montes submarinos, así como la depresión tectónica de Nicaragua.

El conocimiento de las unidades morfotectónicas de un país o región es fundamental para la planificación territorial y ambiental. En este trabajo se presenta una clasificación con caracterizaciones climáticas, de vegetación y usos de suelo como potencial insumo como punto de partida para el ordenamiento ambiental. Estas unidades representan las características geológicas y topográficas del territorio, lo cual permite una comprensión completa del paisaje y facilita la identificación de áreas adecuadas para diferentes usos del suelo, la gestión de riesgos naturales, la conservación del medioambiente y la promoción del desarrollo sostenible. Integrar este conocimiento en el ordenamiento territorial y ambiental es esencial para minimizar los impactos ambientales negativos y promover un uso sostenible de los recursos naturales.

### **Agradecimientos**

Se agradece a Gabriela Becerra por su asistencia durante la redacción de este documento. Agradecemos también a los editores de este volumen y al revisor M. Sc. Hernán Porras, por sus valiosos comentarios que permitieron mejorar la calidad del manuscrito

### **Referencias bibliográficas**

- Acuña-Piedra, J. F. y Quesada-Román, A. (2021). Multidecadal biogeomorphic dynamics of a deltaic mangrove forest in Costa Rica. *Ocean & Coastal Management*, 211, 105770.
- Adamek, S., Frohlich, C. y Pennington, W. D. (1988). Seismicity of the Caribbean-Nazca boundary: constraints on microplate tectonics of the Panama region. *Journal of Geophysical Research*, 93, 2053-2075. <https://doi.org/10.1029/JB093iB03p02053>

- Ali *et al.* (2010). Morpho-tectonic units of the Zagros Orogenic Belt, NE Iraq: a modern analogue for subduction accretion processes. *Science, Medicine and Health-Papers: Part A*, 16-22.
- Alonso-Henar J., Schreurs, G., Martínez-Díaz, J. *et al.* (2015). Neotectonic development of the El Salvador Fault Zone and implications for deformation in the Central America Volcanic Arc: Insights from 4-D analog modeling experiments. *Tectonics*, 34, 133-151. <https://doi.org/10.1002/2014TC003723>
- Alvarado, G. E., Benito, B., Staller, A. *et al.* (2017). The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up-to-date seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721, 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Alvarado G, E. y Cárdenes, G. (2016). Geology, Tectonics, and Geomorphology of Costa Rica: A Natural History Approach. En M. Kappelle (Ed.), *Costa Rican Ecosystems* (1.ª ed.). Chicago Scholarship Online, Chicago.
- Alvarado, G. E. y Gans, P. B. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. *Revista Geológica de América Central*, 46, 7-122.
- Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. Editoriales TEC, UNA y UCR.
- Arias, O. (2003). Redefinición De La Formación Tulín (Maastrichtiano-Eoceno Inferior) Del Pacífico Central De Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 28, 47-68.
- 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, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.002>
- Arroyo, I. G. y Linkimer, L. (2021). Geometría de la zona sismogénica interplacas en el sureste de Costa Rica a la luz de la secuencia sísmica de Golfito del 2018. *Geofísica Internacional*, 60, 51-75.
- Arroyo-Solórzano, M. y Linkimer, L. (2021). Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics*, 814. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228951>

- Arroyo-Solórzano, M., Quesada-Román, A. y Vargas-Bolaños, C. (2021). Unidades morfoestructónicas-volcánicas del sector noroeste del volcán Poás, Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, 105, e60279.
- Arroyo-Solórzano, M., Quesada-Román, A. y Barrantes-Castillo, G. (2022). Seismic and geomorphic assessment for coseismic landslides zonation in tropical volcanic contexts. *Natural Hazards*, 114(3), 2811-2837.
- Arroyo-Solórzano, M. (2023). Seismic risk from potentially damaging earthquakes in the Greater Metropolitan Area of Costa Rica (GAM). *Revista Geológica de América Central*, 69, 1-33.
- Astorga, A., Fernández, J. A., Barboza, G., Campos, L., Obando, J., Aguilar, A. y Obando, L. G. (1991). Cuencas sedimentarias de Costa Rica: Evolución geodinámica y potencial de hidrocarburos. *Revista Geológica de América Central*, 13, 25-59.
- Ballesteros C., L. E., Dobrinescu, M. M., Jager Refmadora Costarricense de Petr GC, et al. (1995). *An integrated geological and geophysical interpretation of the San Carlos basin, Costa Rica*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series. Springer-Verlag.
- Barrantes-Castillo, G., Arozarena-Llopis, I., Sandoval-Murillo, L. F. y Valverde-Calderón, J. F. (2020). Critical beaches due to coastal erosion in the southern Caribbean of Costa Rica, during the period 2005-2016. *Revista Geográfica de América Central*, (64), 75-102.
- Bathrellos, G. D. y Antoniou, V. (2009). Morphotectonic characteristics of Leas Island during the Quaternary (Ionian Sea, Greece). *Geologica Balcanica*, 1(3), 23-33.
- Benito, B., Lindholm, C., Camacho, E. et al. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102, 504-523. <https://doi.org/10.1785/0120110015>
- Bergoeing, J. y Brenes, L. (1977). Regiones morfográficas de Costa Rica. *Informe Semestral*, Instituto Geográfico Nacional, 53-58.
- Bourke, J. R., Levin, V., Arroyo, I. G. y Linkimer, L. (2023). Evidence for Caribbean plate subduction in southern Costa Rica. *Geology*, 51, 408-412. <https://doi.org/10.1130/G50796.1>

- Brandes, C., Astorga, A., Back, S., *et al.* (2007). Deformation style and basin-fill architecture of the offshore Limón back-arc basin (Costa Rica). *Marine and Petroleum Geology*, 24, 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.03.002>
- Bunduschuh, J. y Alvarado, G. (2007). *Central America: geology, resources, hazards*. Taylor & Francis.
- Camacho, E., Hutton, W. y Pacheco, J. F. (2010). A new look at evidence for a Wadati-Benioff zone and active convergence at the North Panama Deformed Belt. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 343-348. <https://doi.org/10.1785/0120090204>
- Camacho, M. E., Quesada-Román, A., Mata, R. y Alvarado, A. (2020). Soil-geomorphology relationships of alluvial fans in Costa Rica. *Geoderma Regional*, 21, e00258.
- Camacho, M. E., Mata, R., Barrantes-Viquez, M. y Alvarado, A. (2021). Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *Catena*, 197, 104992.
- Carvajal-Soto, L.A; Ito, T; Protti, M; Kimura, H. (2020). Earthquake potential in Costa Rica using three scenarios for the central Costa Rica deformed belt as western boundary of the Panama microplate. *Journal of South American Earth Sciences*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102375>
- Climent, Á., Rojas, W., Alvarado, G. E. y Benito, B. (2008). *Proyecto Resis II: Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica*. UPM, NOR-SAR, San José, Costa Rica. [https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes\\_sismos/amenaza\\_sismica\\_cr.pdf](https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/amenaza_sismica_cr.pdf)
- Coates, A. (1997). *Central America: A natural and cultural history*. New Haven: Yale University Press.
- Corrigan, J., Mann, P. y Ingle, J. C. (1990). Forearc response to subduction of the Cocos Ridge, Panama-Costa Rica. *Bulletin of the Geological Society of America*, 102, 628-652. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102)
- Cortés, V., Quesada-Román, A. y Young, D. (2024). Geomorphology, morphodynamic and surface formations of the Orosi Valley, Costa Rica. *Geomorphica*, 1(1). <https://doi.org/10.59236/geomorphica.v1i1.31>

- Cotilla, M. O., Cárdoma, D. y Calzadilla, M. (2007). *Morphotectonic study of Hispaniola*. *Geotectonics*, 41, 368-391. <https://doi.org/10.1134/S0016852107050032>
- DeMets, C., Gordon, R. G. y Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181, 1-80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
- Dengo, O. (1968). *Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: ICAITI.
- Denyer, P. y Alvarado, G. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica* [escala 1:400000]. Librería Francesa, San José, Costa Rica.
- Denyer, P., Montero, W. y Alvarado, G. (2003). *Atlas Tectónico de Costa Rica* (2.<sup>a</sup> ed.). Editorial Universidad de Costa Rica., San José, Costa Rica.
- Di Marco, G., Baumgartner, P. y Channell, J. (1995). Late Cretaceous-Early Tertiary paleomagnetic data and a revised tectonostratigraphic subdivision of Costa Rica and western Panama. En *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America* (pp. 1-27). Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA.
- Dickinson, W. (1974). Plate tectonics and sedimentation. En W.R. Dickinson, ed., *Tectonics and sedimentation*; Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ. 22, p. 1-27. <https://doi.org/10.2110/pec.74.22>
- Dramis, F., Guida, D. y Cestari, A. (2011). Nature and aims of geomorphological mapping. En: *Developments in Earth Surface Processes* (pp. 39-73). Elsevier B.V.
- Duncan R. y Hargraves R. (1984). Plate tectonic evolution of the Caribbean region in the mantle reference frame. En *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. *Geological Society of America Memoir*. Geological Society of America, Colorado, USA (pp. 81-93).
- Fan, G., Beck, S. L. y Wallace, T. C. (1993). The seismic source parameters of the 1991 Costa Rica aftershock sequence: evidence for a transcurrent plate boundary. *Journal of Geophysical Research*, 98. <https://doi.org/10.1029/93jb01557>
- Fodor, L., Bada, G., Csillag, G. et al. (2005). An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 410, 15-41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.06.008>

- Franco, A., Lasserre, C., Lyon-Caen, H. *et al.* (2012). Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the Cocos Plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador. *Geophysical Journal International*, 189, 1223-1236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05390.x>
- Gardner, T., Marshall, J., Merritts, D. *et al.* (2001). Holocene forearc block rotation in response to seamount subduction, southeastern Península de Nicoya, Costa Rica. *Geology*, 29, 151-154.
- Gardner, T. W., Fisher, D. M., Morell, K. D. y Cupper, M. L. (2013). Upper-plate deformation in response to flat slab subduction inboard of the aseismic Cocos Ridge, Osa Peninsula, Costa Rica. *Lithosphere*, 5(3), 247-264. <https://doi.org/10.1130/L251.1>
- Gazel, E., Carr, M. J., Hoernle, K., Feigenson, M. D., Szymanski, D., Hauff, F. y Van Den Bogaard, P. (2009). Galapagos-OIB signature in southern Central America: Mantle refertilization by arc-hot spot interaction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2). <https://doi.org/10.1029/2008GC002246>
- Goes, S. D. B., Velasco, A. A., Schwartz, S. Y. y Lay, T. (1993). The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (Mw=7.7) earthquake and its tectonic implications: a broadband seismic study. *Journal of Geophysical Research*, 98, 8127-8142. <https://doi.org/10.1029/93JB00019>
- Golts, S. y Rosenthal, E. (1993). A morphotectonic map of the northern Arava in Israel, derived from isobase lines. *Geomorphology*, 7, 305-315.
- Gursky, M. (1988). Análisis Tectónico de la Península de Nicoya (Costa Rica) y su significado para el desarrollo estructural-geodinámico de América Central Meridional. *Revista Geológica de América Central*, 8, 19-75.
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J. y Quesada-Román, A. (2024). Flood projections for selected Costa Rican main basins using CMIP6 climate models downscaled output in the HBV hydrological model for scenario SSP5-8.5. *Hydrological Research Letters*, 18(1), 35-42.
- Hidalgo-Leiva, D. A., Linkimer, L., Arroyo, I. G., Arroyo-Solórzano, M., Piedra, R., Climent, A. *et al.* (2023). The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(1), 23-40. <https://doi.org/10.1785/0120220119>

- Kobayashi, D., Lafemina, P., Geirsson, H. *et al.* (2014). Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 1671-1683. <https://doi.org/10.1002/2014GC005234>
- Kolarsky, R. y Mann, P. (1995). Structure and neotectonics of an oblique subduction margin, southwestern Panama. En P. Mann (Ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (pp. 1-349). Geological Society of America, Colorado, USA.
- LaFemina, P., Dixon, T. H., Govers, R. *et al.* (2009). Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10. <https://doi.org/10.1029/2008GC002181>
- Lin, Z., Kaneda, H., Mukoyama, S. *et al.* (2013). Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey. *Geomorphology*, 182, 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.001>
- Linkimer, L., Arroyo, I. G., Alvarado, G. E. *et al.* (2018). The National Seismological Network of Costa Rica (RSN): An overview and recent developments. *Seismological Research Letters*, 89, 392-398.
- MacMillan, I., Gans, P. B. y Alvarado, G. (2004). Middle Miocene to present plate tectonic history of the southern Central American Volcanic Arc. *Tectonophysics*, 392(1-4), 325-348. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.014>
- Magaz, A., Hernández, J., Días, J. y Hernández, I. (2006). Formación y consolidación de las morfoestructuras septentrionales de la región central del archipiélago cubano y su geodinámica reciente. *Investigaciones Geográficas*, 7-23.
- Marshall, J. S., Fisher, D. M. y Gardner, T. W. (2000). Central Costa Rica deformed belt: Kinematics of diffuse faulting across the western Panama block. *Tectonics*, 19, 468-492. <https://doi.org/10.1029/1999TC001136>
- Meschede, M., Barckhausen, U. y Worm, H. U. (1998). Extinct spreading on the Cocos Ridge. *Terra Nova*, 10(4), 211-216. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1998.00195.x>

- Mescua, J. F., Porras, H., Durán, P., Giambiagi, L., de Moor, M., Cascante, M., Salazar, E., Protti, M. y Poblete, F. (2017). Middle to Late Miocene Contractional Deformation in Costa Rica Triggered by Plate Geodynamics. *Tectonics*, 36(12), 2936-2949. <https://doi.org/10.1002/2017TC004626>
- Modenesi-Gauttieri, M. C., Hiruma, S. T. y Riccomini, C. (2002). Morphotectonics of a high plateau on the northwestern flank of the Continental Rift of southeastern Brazil. *Geomorphology*, 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., Lewis, J. C. y Araya, M. C. (2017). The guanacaste volcanic arc sliver of Northwestern Costa Rica. *Sci Rep*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01593-8>
- Montero, W. y Morales, L. (1990). Deformación y esfuerzos neotectónicos en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 69-87.
- Montero, W., Paniagua, S., Kussmaul, S. y Rivier, F. (1992). Geodinámica interna de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 1-12. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i14.13171>
- Mora, S. (1981). Una revisión y actualización de la clasificación morfotectónica de Costa Rica, según la teoría de la tectónica de placas. *Informe Julio-Diciembre 1981*. Instituto Geográfico Nacional.
- Morales, L. (1985). Las zonas sísmicas de Costa Rica y alrededores. *Revista Geológica de América Central*, 69-101.
- Morell, K. D., Fisher, D. M. y Gardner, T. W. (2008). Inner forearc response to subduction of the Panama Fracture Zone, southern Central America. *Earth and Planetary Science Letters*, 265, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.039>
- Morell, K. D., Kirby, E., Fisher, D. M. y Van Soest, M. (2012). Geomorphic and exhumational response of the Central American Volcanic Arc to Cocos Ridge subduction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(4). <https://doi.org/10.1029/2011JB008969>
- Morell, K. D. (2015). Late Miocene to recent plate tectonic history of the southern Central America convergent margin. En *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (Vol. 16, Issue 10, pp. 3362-3382). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/2015GC005971>

- Pindell, J. y Barrett, S. (1990). Geologic evolution of the Caribbean: A plate-tectonic perspective. En G. Dengo y J. Case (Eds.), *The Geology of North America and The Caribbean Region* (pp. 405-432). Geological Society of America.
- Porras, H., Alvarado, G. E., Arroyo-Solórzano, M. *et al.* (2021a). La depresión tectónica de Nicaragua en Costa Rica: estructura interna, estilo estructural, edad, extensión y actividad de la cuenca de San Carlos. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1-22. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i65.46874>
- Porras, H., Mescua, J., Durán, P., Cascante, M., Giambiagi, L. y Muller, C. (2021b). Changing tectonic regimes in the central Costa Rica forearc between the Paleogene and the present: Insights from structural analysis and focal mechanisms. *Journal of Geodynamics*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101814>
- Protti, M., González, V., Newman, A. V. *et al.* (2014). Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nature Geoscience*, 7, 117-121. <https://doi.org/10.1038/ngeo2038>
- Protti, M. y Schwartz, S. (1994). Mechanics of back arc deformation in Costa Rica: Evidence from an aftershock study of the April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica, earthquake (Mw=7.7). *Tectonics*, 13, 1093-1107.
- Quesada-Román, A. y Pérez-Briceño, P. M. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica. *Journal of Maps*, 15(2), 363-371.
- 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*, 120(2), 142-155.
- Quesada-Román, A. (2021). Review of the geomorphological effects of the 1991 Limón earthquake. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1-13.
- Quesada-Román, A., Campos, N. y Granados-Bolaños, S. (2021). Tropical glacier reconstructions during the Last Glacial Maximum in Costa Rica. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38, 55-64.

- Quesada-Román, A. (2022). Flood risk index development at the municipal level in Costa Rica: A methodological framework. *Environmental Science & Policy*, 133, 98-106.
- Quesada-Román, A., Umaña-Ortíz, J., Zumbado-Solano, M., Islam, A., Abioui, M., Tefogoum, G. Z., Kariminejad, N., Mutaqin, B. W. y Pupim, F. (2023). Geomorphological regional mapping for environmental planning in developing countries. *Environmental Development*, 48, 100935.
- Quesada-Román, A. (2024). Geomorphological Effects of Tropical Cyclones in Costa Rica, Central America. En *Latin American Geomorphology: From the Crust to Mars* (pp. 101-116). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-55178-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-55178-9_6)
- Quesada-Román, A., Hidalgo, H. G. y Alfaro, E. J. (2024). Assessing the impact of tropical cyclones on economic sectors in Costa Rica, Central America. *Tropical Cyclone Research and Review*. <https://doi.org/10.1016/j.tcr.2024.08.001>
- Saginer, I., Gazel, E., Condie, C. y Carr, M. J. (2013). Evolution of geochemical variations along the Central American volcanic front. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10), 4504-4522. <https://doi.org/10.1002/ggge.20259>
- Silva-Benavides, A. M. (2009). *Mangroves. Marine Biodiversity of Costa Rica, Central America*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Sofia, G. (2020). Combining geomorphometry, feature extraction techniques and Earth-surface processes research: The way forward. *Geomorphology*, 355, 107055.
- Veas-Ayala, N., Alfaro-Córdoba, M. y Quesada-Román, A. (2023). Costa Rican wetlands vulnerability index. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47(4), 521-540.
- Velásquez, G. D. L. Á., Ayala, I. A., Hernández, J. R. y Garnica, R. J. (2015). Volcanic-morphotectonic-zoning in the morphostructural analysis of relief: The case of the municipality of Managua, Nicaragua. *Investigaciones Geográficas*, 87, 118-140. <https://doi.org/10.14350/ri.43549>
- Von Huene, R., Ranero, C. R., Weinrebe, W. y Hinz, K. (2000). Quaternary convergent margin tectonics of Costa Rica, segmentation of the Cocos Plate, and Central American volcanism. *Tectonics*, 19, 314-334. <https://doi.org/10.1029/1999TC001143>

- Westbrook, G., Hardt, N. y Heath, R. (1995). Structure and tectonics of the Panama–Nazca boundary. En P. Mann (Ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (pp. 1-349). Geological Society of America, Colorado, USA.
- Weyl, R. (1971). *La clasificación morfoestructónica de Costa Rica*. Informe Semestral Julio-Diciembre, Instituto Geográfico Nacional, 25–35. San José, Costa Rica.
- Zamora, N., Arroyo-Solórzano, M., Porras, H. *et al.* (2021). Evaluación del potencial de tsunamis locales con base en análisis sísmo-tectónico en el Caribe de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i65.47002>
- Zamora-Espinoza, A., Chin, J., Quesada-Román, A. y Obando, V. (2024). Geospatial Approach to Determine Nitrate Values in Banana Plantations. *AgriEngineering*, 6(3), 2513-2525.

