

# Geomorfologia estrutural, morfotectônica e morfometria da folha Cartagena 1:100.000–Colômbia<sup>a</sup>

**Max Furrier<sup>b</sup>**

Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Brasil

**Germán Vargas Cuervo<sup>c</sup>**

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá - Colombia

## Resumo

Este trabalho apresenta uma nova caracterização geomorfológica da região de Cartagena de Indias (Folha 23 IGAC); para isso, elaborou-se uma cartografia morfoestrutural, morfométrica e tectônica. Do ponto de vista geomorfológico, o relevo está dominado pela presença de dois cinturões rochosos estruturais: a Serranía de San Jacinto e a Serranía del Sinú. O primeiro cinturão localiza-se no setor leste da região e compõe-se principalmente de rochas sedimentares da Formación San Cayetano del Paleoceno, que desenvolvem montanhas afiadas com as altitudes mais altascimas de filos de grande altura. O cinturão da Serranía del Sinú apresenta-se ao oeste do cinturão de San Jacinto, separado pela falha Villa Nueva - El Totumo. Nele apresenta-se a formação geológica mais antiga da área de idade Oligoceno-Mioceno. Os setores de menor relevo correspondem às planícies e formas suavemente inclinadas e onduladas compostas por depósitos não consolidados de tipo aluvial e coluvial de idade quaternária. A partir da interpretação de imagens de satélite de tipo óptico e de radar, e do uso de modelos digitais de terreno, em conjunto com as observações de campo, análise de perfis topográficos e cartografia geomorfológica, pode-se concluir que a tectônica cenozoica é o fator mais importante na configuração do relevo na região, que se evidencia pela configuração morfométrica da rede de drenagem.

**Palavras-chave:** Cartagena de Indias, geomorfologia, morfometria, morfotectônica.



doi: 10.15446/rcdg.v27n1.54929

RECEBIDO: 28 DE DEZEMBRO DE 2015. ACEITO: 5 DE SETEMBRO DE 2016.

Artigo de investigação sobre geomorfologia.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO: Furrier, Max, y Germán Vargas Cuervo. 2018. "Geomorfologia estrutural, morfotectônica e morfometria da folha Cartagena 1:100.000 - Colômbia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 27 (1): 67-86. doi: 10.15446/rcdg.v27n1.54929.

a Financiamento outorgado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Processo 9485/13-9.

b Endereço postal: Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil. CEP: 58051-900.

Correio eletrônico: max.furrier@gmail.com - ORCID: 0000-0001-8882-5290.

c Endereço postal: Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas - Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 n.º 45-03, Bogotá-DC, Colombia.

Correio eletrônico: gvargasc@unal.edu.co - ORCID: 0000-0003-2489-3993.

## Geomorfología estructural, morfotectónica y morfometría de la plancha Cartagena 1:100.000 - Colombia

### Resumen

Este trabajo presenta una nueva caracterización geomorfológica de la región de Cartagena de Indias (Plancha 23 IGAC), se ha elaborado una cartografía morfoestructural, morfométrica y tectónica. Desde el punto de vista geomorfológico, el relieve está dominado por la presencia de dos cinturones rocosos estructurales: la Serranía de San Jacinto y la Serranía del Sinú. El primer cinturón, se localiza en el sector oriental de la zona y se compone principalmente de rocas sedimentarias de la Formación San Cayetano del Paleoceno, que desarrollan cimas de filos de gran altura. El Cinturón de la Serranía del Sinú, se presenta al oeste del Cinturón de San Jacinto, separado por la falla Villa Nueva - El Totumo. Allí se presenta la formación geológica más antigua del área de edad Oligoceno-Mioceno. Los sectores de menor relieve corresponden a las planicies y formas suavemente inclinadas y onduladas compuestas por depósitos no consolidados de tipo aluvial y coluvial de edad cuaternario. A partir de la interpretación de imágenes de satélite de tipo óptico y de radar y el uso de modelos digitales de terreno, en conjunto con las observaciones de campo, análisis de perfiles topográficos y la cartografía geomorfológica, se puede concluir que la tectónica cenozoica es el factor más importante en la configuración del relieve en la zona, que se evidencia por la configuración morfométrica de la red de drenaje.

**Palabras claves:** Cartagena de Indias, geomorfología, morfometría, morfotectónica.

## Structural Geomorphology, Morphotectonics, and Morphometrics of the Map sheet Cartagena 1:100.000 - Colombia.

### Abstract

The article provides a new geomorphological characterization of the region of Cartagena de Indias (Map sheet 23 IGAC) based on the creation of a morphostructural, morphometric, and tectonic cartography. Regarding geomorphology, the topography is dominated by the presence of two structural rock belts; the Serranía de San Jacinto and the Serranía del Sinú. The first belt, located in the eastern part of the zone, is made up mainly of sedimentary rocks from the Paleocene San Cayetano Formation, whose peaks reach great heights. The Serranía del Sinú belt is located to the west of the San Jacinto belt, from which it is separated by the Villa Nueva - El Totumo fault. There we find the oldest geological formation of the area, dating back to the Oligocene-Miocene epochs. The less mountainous zones are made up of flatlands and gently sloping, undulated forms made up of unconsolidated alluvial and colluvial deposits from the Quaternary period. The interpretation of optical satellite and radar images and the use of digital terrain models, as well as field observations, analyses of topographic profiles, and geomorphological cartography, make it possible to conclude that Cenozoic tectonics is the most important factor in the configuration of the topography of the area, as evidenced by the morphometric configuration of the drainage network.

**Keywords:** Cartagena de Indias, geomorphology, morphometrics, morphotectonics.

## Introdução

A área de estudo caracteriza-se por um grande sistema hidrográfico conformado, em primeiro lugar, por cursos de água, em sua grande maioria com baixo fluxo e intermitentes, que desaguam diretamente no Mar do Caribe e, em segundo lugar, por grandes lagunas, onde também desaguam grande parte de rios e riachos. A rede de drenagem forma vales com grandes incisões e, em outros setores, extensas áreas de sedimentação relativamente planas.

Segundo Toto e Kellogg (1992), os dois cinturões de dobramentos presentes na área: Cinturão de San Jacinto e Cinturão de Sinú formam uma cunha sedimentar de 12 km de espessura, afetados pela convergência entre as placas do Caribe e Sul-americana, e a reduzida sismicidade é explicada por uma baixa taxa de deslocamento entre essas duas placas, diferentemente do que ocorre no setor do Pacífico colombiano.

O Cinturão de San Jacinto encontra-se limitado ao oeste pela falha de cavalgamento Villanueva - El Totumo, que o separa do Cinturão de Sinú. Considera-se que as rochas sedimentares do Cinturão de San Jacinto começaram a se depositar no final do Cretáceo, sendo que, na área de estudo, a sedimentação iniciou-se no Paleoceno (Duque-Caro 1978).

O Cinturão de Sinú encontra-se a oeste do Cinturão de San Jacinto. As rochas desse setor, assim como as rochas do Cinturão de San Jacinto, encontram-se sobre o assoalho oceânico e são mais jovens, sendo de idades do Mioceno até o Pleistoceno. Devido a essas características, considera-se que o Cinturão de Sinú corresponde a uma fase posterior de acreção dos sedimentos proximais depositados na zona de *mélange* (Duque-Caro 1978).

## Localização da área de estudo

A área de estudo está compreendida pela porção emersa da carta topográfica Cartagena 1:100.000, produzida pelo Instituto Geográfico Augustín Codazzi (IGAC), a qual possui, também, sua correspondente geológica elaborada pelo Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas) (figura 1).

A carta topográfica abrange setores dos departamentos colombianos de Bolívar e Atlântico, e está localizada no noroeste do país, tendo seu limite litorâneo com o Mar do Caribe (Oceano Atlântico). A área possui um clima tropical seco com temperatura média de 29 °C

e chuvas anuais de 900 mm (IGAC 1982). Sua porção emersa possui aproximadamente 1.226 km<sup>2</sup>, sendo o remanescente constituído pelo Mar do Caribe.

## Caracterização geológica

A Colômbia, em seu setor caribenho, situado no contato entre as placas do Caribe e Sul-americana em convergência, é um ponto-chave para a compreensão da evolução geomorfológica em margens continentais ativas. É importante levar em conta que as unidades geológicas, às quais se refere este trabalho, depositaram-se em fundos marinhos relacionados à margem de uma província com embasamento oceânico que, devido à intensa compressão e dobramentos, atualmente encontra-se emersa.

## Geologia do Cinturão de San Jacinto

### Formação San Cayetano (Pgsc)

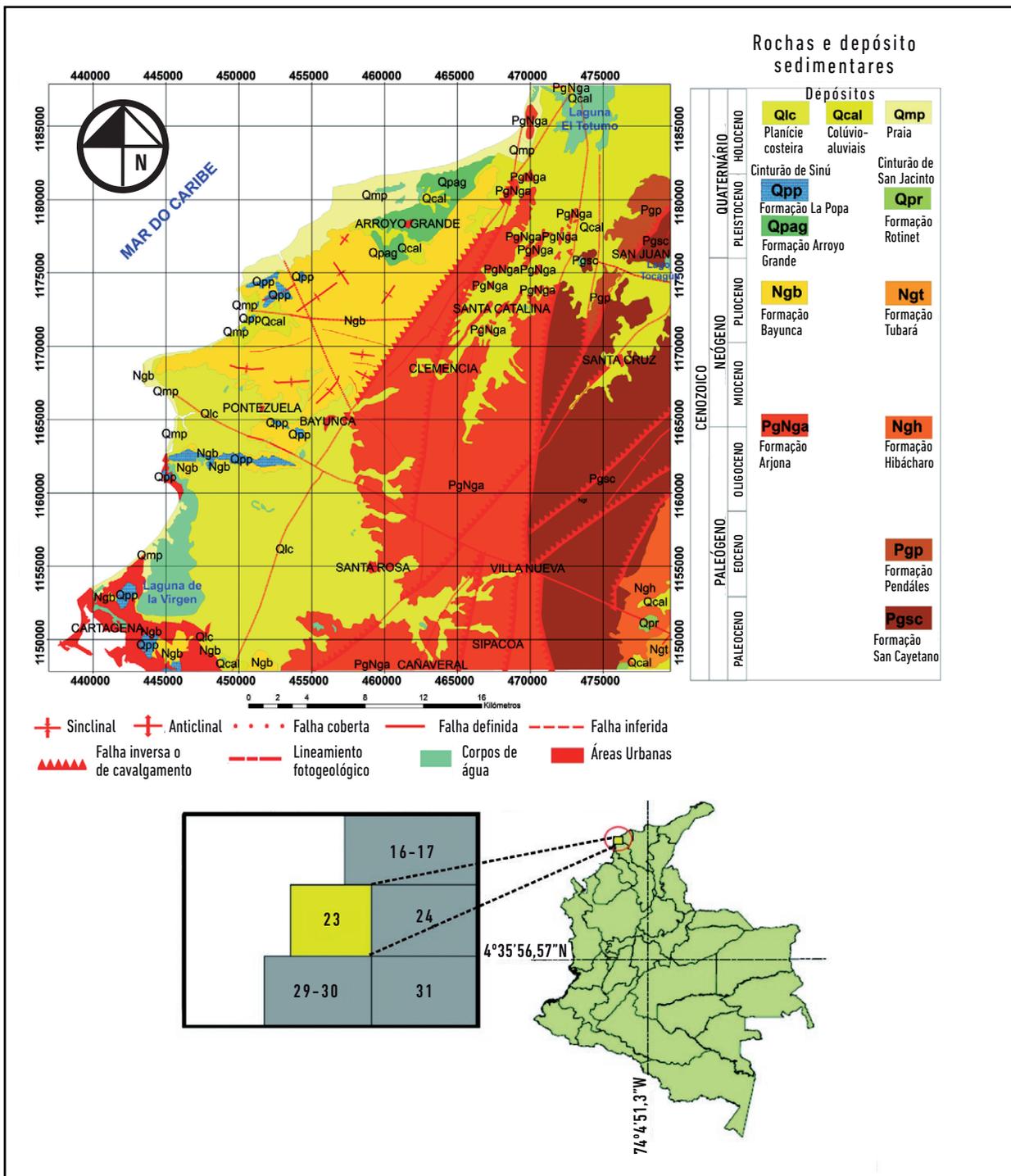
Esta é a formação geológica mais antiga que faz parte do Cinturão de San Jacinto (figura 1) e encontra-se dentro da área de estudo, no setor leste. Corresponde a sequências de arenitos finos com cimento de sílica. São também verificadas intercalações menores de pelitos interestratificados com arenitos finos a médios, cimento calcário, bioturbações e gipso secundário, sendo fortemente dobradas e falhadas por compressão tectônica (Guzmán, Gómez e Serrano 2004).

### Formação Pendáles (Pgp)

A Formação Pendáles (figura 1) repousa de forma discordante sobre a Formação San Cayetano e encontra-se a noroeste da área investigada. Essa formação é constituída por uma série de litoarenitos arcosianos, com cimento de sílica. Sua gênese está associada com depósitos de leque de plataforma marinha de baixa profundidade (Guzmán, Gómez e Serrano 2004).

### Formação Hibácharo (Ngh)

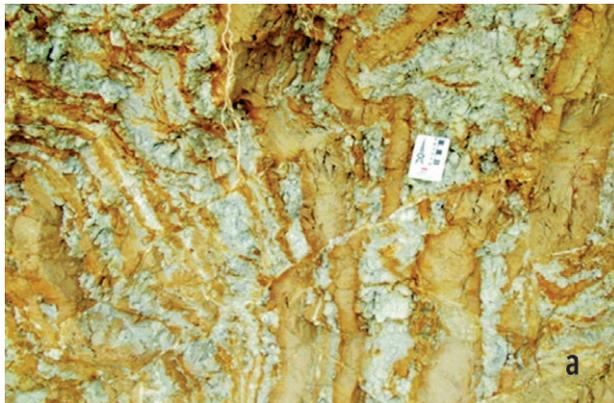
A Formação Hibácharo está situada de forma discordante sobre a Formação San Cayetano, a sudeste desta. É constituída por camadas espessas a muito espessas de arenitos líticos interestratificados com argilitos e pelitos dispostos em camadas espessas a médias (Guzmán, Gómez e Serrano 2004). Barrera Olmos (1999) postula um ambiente marinho de plataforma.



**Figura 1.** Carta geológica da área de estudo com seu índice de localização.  
 Fonte: modificado de Ingeominas 2003.

### Formação Tubará (Ngt)

Sobre a Formação Hibácharo, repousa de forma discordante a Formação Tubará que se encontra no extremo sudeste da área de estudo num pequeno afloramento. A Formação Tubará apresenta desde sua base uma alternância de arenitos e conglomerados com clastos de quartzo, siltitos, sílex numa matriz arenosa; camadas espessas a muito espessas de arenitos com abundantes bioclastos de moluscos (ambiente marinho raso), interestratificadas com argilitos e folhelhos plásticos (figura 2a), com a presença visível de pequenas estruturas tectônicas como falhas e dobras (Guzmán, Gómez e Serrano 2004).



**Figura 2.** a) Formação Tubará, b) Formação La Popa, que se sobrepõe à Formação Bayunca de forma discordante.

Fotografias do Max Furrier 2014.

*Nota:* a). Destacam-se as camadas de argilitos e folhelhos com pequenas dobras e falhas (Sistema de Coordenadas: UTM Z 18N 471631W 1155315N, altitude: 162 m); b) Sistema de Coordenadas: UTM Z 18N 450696W 1173931N, altitude na base: 3 m.

### Formação Rotinet (Qpr)

A Formação Rotinet repousa de forma discordante sobre as Formações Hibácharo e Tubará. Essa formação

corresponde a uma sucessão inconsolidada de cascalhos com estratificação cruzada. Possui uma aparência que corresponde a depósitos que foram retrabalhados por ondas, dando origem à formação de barras marinhas de frente de praia (Guzmán, Gómez e Serrano 2004).

### Geologia do Cinturão de Sinú

Esse cinturão está limitado a leste, na área de estudo, pela falha de cavalgamento Villanueva - El Totumo com o Cinturão de San Jacinto, e, ao oeste, com o Mar do Caribe. A transição do Cinturão de Sinú para o Cinturão de San Jacinto se faz de forma truncada (figura 1).

### Formação Arjona (PgNga)

Está localizada na porção central da área de estudo e corresponde à formação geológica de maior extensão geográfica (figura 1). Além disso, está constituída por uma série de pelitos, interestratificados com arenitos normalmente dispostos em camadas espessas. Sua gênese sugere um depósito realizado numa plataforma continental afetada por movimentos tectônicos (Colombia 2004).

### Formação Bayunca (Ngb)

Separada da Formação Arjona pela falha Mamonal, encontra-se a Formação Bayunca no extremo noroeste da área (figura 1). Essa formação consta desde sua base de arenitos de grãos finos, dispostos em camadas delgadas a médias, interestratificadas com siltitos e pelitos bioturbados, interpostos com camadas nodulares de arenitos calcários (Guzmán, Gómez e Serrano 2004).

### Formação Arroyo Grande (Qpag)

Sobrepondo-se à Formação Bayunca de forma discordante, encontra-se ao NNW da área a Formação Arroyo Grande. Ingeominas (2001) utiliza o termo *Formação Arroyo Grande* para designar um depósito de cascalho e areias aflorantes nas adjacências da localidade de Arroyo Grande. Essa formação está constituída por um conjunto de cascalhos dispostos em camadas espessas a muito espessas, interestratificados com arenitos ligeiramente conglomeráticos, conglomerados, camadas delgadas de pelitos e argilitos carbonáticos. Assume-se uma influência marinha para sua gênese, mas ainda persiste algumas dúvidas sobre em que ambiente marinho essa formação foi, predominantemente, formada (Guzmán, Gómez e Serrano 2004).

### Formação La Popa (Qpp)

Também se sobrepondo à Formação Bayunca de forma discordante, encontra-se a Formação La Popa do Pleistoceno Superior. Ángel, Esquivel e Sarmiento (1985), para referirem-se ao membro inferior, utilizaram o termo *unidade detrítica La Popa e*, para o superior, *calcários recifais La Popa*. A Formação La Popa repousa em desconformidade sobre a Formação Arjona, no extremo sul e, principalmente, sobre a Formação Bayunca (figura 2b), de forma fragmentada no setor ocidental (Ingeominas 2003).

Para a Formação La Popa, sugerem-se arrecifes formados numa plataforma submarina com uma declividade muito suave e abaixo do nível de base das ondas, numa área com pouco aporte de sedimentos, águas rasas, claras e temperaturas entre 21 °C e 25 °C, que permitiram o desenvolvimento desses corpos coralinos (Guzmán, Gómez e Serrano 2004).

### Depósitos sedimentários quaternários

Os depósitos recentes do Quaternário apresentam-se associados às áreas mais baixas, constituindo uma morfologia predominantemente plana com alguns terraços isolados e ocupa uma grande extensão geográfica na área de estudo (figura 1). Por essas características morfológicas e com poucos dados de testemunhos de subsuperfície e dados estratigráficos, é difícil e imprecisa sua correta descrição e há dúvidas sobre seu exato mapeamento geológico, tendo em vista suas semelhanças morfológicas e deposicionais.

Segundo Ingeominas (2001), esses depósitos quaternários são divididos em depósitos de planície costeira (Qlc), depósitos coluvioaluviais (Qcal) e depósitos de praia (Qmp). Os depósitos de planície costeira (Qlc) formam áreas planas a nordeste do sítio urbano de Cartagena de Índias. Os depósitos coluvioaluviais (Qcal) agrupam a sedimentação fluvial recente e atual e a gerada por colúvios igualmente recentes, relacionados com riachos, vertentes e pediplanos. São constituídos por areias e argilas, e cobrem as unidades rochosas e os depósitos quaternários mais antigos. Apresenta uma grande área de exposição no norte da área.

### Geologia e geomorfologia estrutural

Estruturalmente, a área de estudo está dividida em dois domínios principais: o Cinturão de Sinú e o Cinturão de San Jacinto. O Cinturão de San Jacinto encontra-se

fragmentado em vários blocos que correspondem topograficamente com a Serrania de San Jacinto. Esta constitui-se de blocos com maior deformação tectônica e encontra-se circundada por zonas ou depressões com menor deformação.

Nessa serrania, afloram basicamente rochas brandas do Paleoceno-Eoceno superior. Essas rochas, em grande parte, estão afetadas por falhas de cavalgamento com direção aproximada N45° E (Ingeominas 2001). Além das falhas de cavalgamento, são verificadas *in loco* inúmeras falhas normais impossíveis de serem todas mapeadas na escala da carta geológica existente. Essas falhas, tanto as de cavalgamento quanto as falhas normais, influenciam de forma conspícua toda a morfologia do relevo da área (figura 3).

A oeste do Cinturão de San Jacinto, encontra-se o Cinturão de Sinú. Esse cinturão conforma uma faixa com uma direção preferencial N20°–30° E, compreende o setor centro-oeste da área de estudo e abrange a zona de plataforma continental não mapeada.

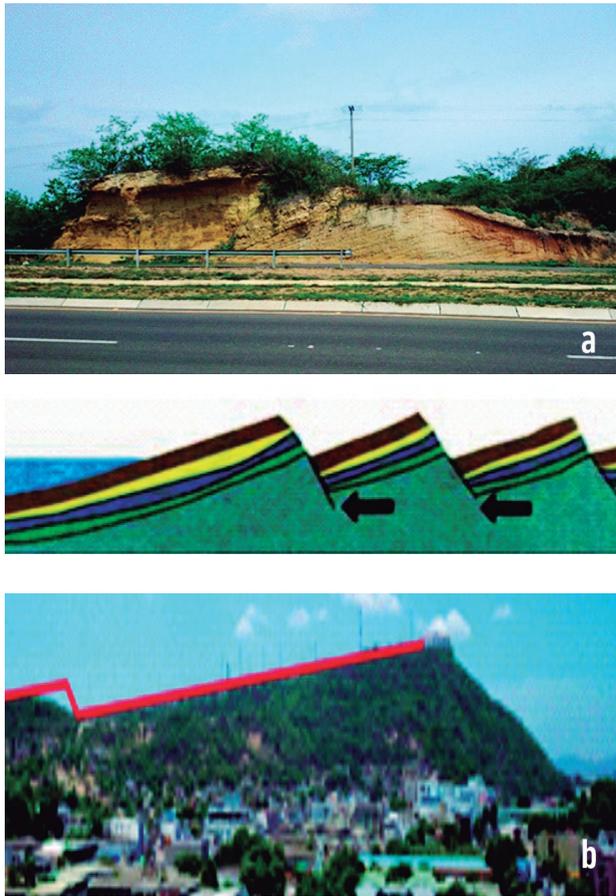
No Cinturão de Sinú, as estruturas deformacionais presentes são produtos do efeito do diapirismo de lama, o qual gera sinclinais amplas e de esforços tectônicos compressivos recentes verificados em campo. Os anticlinalis se apresentam em domos de diapirismo e, às vezes, podem coincidir com vulcões de lama. Apresentam-se também falhas de cavalgamento e normais associadas à neotectônica (figura 3).

As estruturas com deformações cenozoicas mapeadas na carta geológica Cartagena são genéricas e somente as mais expressivas e importantes foram descritas no mapeamento executado pelo Ingeominas. Em estudos de detalhes através de trabalho de campo, as estruturas com deformações são muito mais amplas e comuns, sendo encontradas em todas as formações geológicas, com uma conspícua e inequívoca influência sobre o relevo da área (figura 3).

### Procedimentos técnicos e operacionais

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessária a utilização de ferramentas computacionais e de produtos cartográficos básicos para o processamento dos dados, sua organização e posterior análise. A seguir, serão detalhados os processos técnico-operacionais utilizados para a elaboração dos produtos cartográficos produzidos e, logo, analisados.

O material cartográfico produzido foi elaborado com o auxílio do software ArcGis® versão 10.2.1. Todos os



**Figura 3.** a) Falha de cavalgamento com dobramento na Formação Bayunca (Sistema de Coordenadas: UTM Z 18N 450564W 1163397N – Altitude na base: 25 m); b) Figura que demonstra uma seqüência de falhas de empurrão e rejeito de uma falha no Cerro de La Popa, formando dois níveis topográficos. Fotografias do Max Furrer 2014.

produtos cartográficos elaborados tiveram como base altimétrica as curvas de nível obtidas a partir dos dados do Shuttle Radar Topographic Mission (doravante SRTM), com resolução de 30 m da área de estudo, escala 1:100.000 com equidistância entre as curvas de nível de 10 m. O sistema de coordenadas utilizadas foi a Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 18 Norte e o Datum Sirgas 2000.

Para o processo de vetorização manual da carta topográfica Cartagena 1:100.000 (IGAC 2005), foi utilizado o mesmo software cuja multifuncionalidade permite a edição e o compartimento de arquivos em formato Shapefile (SHP). A utilização da carta topográfica Cartagena 1:100.000, produzida pelo Instituto Geográfico Agustín Codazzi, foi de fundamental importância para a confrontação e ajustes da rede hidrográfica gerada através da imagem SRTM, e para a vetorização de todos os sítios urbanos e dos corpos de água presentes na área de estudo de forma precisa.

Foi gerado um Modelo Numérico do Terreno (MNT) com o auxílio do software ArcGis® v. 10.2.1 e, a partir deste, cartas hipsométrica e clinográfica, que serviram de base para a elaboração da carta geomorfológica, além de perfis topográficos, e do modelo 3D, em que foram aplicados os índices morfométricos. Esses modelos vêm ganhando espaço também em estudos morfotectônicos e morfoestruturais (Hartwing e Riccomini 2010).

### Elaboração da carta clinográfica

A carta clinográfica proporciona informações sobre o relevo, sendo esta a base para identificar e quantificar vertentes, terraços e planícies de inundação. Em termos gerais, o modelo tem demonstrado ser satisfatório e útil para quantificar as declividades de vertentes, sobretudo em zonas onde o relevo é irregular (Carvalho e Latrubesse, 2004). Atualmente, essa carta também vem sendo muito utilizada para averiguar a tectônica recente (Hartwing e Riccomini 2010); (Furrer, Nóbrega e Souza 2014).

Por meio da geração da matriz irregular e regular a partir das curvas de nível, gerou-se a carta clinográfica. Para sua elaboração, foi selecionada a extensão *spatial analyst tools* no aplicativo *Surface*, ferramenta *slope*. Para este trabalho, optou-se pelos intervalos de declividade de vertentes proposta por IGAC ([1968] 1980) (tabela 1).

**Tabela 1.** Classificação do relevo baseado na declividade das vertentes

Vertentes declividades (%)	Classificação do relevo
> 75	Muito escarpado
50-75	Escarpado
25-50	Moderadamente escarpado
12-25	Muito inclinado
7-12	Moderadamente inclinado
3-7	Ligeiramente inclinado
0-3	Plano a ligeiramente plano

Fonte: IGAC [1968] 1980.

### Perfis topográficos

Para Fitz (2008), o perfil topográfico mostra-se bastante fiel às características do relevo, proporcionando assim uma melhor compreensão da superfície trabalhada. Decidiu-se elaborar os perfis automaticamente através dos contornos obtidos das curvas de nível geradas a partir da imagem SRTM, traçando as linhas do perfil mediante a ferramenta *Interpolate Line*, que cria um traço 3D

por interpolação de altitude a partir de uma superfície funcional selecionada. Depois, com o auxílio da carta geológica, foram incluídas as informações litológicas.

Foram traçados três segmentos, que foram escolhidos com as direções N-S (perfil A-A'), W-E (perfil B-B') e NW-SE (perfil C-C'). A escolha dessas linhas de perfil foi baseada na carta geológica, em que se buscou abarcar as principais formações e feições geomorfológicas e, assim, obter uma correlação fidedigna entre a geologia e a morfologia do relevo. Para uma visualização mais adequada, e devido à escala adotada, os perfis foram elaborados com um exagero vertical de cinco vezes em relação à sua longitude.

### Elaboração da carta geomorfológica

A cartografia geomorfológica é uma importante ferramenta no estudo do relevo, pois é no mapa geomorfológico que se traduzem e sintetizam várias metodologias, bem como os resultados das respectivas investigações (Ross 1992). O mapa geomorfológico não pode somente descrever as formas do relevo sem incluir ou subestimar o embasamento rochoso que sustenta as formas deste.

Ross (1992), baseado nos conceitos metodológicos e estruturalistas de Penck (1953) e Mescerjakov (1968), tomou como parâmetros de classificação o embasamento, a forma e o alcance de cada unidade taxonômica. Dessa forma, o autor estabeleceu seis níveis taxonômicos, sendo estes: morfoestrutura, morfoescultura, padrão de forma de relevo, tipos de forma de relevo, tipos de vertentes e formas de processos naturais atuais e antrópicos (figura 4).

O 1º Táxon corresponde à definição de morfoestrutura, e o 2º Táxon representa as morfoesculturas desenvolvidas sobre a morfoestrutura. O 3º Táxon corresponde às unidades dos padrões de formas semelhantes de relevo. Essas unidades menores apresentam diferenças entre si, como a rugosidade topográfica ou o índice de dissecação do relevo. Os padrões de relevo podem ser formas de acumulação, como planícies fluviais, marinhas ou intermarés (manguezais), ou denudacionais, como colinas, morros e tabuleiros.

As formas relacionadas ao 3º Táxon são representadas no mapa geomorfológico por meio de um conjunto de letras maiúsculas e minúsculas. As letras maiúsculas indicam os padrões que se formaram por denudação (letra D) ou por acumulação (letra A) e as letras minúsculas representam as formas geradas (tabela 2).

Tabela 2. Padrões de formas de relevo

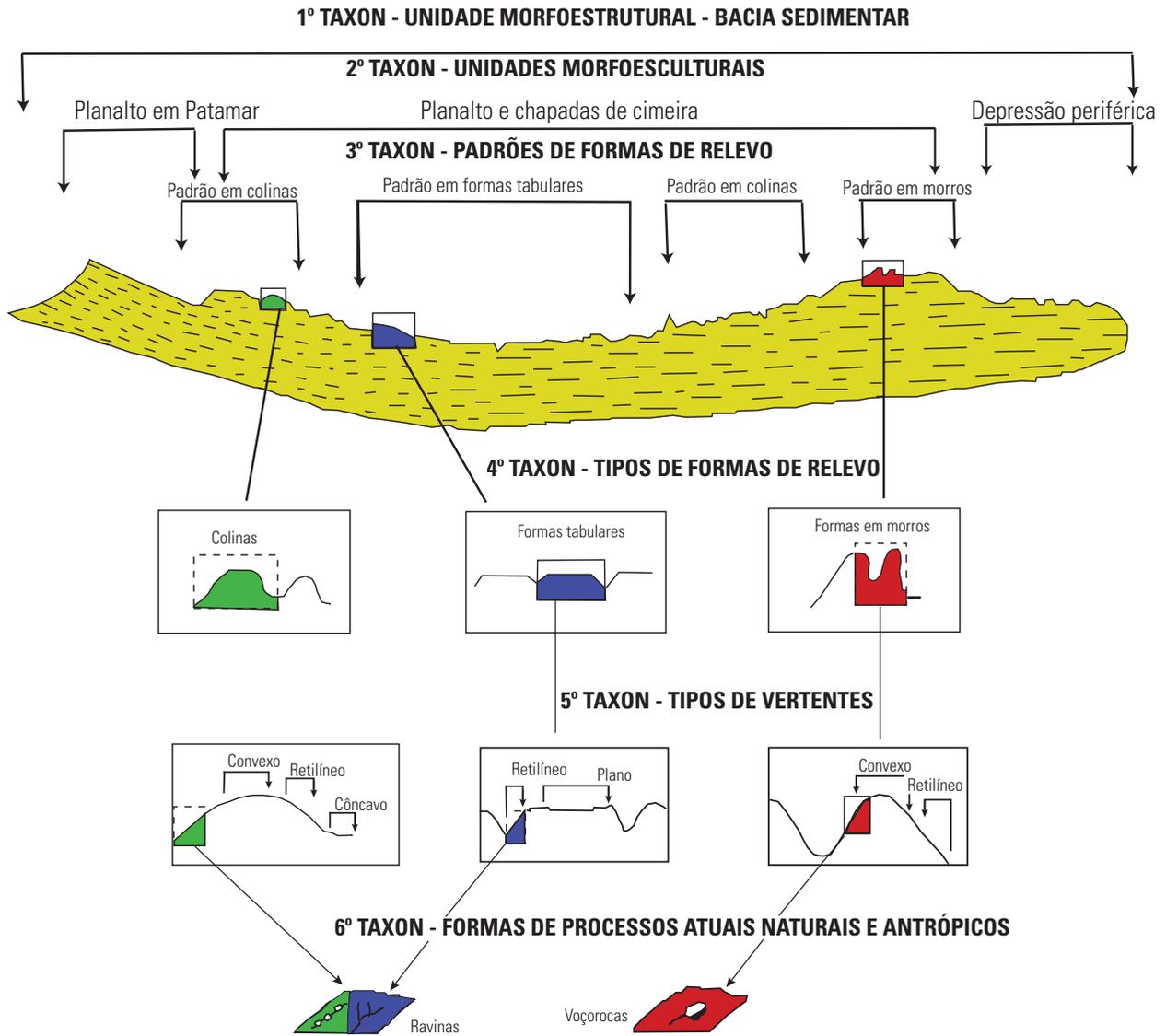
Formas de denudação	Formas de acumulação
D – Denudação	A – Acumulação
Da – Formas com topos aguçados	Apf – Formas de planície fluvial
Dc – Formas com topos convexos	Apm – Formas de planície marinha
Dt – Formas com topos tabulares	Apl – Formas de planície lacustre
De – Formas de escarpas	Api – Formas de planície intermarés
	Ad – Formas de campos de dunas
	Atf – Formas de terraço fluvial
	Atm – Formas de terraço marinho

Fonte: Ross 1992, 24.

Tabela 3. Matriz dos índices de dissecação do relevo

Dimensão interfluvial média (classes)	Muito grande (1) > 1.500 m	Grande (2) 1.500 a 700 m	Média (3) 700 a 300 m	Pequena (4) 300 a 100 m	Muito pequena (5) < 100 m
Muito fraca (1) < 20 m	11	12	13	14	15
Fraca (2) 20 a 40 m	21	22	23	24	25
Média (3) 40 a 80 m	31	32	33	34	35
Forte (4) 80 a 160 m	41	42	43	44	45
Muito forte (5) > 160 m	51	52	53	54	55

Fonte: adaptado de Ross 1992, 27.



**Figura 4.** Unidades taxonômicas de classificação do relevo.  
 Fonte: adaptado de Ross 1992, 22.

Os padrões de forma de relevo estão acompanhados de um conjunto de algarismos arábicos de acordo com uma matriz previamente elaborada, cujas colunas indicam o grau de incisão dos vales; as linhas, a dimensão interfluvial média (tabela 3). As formas agradacionais não recebem os algarismos arábicos, pois não representam dissecação por processos erosivos.

De maneira geral, esses padrões caracterizam-se por diferentes intensidades de dissecação do relevo por

influência dos cursos de água (Ross 1992). Para calcular o índice de dissecação do relevo, deve-se considerar a incisão média dos vales e a dimensão interfluvial média (tabela 3).

O 4º Taxon em ordem decrescente caracteriza-se pelos tipos de formas de relevo individuais dentro de cada padrão de formas do relevo. Podem ser tanto as de denudação, resultantes de desgaste por processos erosivos, como colinas, morros e tabuleiros, quanto as

formas de agradação, como as planícies lacustres, fluviais e marinhas. Os tipos de forma de relevo apresentam semelhanças entre si, tanto em sua morfologia quanto em sua morfometria, isto é, em forma e dimensão.

A representação cartográfica do 4º Táxon (tipos de forma do relevo) faz-se em conjunto com a representação do 3º Táxon (padrões de formas do relevo). Um padrão de formas do relevo tipo Da 52 é constituído por relevo denudacional de topo aguçado, com incisão > 160 m e dimensão interfluvial grande de 700 m a 1.500 m.

Para serem calculadas as incisões ou entalhamentos fluviais, é imprescindível considerar a estrutura geológica/geomorfológica regional e a hierarquização da rede de drenagem, que darão a forma da dimensão do relevo a ser mapeado. Cabe salientar que a escolha da ordem hierárquica do curso de água é imprescindível para se caracterizar e mapear o relevo requerido, e encontra-se descrito nos procedimentos metodológicos do projeto Radambrasil, no qual essa metodologia foi primeiramente desenvolvida no Brasil (Barbosa et al. 1984) e depois ajustada por Ross (1992), que também trabalhou no referido projeto.

O 5º Táxon, que são os tipos de vertentes, é formado pelas vertentes ou setores de vertentes que compõem os tipos de formas dos relevos individualizados. Uma vertente ou mesmo um setor de vertentes é individualizado pelas características geométricas, genéticas e dinâmicas.

Devido às dimensões ou aspectos dos seus próprios setores, o 5º Táxon somente pode ser representado cartograficamente em escalas grandes, maiores ou iguais a 1:25.000. Em virtude da escala deste trabalho, o 5º Táxon será analisado através dos perfis topográficos elaborados. A proposta de se analisar o 5º Táxon em perfis topográficos tem também o intuito de não poluir a carta geomorfológica com muitas informações que podem dificultar sua leitura e compreensão. Como exemplo, Salomé e Van Dorsser (1982) compararam seis sistemas europeus de mapeamento geomorfológico aplicados numa mesma área na Europa. O mapa geomorfológico que conteve o maior número de informações e detalhes, e supostamente o melhor do ponto de vista teórico, não foi considerado o mais prático nem o mais usual.

O 6º Táxon representa as menores formas mapeáveis. São formas produzidas pelos processos erosivos ou deposicionais atuais. Desse táxon, podem ser citadas formas causadas por agentes naturais, tais como voçorocas, ravinhas, bancos de sedimentação atuais e formas antrópicas como: cortes, aterros, mineração, entre outras. O mapeamento do 6º Táxon pode ser feito através de fotografias aéreas, imagens orbitais de alta resolução e trabalhos de

campo. Sua representação cartográfica, quando possível, faz-se por símbolos padronizados.

Para delimitar o 1º Táxon, correspondente às morfoestruturas, foram consideradas as informações geológicas mapeadas na carta geológica Cartagena 1.100.000, que serviu de base para a posterior delimitação das morfoestruturas. Foram estabelecidas cinco morfoestruturas: o Cinturão de San Jacinto, o Cinturão de Sinú e os três depósitos sedimentares quaternários descritos na carta geológica Cartagena: os depósitos de planície costeira (Qlc), os depósitos colúvioaluviais (Qcal) e os depósitos de praias (Qmp). Esses depósitos sedimentares sustentam também morfologias. Os depósitos de praias mapeados por Colombia (2003) sustentam planícies e terraços marinhos, portanto, sobre um depósito sedimentar, podem existir mais de uma morfoescultura.

## Aplicação dos índices morfométricos

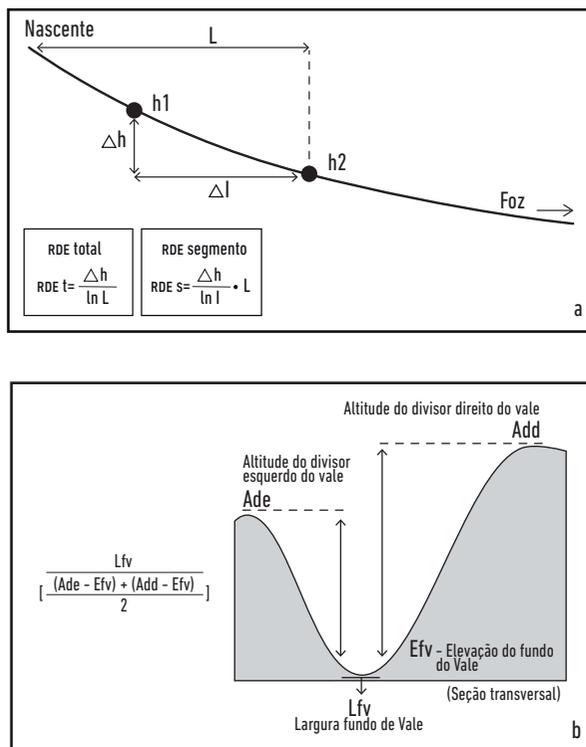
### Índice Relação Declividade-Extensão (RDE)

Esse índice morfométrico foi desenvolvido por Hack (1973), que, após diversos anos estudando perfis longitudinais de rios, propôs um novo índice para detectar alterações no curso decorrentes de mudanças no substrato geológico, aporte de carga ou tectonismo, chamado de *stream-gradient index*, ou simplesmente índice SL (relação declive (*Slope*) vs. comprimento de curso (*Length*)), aqui traduzido como Relação Declividade-Extensão (doravante RDE).

Optou-se por aplicar o índice  $RDE_{total}$  e o índice  $RDE_{segmento}$  em drenagens que apresentaram maior diferença altimétrica entre a nascente e a foz, isso visto por meio das curvas de nível obtidas através da imagem SRTM. Foram selecionadas, principalmente, drenagens cujos cursos estivessem em sua maior parte sobre unidades geológicas semelhantes para minimizar, assim, a influência das diferentes unidades rochosas na configuração da rede de drenagem.

Para avaliar a intensidade das anomalias verificadas a partir da aplicação do índice  $RDE_{total}$  e  $RDE_{segmento}$ , das drenagens selecionadas, foram considerados os parâmetros apresentados por Andrades Filho (2010), que considera  $RDE_{total}$  e  $RDE_{segmento}$  iguais a 2 como o limite inferior de anomalia. Seebeer e Gornitz (1983) determinam categorias de intensidade de anomalias, em que as de 1ª ordem (de intensidade maior) referem-se a valores superiores a 10; as de 2ª ordem (de menor intensidade) referem-se aos índices que apresentam valores de 2 a 10.

Na fórmula apresentada para a obtenção do índice  $RDE_{total}$  ( $RDE_V$ ),  $\Delta h$  é a diferença altimétrica entre dois pontos extremos de um segmento ao longo de um curso de água (nascente e a foz).  $Ln$  corresponde ao logaritmo natural do canal e  $L$  é a distância entre a nascente e a desembocadura. De forma similar, para o índice  $RDE_{segmento}$  ( $RDE_S$ ),  $\Delta h$  é a diferença altimétrica entre dois pontos do canal em que o índice está sendo calculado;  $\Delta l$  corresponde à projeção horizontal do segmento em evidência e  $L$  é o comprimento total do curso de água acima do ponto para o qual o índice está sendo calculado (figura 5a).



**Figura 5.** a) Parâmetros para o cálculo do índice RDE; b) Fórmula matemática e procedimentos de medida para obter os valores do índice Razão Fundo-Altura do Vale (doravante RFAV).

Fonte: a) adaptado de Hack 1973, 422; b) Wells et al. 1988, 243.

Nota: Os pontos  $h_1$  e  $h_2$  representam duas isolinhas altimétricas subsequentes.

### Índice Razão Fundo-Altura do Vale (RFAV)

Na escolha dos vales para a aplicação do índice RFAV, foi analisada a carta clinográfica para identificar os vales mais profundos que apresentam vertentes com as declividades mais acentuadas e a carta geológica para traçar os perfis, preferencialmente, em vales que apresentam uma litologia uniforme em ambos os lados da drenagem. Os vales que apresentam situação de dissecação mais intensa podem indicar contexto de soerguimento.

Os dados que necessitam ser obtidos na aplicação do índice RFAV nos vales escolhidos são os seguintes: a) altitude do divisor esquerdo do vale (Ade); b) altitude do divisor direito do vale (Add); c) elevação do fundo do vale (Efv), e d) largura do fundo do vale (Lfv) (figura 5b).

A intensidade dos valores obtidos com a aplicação do índice RFAV baseou-se em observações feitas por Silva, Schulz e Camargo (2003), que sugerem que os valores de RFAV menores que 1 são indicadores de tectônica ativa, e os maiores que 1, indicadores de estabilidade tectônica.

### Índice Fator Assimétrico (FA)

Para a escolha das bacias hidrográficas, onde foram efetuados os cálculos do índice fator assimétrico (doravante FA), considerou-se que as bacias tivessem evidências prévias e incontestáveis de assimetria em suas morfologias.

Primeiramente, foi vetorizada a bacia em sua totalidade para gerar automaticamente sua área total em  $km^2$ . Posteriormente, a operação foi repetida na margem direita do curso principal para que fosse calculado o valor da área ( $km^2$ ) desse setor. Depois, a obtenção dos dados e os valores foram colocados na equação e estabelecidos seus resultados.

O fator assimétrico é definido pela equação  $Af = 100 (Ar/At)$ , em que  $Ar$  é a medida da área direita da bacia, e  $At$  corresponde à medida da área total da bacia de drenagem. Quando o índice resultante possuir um valor muito próximo ou igual a 50, a bacia possui condições estáveis. Portanto, os resultados abaixo ou acima de 50 podem ocorrer devido à mudança de inclinação do terreno, resultante de atividade tectônica ou da erosão diferencial por controle litológico.

Segundo Andrades Filho (2010), a intensidade da assimetria pode ser representada em três classes de valores, em que as bacias hidrográficas com assimetria baixa correspondem a valores de FA entre 0-7; com assimetria média, os valores variam entre 7-15 e com alta assimetria, valores > que 15.

## Resultados e discussões

### Carta clinográfica

Com relação à declividade, a área apresenta uma topografia predominantemente plana, com valores de declividade de 0-3%, como se pode observar na carta clinográfica gerada (figura 6). Em geral, essa classe de declividade abrange 62,99% da área de estudo.

As declividades  $< 3\%$  são verificadas, principalmente, nos depósitos sedimentares quaternários, devido a essas áreas serem constantemente submetidas a inundações por suas baixas altitudes. Essas inundações frequentes recobrem feições estruturais que poderiam influenciar na declividade, haja vista que a carta geológica apresenta falhas inferidas e cobertas sobre esses depósitos quaternários (figura 1).

As vertentes com as maiores declividades foram verificadas no setor leste da área de estudo, nas partes mais elevadas do Cinturão de San Jacinto, na Formação San Cayetano e em algumas vertentes da Formação La Popa, nos afloramentos encontrados na praia de Punta de la Cantera, localizada ao NW e nas vertentes do Cerro de La Popa, localizado no sítio urbano de Cartagena de Índias (figura 6). Essas constatações corroboram que a tectônica recente possui forte influência na morfologia da área e

nas elevadas declividades encontradas, principalmente, nos dois cinturões de dobramento verificados.

### Modelo numérico do terreno (MNT)

O modelo numérico do terreno (doravante MNT) gerado (figura 7) proporciona a visualização de elevações pronunciadas, que alcançam cotas altimétricas desproporcionais à média da elevação da área no setor leste, e uma morfologia com altimetrias muito mais baixas em direção à linha de costa.

As maiores elevações da área podem ser observadas exatamente onde se localiza o Cinturão de San Jacinto, com elevações de até 500 m. Trata-se de uma estrutura linear com sentido N passando para NE, fortemente dissecada, formando cristas aguçadas. Essa serrania dá origem a várias drenagens, e essas cristas são as grandes divisoras de água no setor oriental da área.

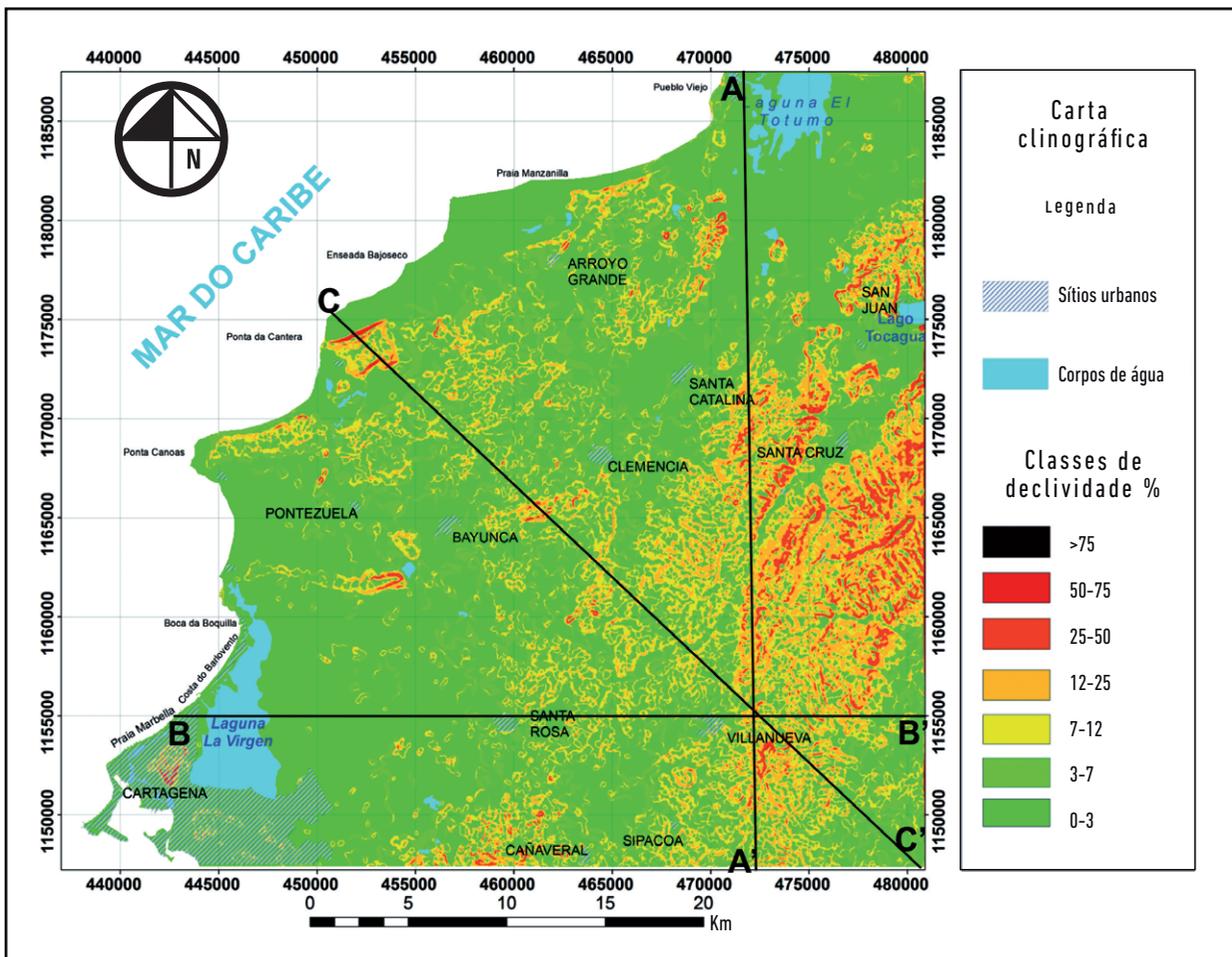


Figura 6. Carta clinográfica da área de estudo com a localização dos perfis topográficos traçados.

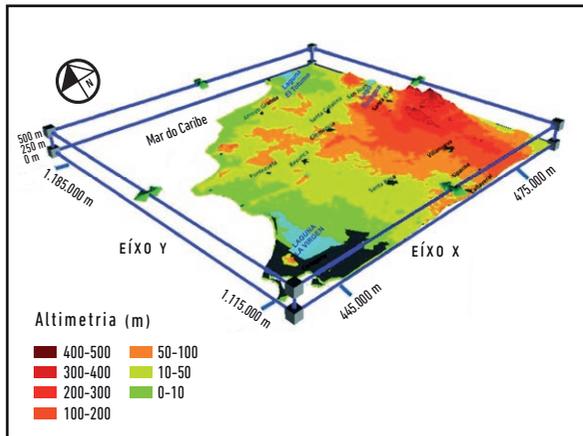


Figura 7. MNT com a altimetria do relevo.

### Análise qualitativa e quantitativa da rede de drenagem

Foram escolhidas duas bacias completas que se encontram inteiramente dentro da área de estudo e segmentos de cursos de água que se encontram no Cinturão de San Jacinto, mas alguns desses segmentos, principalmente os que possuem sentido leste, não estão totalmente dentro da área e, portanto, somente pode ser aplicado o índice RFAV nesses canais.

A bacia hidrográfica 1 (figura 8) localiza-se no setor centro-norte da área, e o sentido de seu curso principal é para o norte. É bastante nítido o confinamento dessa bacia entre os cinturões de San Jacinto ao leste e de Sinú a oeste e seus cursos mais amplos ajustados aos depósitos coluvialuviais. O padrão de drenagem é den-drítico e muitos de seus afluentes possuem anomalias

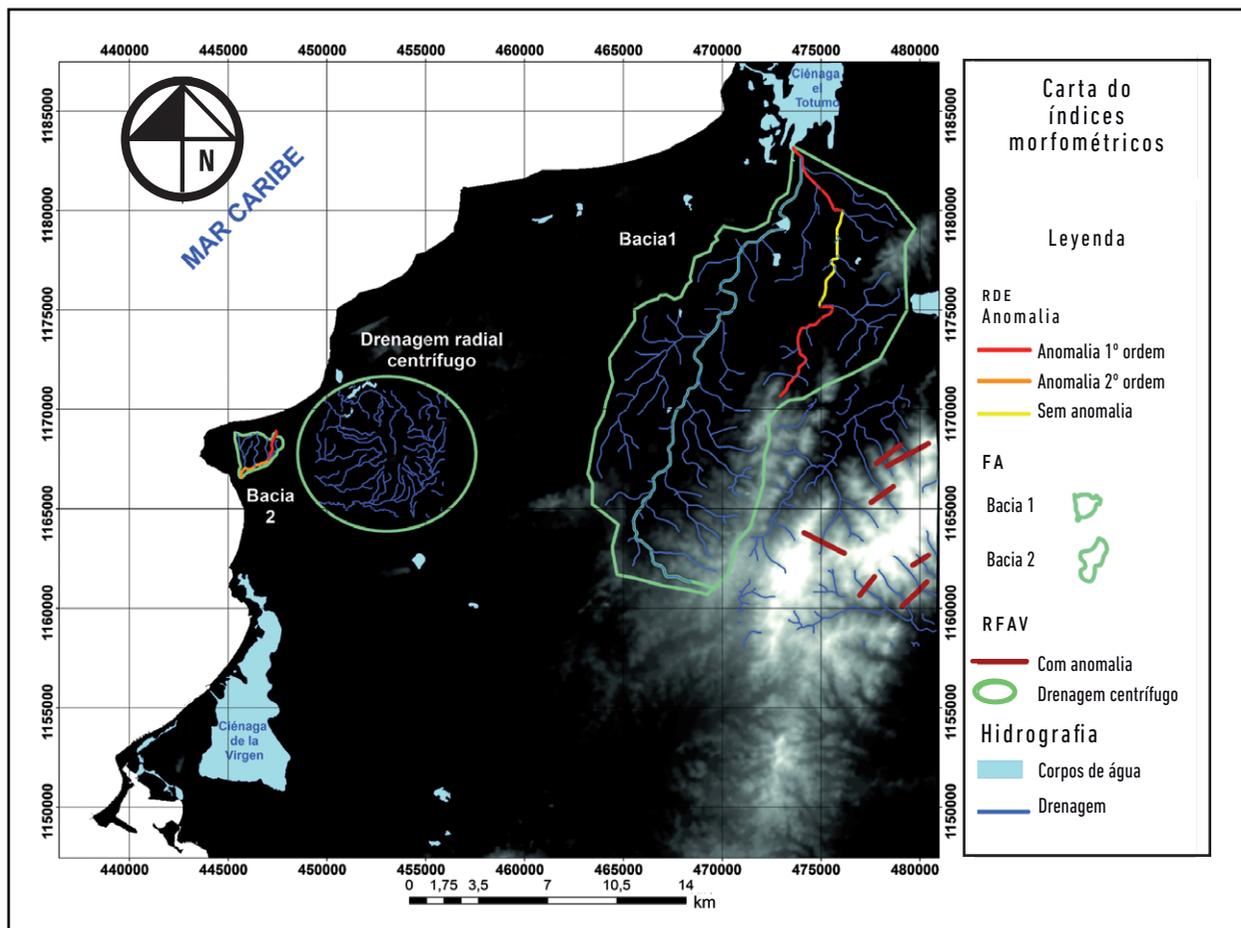


Figura 8. Carta de localização da rede de drenagem onde foram realizados os cálculos morfométricos.

significativas em seus cursos, formando inflexões bruscas, segmentos retilíneos e de forte assimetria entre os afluentes da margem leste, onde geralmente são mais avantajados e numerosos.

A bacia hidrográfica 2 (figura 8), embora apresente uma área geográfica pequena, foi escolhida para a análise por sua extrema assimetria, impossível de ser explicada somente pelos fatores exógenos. Seu setor norte, de onde provêm quase todos seus afluentes, está sobre a Formação Bayunca, onde o basculamento ou inclinação dos estratos sedimentares de norte para o sul, atestado através de trabalho de campo, alcançam valores de 39°, 40° e 42°.

No setor noroeste da área, encontra-se uma rede de drenagem radial centrífuga intimamente relacionada à forma dômica gerada por um vulcanismo de lama (vulcão de lama de Bayunca). É o vulcão de lama mais expressivo na área de estudo e que influencia fortemente todo o relevo adjacente, não somente na configuração da drenagem, como também na altimetria e na morfologia.

Os riachos analisados no Cinturão de San Jacinto apresentam um marcado paralelismo, perpendicular às cristas da Formação San Cayetano. Partes desses riachos possuem sentido NW e outra parte sentido SE. Por estarem situados no Cinturão de San Jacinto, onde são encontradas as maiores altitudes, foram escolhidos para a aplicação do índice morfométrico RFAV.

### Índices morfométricos

Os três índices morfométricos aplicados na área de estudo corroboram a afirmação de que a tectônica recente é o fator determinante na morfologia atual do relevo, pois em todos os índices aplicados (RDE, RFAV e AF) foram obtidos valores anômalos que indicam atividade tectônica atual, tendo em vista que os cursos de água são os primeiros a se adaptarem aos eventos tectônicos.

#### Índice Relação Declividade-Extensão (RDE)

O índice relação declividade/extensão (doravante RDE) foi aplicado em duas bacias hidrográficas distintas que se encontram em substratos geológicos diferentes (figura 8). Todos os canais dos riachos analisados foram subdivididos em segmentos para a obtenção dos resultados para os RDES. Devido à sua maior extensão, o riacho Quitacalzón foi dividido em três segmentos, e o riacho Punta Canoa em dois segmentos.

Os resultados obtidos com o índice RDE no riacho Quitacalzón, em sua totalidade, com exceção do segmento

2, revelaram valores que correspondem a anomalias de 2ª ordem. No segmento 1 desse riacho, foi obtido o maior valor de RDE na área de estudo, visto que esse segmento se encontra no Cinturão de Sinú. O outro segmento anômalo, contrário às expectativas, encontra-se em sua totalidade nos depósitos colúvioaluviais do Quaternário, corroborando para uma tectônica atual (tabela 4).

**Tabela 4.** Valores obtidos com a aplicação do índice RDE nas bacias investigadas

Segmentos	RDE segmento	RDE total	RDES/RDEt	Ordem de anomalia
Quitacalzón Segmento 1	109	12,07	9,03	2ª Ordem
Quitacalzón Segmento 2	2,23		0,18	Sem anomalia
Quitacalzón Segmento 3	32		2,66	2ª Ordem
Punta Canoa Segmento 1	41	5,32	7,71	2ª Ordem
Punta Canoa Segmento 2	13,27		2,50	2ª Ordem

No riacho Punta Canoa, nos dois segmentos analisados, foram encontradas anomalias de segunda ordem. No segmento 1, que percorre a Formação Bayunca, o valor obtido foi superior ao encontrado no segmento 2, que recorre os depósitos de planície costeira (tabela 1). Os valores obtidos com a aplicação do índice RDE confirmam uma tectônica ativa não somente no Cinturão de Sinú, como também nos depósitos quaternários inconsolidados, o que reforça a constatação de que a atuação tectônica está presente na atualidade e evidencia-se como componente ativo na configuração das formas do relevo e da rede hidrográfica.

#### Índice Razão Fundo-Altura do Vale (RFAV)

O índice RFAV, que pode ser aplicado em trechos de cursos de água, não necessitando ser aplicado em bacias hidrográficas, foi empregado nos cursos de água mais expressivos localizados na borda ocidental e oriental do Cinturão de San Jacinto, pois são os cursos de água cujas nascentes se encontram nas altitudes mais elevadas de área. São rios bastante retilíneos com seus divisores topográficos bem-definidos (figura 8).

Todos os resultados do índice RFAV foram considerados anômalos com influência de atividade tectônica na incisão do canal fluvial em relação aos seus divisores de água, pois todos os valores obtidos foram menores

**Tabela 5.** Variáveis morfométricas e valores obtidos com a aplicação do índice RFAV nos riachos analisados

Riachos	Largura do fundo do vale	Elevação do divisor esquerdo	Elevação do divisor direito	Elevação média do fundo do vale	RFAV
Riacho Iraquita	45	300	310	153	0,29
Riacho Sabana	44	230	272	170	0,55
Riacho Las Pitias	35	270	280	170	0,33
Riacho Las Tablas	8	280	210	170	0,10
Riacho Bartolo	45	340	260	200	0,45
Riacho Chorro	105	230	370	120	0,77
Riacho Armadillo	18	301	334	249	0,26

que 1. Portanto, todos os sete riachos analisados nesse setor apresentaram anomalias tectônicas constatadas através da aplicação desse índice. O riacho Las Tablas apresentou o menor valor; portanto, é interpretado como aquele que sofreu influência tectônica mais acentuada (tabela 5).

Todos os riachos analisados apresentaram valores de RFAV inferiores a 1 e estão encaixados em vales em formas de V. Os resultados apresentados nesses riachos são similares aos valores obtidos por El Hamdouni et al. (2008) na região da Sierra Nevada, ao sul da Espanha, numa região de limite convergente de placas litosféricas e tectonicamente ativas.

#### Índice de Fator Assimétrico (FA)

Foram escolhidos para a aplicação do índice FA as bacias dos riachos Quitacalzón e Punta Canoa, já que as duas apresentam uma morfologia fortemente assimétrica, sendo impossível que a gênese dessa assimetria entre os afluentes das duas margens dos riachos principais seja resultado de uma evolução fluvial sem interferência da tectônica (figura 8).

Nessas duas bacias, os valores obtidos foram muito elevados e considerados de forte assimetria, com valores de 19 e 27 para as bacias 1 e 2, respectivamente (tabela 6). Esses valores, somados às formas retilíneas dos canais principais e às discrepâncias entre os afluentes de suas margens, reforçam a influência tectônica recente na configuração e disposição da rede de drenagem.

**Tabela 6.** Valores obtidos com a aplicação do índice FA nas bacias estudadas

Bacias hidrográficas	Área da bacia (setor direito) km <sup>2</sup>	Área total km <sup>2</sup>	FA	FA-50
Bacia 1	132,45	191,169	69	19
Bacia 2	2,73	3,51	77	27

### Caracterização geomorfológica

Baseado na construção e análise da carta geomorfológica produzida (figura 9), foram individualizadas cinco morfoestruturas para a área: Cinturão de San Jacinto, Cinturão de Sinú, depósitos de planície costeira, depósitos colúvioaluviais e depósitos de praia. As morfoestruturas foram subdivididas em seis morfoesculturas assim denominadas: Serrania de San Jacinto, Serrania de Sinú, Baixos Tabuleiros e Morros Testemunhos de Sinú, Terraços e Planícies Costeira, Terraços Colúvioaluviais e Terraços e Planícies Marinhas.

As morfoesculturas representadas pela Serrania de San Jacinto e pela Serrania de Sinú foram delimitadas em dois tipos de Padrões de Formas de Relevo (3° Táxon). Formas com topos aguçados e formas com topos convexos. As formas com topos aguçados são encontradas nos cumes das duas serranias. Os valores morfométricos encontrados para os topos aguçados foram: Serrania de San Jacinto (Da 51) e na Serrania de Sinú (Da 41) (figura 9).

Esses valores representam um entalhe médio dos vales muito forte (> 160 m) e dimensão interfluvial média muito grande (> 1500 m), para os topos aguçados Da 51, e um entalhe médio dos vales > 80 m e dimensão interfluvial média muito grande (> 1500 m), para os topos aguçados Da 41. Esses valores de dissecação sugerem que essa forte incisão se dá por processos erosivos agressivos e demonstram, ademais, que as morfoesculturas desses cinturões estão num rápido processo denudacional.

A maior variedade de Padrões de Forma de Relevo foi verificada na morfoescultura dos Baixos Tabuleiros e Morros Testemunhos de Sinú (figura 9). Nessa morfoescultura, foram encontradas formas com topos convexos e com topos tabulares com entalhes de intensidade forte a baixa e dimensão interfluvial média, grande a muito grande, desde formas tabulares Dt 11 até formas

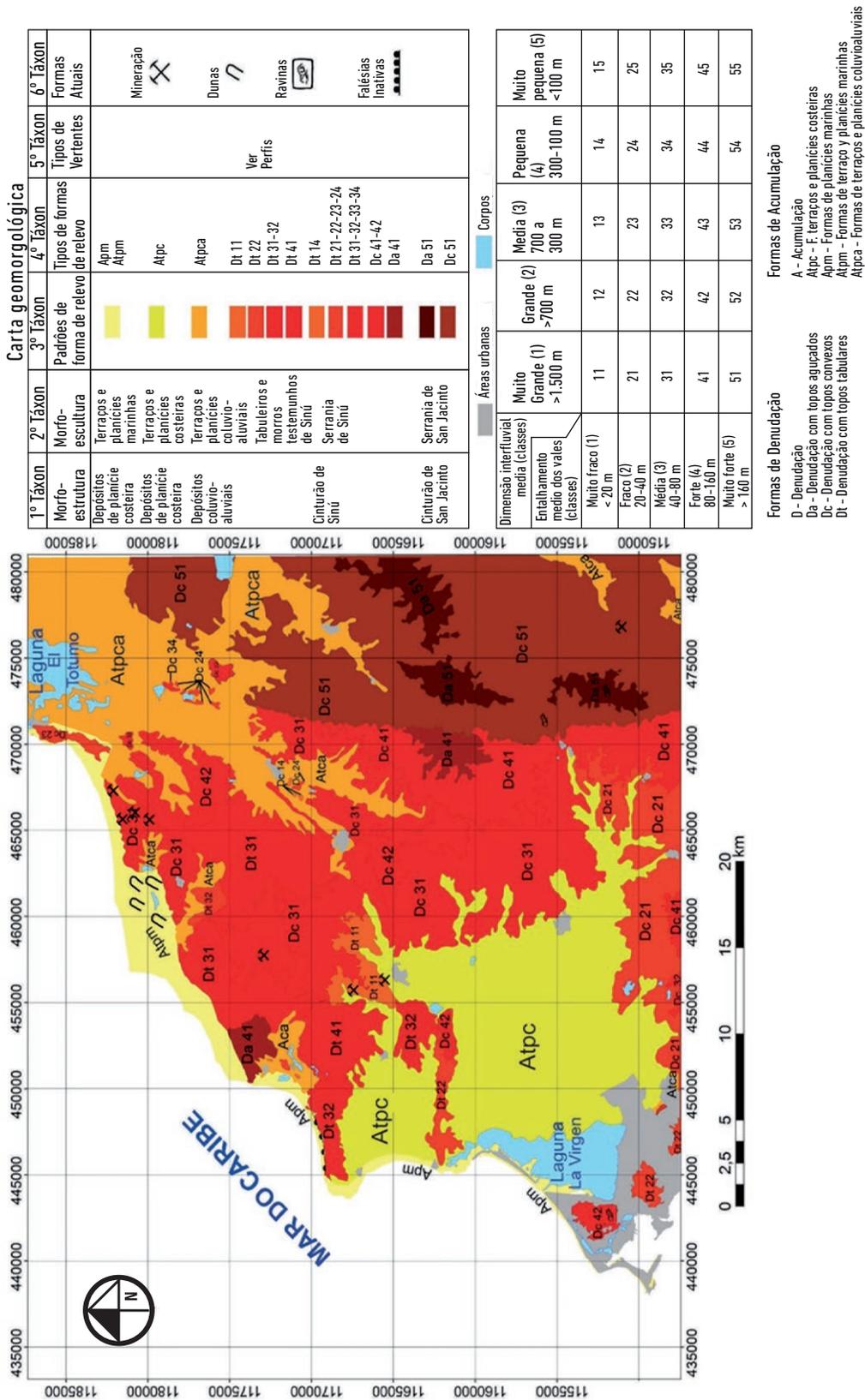


Figura 9. Carta geomorfológica da área de estudo.

com topos convexos Dc 42, como é o exemplo do Cerro de La Popa, no sítio urbano de Cartagena.

O fator tectônico volta a ser fortemente evidenciado, quando se observa uma grande variedade de Padrões de Formas de Relevo numa mesma formação geológica. Na Formação Arjona, são encontrados Padrões de Formas de Relevo altamente distintos, variando suas formas e dimensões de Dc 21 a 41. Na Formação Bayunca, são encontrados tanto relevo com topos convexos quanto tabulares. Além de amplo espectro dimensional nessas formações, onde os Padrões de Forma de Relevo variam desde Dt 11 até Dc e 41.

Outra característica do relevo mapeado são as diferentes e variadas morfologias desenvolvidas sobre a Formação La Popa, que possuem formas com topos aguçados (Da 41) e com vertentes com elevada declividade e muito pronunciadas frente ao Mar do Caribe. Essa forma de relevo testemunho, e anômalo às morfologias observadas, encontra-se com maior frequência no setor noroeste, muito próximo à linha de costa. Nos trabalhos de campo, foram verificadas fraturas e falhas que influenciaram em grande medida o desenvolvimento peculiar do relevo dessa formação.

O Cerro La Popa alcança as elevações mais altas encontradas sobre a formação homônima e a morfologia desse relevo tem forma com topo convexo Dc 42. Mas a diferença desse relevo testemunho em relação aos descritos anteriormente é que este possui uma vertente muito mais pronunciada e com maior declividade voltada para o continente (face ocidental) (figura 7). Portanto, é nítida a influência da tectônica recente no desenvolvimento das várias morfologias desenvolvidas sobre a Formação La Popa (figura 9).

Portanto, em alguns relevos desenvolvidos sobre a Formação La Popa (Pleistoceno superior), as altitudes e as vertentes são mais pronunciadas ao leste, enquanto em outros, tais formas invertem-se por completo, com elevações mais acentuadas e vertentes com maior declividade, voltadas a oeste.

O relevo agradacional, formado pelos Terraços e Planícies Costeiras, apresenta uma área baixa com altitudes máximas de 120 m em seu extremo oriente e altitudes mínimas de 2 m nas proximidades com a Laguna de la Virgen. Essa variação altimétrica pode ser considerada elevada, pois se trata de uma área agradacional quaternária com inclinação para o sentido oeste.

Essa acentuada inclinação corrobora para uma influência tectônica recente. Para efeito de comparação com um depósito de planície costeira mapeado no Nordeste

do Brasil por Furrier, Nóbrega e Souza (2014), a inclinação desses depósitos quaternários em direção ao oceano foi de  $0,06^\circ$ , e a inclinação observada na área de estudo foi de  $0,33^\circ$ , ou seja, uma inclinação 5,5 vezes maior que a verificada numa margem continental do tipo passiva.

Essa mesma heterogeneidade também é verificada na morfoescultura Terraços Coluvioaluviais, que também não apresentam uma morfologia exclusivamente plana; portanto, apontam os mesmos problemas para uma caracterização morfológica mais precisa. Contudo, percebe-se que são morfoesculturas distintas. Essa morfoescultura apresenta uma suave inclinação em sentido norte, até a Laguna de el Totumo, uma expressão geográfica menor, assim como sua variação altimétrica (figura 9).

As formas agradacionais designadas de Terraços e Planícies Marinhas abarcam uma área geográfica considerável, constituída por sedimentos marinhos atuais. Em certos pontos, alcança mais de 1.600 m de largura desde a linha de costa até seu encontro com a Formação Arroyo Grande, que se dá de forma abrupta. Não foram observadas variações altimétricas consideráveis nessa morfoescultura, que não ultrapassa os 10 m de altitude.

Quanto a essas planícies, pode-se destacar, neste trabalho, que a erosão costeira ocorre, exclusivamente, em áreas densamente ocupadas e minoritárias, não sendo observadas em áreas desabitadas. Como é de conhecimento científico que o maior problema de erosão costeira no mundo não é a subida relativa do nível do mar, mas o déficit sedimentar ocasionado pela ocupação humana. Esse fato torna-se mais sobressalente na área, pois todos os dados levantados e analisados corroboram substancialmente para uma tectônica ativa e positiva na configuração do relevo. Em regiões com essa tectônica e sem a interferência humana, a tendência é de progradação da linha de costa e não de erosão, mesmo com uma subida relativa do nível do mar.

Devido ao problema de escala e ao provável excesso de informações na carta geomorfológica, dado o excesso de informações visuais, foi proposto traçar três perfis geológico-topográficos na carta clinográfica (figura 6) com direções N-S, W-E e NW-SE, que abarcam grande parte das formações geológicas e as principais morfoesculturas mapeadas (figura 10). Para uma melhor comparação entre as morfoestruturas e as morfoesculturas encontradas, foram incrementadas nesses perfis topográficos a litologia e as principais estruturas geológicas mapeadas.

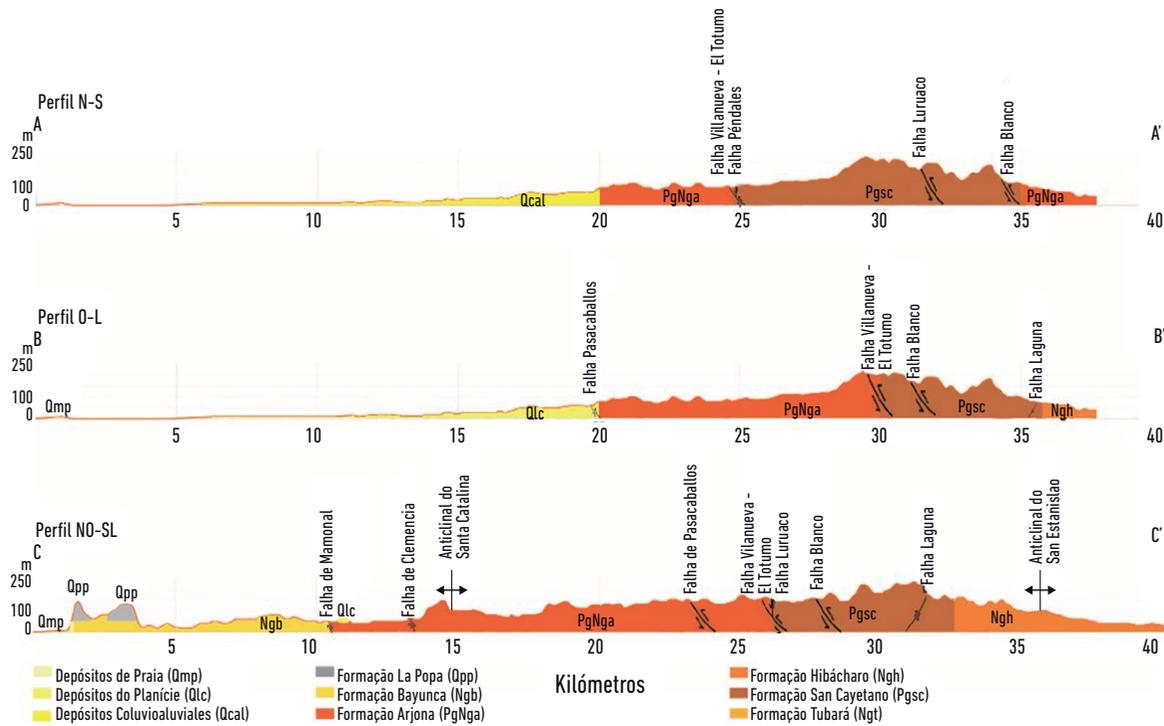


Figura 10. Perfis topográficos gerados a partir das curvas de nível obtidas através de imagem SRTM, com informações geológicas.

Analisado o perfil N-S, observa-se o relevo de Terraços e Planícies Colúvioaluviais amplamente distribuído até seu contato com a Formação Arjona. Nesse trecho, predomina um relevo aplainado. Já na Formação Arjona, é possível observar as vertentes convexas com baixas declividades. Em sentido sul, a Formação Arjona faz contato com a Formação San Cayetano através da falha de cavalgamento Villanueva-El Totumo, entretanto, devido à disposição desse perfil, as vertentes, no início da Formação San Cayetano, não são visualizadas em seu melhor ângulo, visto que a compressão tectônica que gerou a Serrania de San Jacinto tem sentido NE. Quando o relevo representado nesse perfil alcança sua maior altitude e declividade, as vertentes são bem-visualizadas, sendo observadas vertentes com declividades acentuadas e de formas convexas a retilíneas, além de degraus entre as falhas de Luruaco e Blanco, o que é indicativo de uma sequência de falhas inversas (figura 10).

No perfil W-E, a primeira morfoescultura delimitada é compreendida pelos Terraços e Planícies Marinhas e, logo em seguida, a morfoescultura dos Terraços e Planícies Costeiras, apresentando um relevo bastante aplainado até o limite com a Formação Arjona, através da Falha de Pasacaballos. Sobre a Formação Arjona, são

encontradas, principalmente, vertentes convexas e, em sentido leste, uma abrupta ascensão do relevo através de uma vertente retilínea de elevada inclinação até o limite com a Falha Villanueva - El Totumo, quando o perfil entra na Serrania de San Jacinto, que apresenta uma densidade elevada de vertentes convexas, retilíneas e, mais uma vez, são observados níveis distintos entre vertentes retilíneas, que é um indicativo de outra sequência de falhas inversas (figura 10).

Analisando o perfil NW-SE, que se inicia numa planície costeira, observam-se, nitidamente, dois morros testemunhos completamente anômalos em sua morfologia, altitude e declividades, que são constituídos pela Formação La Popa (figura 10). Essa morfologia impede qualquer compreensão de sua gênese que não seja baseada numa tectônica recente. São visualizadas vertentes retilíneas a barlavento muito mais íngremes que as localizadas a sotavento.

Em sentido SE, depois dos morros aguçados da Formação La Popa, encontra-se a Formação Bayunca numa morfologia dômica, sendo essa área fortemente influenciada pelo diapirismo de lama. Seguindo em sentido SE, a Formação Bayunca é bruscamente seccionada pela falha de cavalgamento Mamonal, onde se inicia a

Formação Arjona com vertentes côncavas, convexas e retilíneas num alto estrutural formado pela anticlinal de Santa Catalina, que a sotavento forma uma vertente ampla e retilínea (figura 10). Ao encontrar a falha Villanueva - El Totumo, inicia-se a Serrania de San Jacinto com vertentes convexas, côncavas e retilíneas, muitas vezes em cristas aguçadas. A Formação San Cayetano é separada da Formação Hibácharo por plano de discordância, mas na carta geológica não apresenta uma falha mapeada que separe essas duas formações e tampouco houve possibilidade de identificá-la em campo.

No 6º Táxon, as formas mais mapeadas foram as áreas de mineração de areia por desmonte hidráulico. Foi observado através de imagens orbitais um total de 29 áreas de mineração. Os produtos mais explorados são: areias, cascalhos e calcário para a construção civil e fabricação de cimento, e argilas para a fabricação de ladrilhos e tijolos.

Também com a ajuda de imagens orbitais e trabalho de campo foram constatados alguns deslizamentos de terra, principalmente nas formas aguçadas e convexas das Serranias de San Jacinto e de Sinú. Esses deslizamentos aparentemente estão mais relacionados às falhas de pequenas dimensões e não mapeadas e às vertentes com maior declividade do que à precipitação, pois, nessas áreas mais elevadas e distantes do Mar do Caribe, praticamente todos os riachos são intermitentes, o que indica uma pluviosidade mais baixa que a registrada em Cartagena de Índias. Pelas vertentes verificadas nessas serranias e pela litologia que elas são constituídas, essas formas erosivas atuais não são tão comuns, o que também corrobora a verificação de que a sua ocorrência se deva mais a fatores estruturais que à precipitação.

Outras duas formas verificadas e que se encontram dentro do 6º Táxon são os campos de dunas e as falésias inativas. Os campos de dunas encontram-se sobre os Terraços e Planícies Marinhas, à retaguarda da praia de Manzanillo, que apresenta uma vegetação pioneira, típica de campos de dunas estáveis (figura 10). As falésias inativas se encontram ao leste de Punta Canoas, onde a Formação Bayunca foi afetada por um basculamento de norte a sul de 42 a 39°. Esse basculamento provavelmente impediu a ação direta das ondas no sopé dessas falésias.

## Conclusões

A proposta principal deste trabalho, que é a de uma caracterização e mapeamento geomorfológico, implicou um levantamento bibliográfico da área quanto aos aspectos

metodológicos e científicos, que são poucos, e a produção cartográfica, além de trabalhos de campo. A integração dos dados obtidos, levantados, produzidos e analisados resultou numa visão inédita da área, sendo possível visualizar como a geologia e a tectônica integram-se com a geomorfologia.

O levantamento geológico foi fundamental na caracterização geomorfológica, tanto no aspecto litológico como no estrutural. Contudo, há que se destacar que a descrição prévia da área e trabalhos científicos publicados possuem enfoque geológico, sendo o conhecimento geomorfológico antecedente da área extremamente pobre quando comparado ao conhecimento geológico. Os estudos geológicos na Colômbia são muito mais ricos que os estudos geomorfológicos, mesmo sendo a geomorfologia muito mais pesquisada por geólogos que por geógrafos, contrariando o que se encontra na maior parte do mundo, onde a Geomorfologia é uma área tradicionalmente da Geografia Física.

A caracterização geomorfológica foi fortemente baseada nos aspectos estruturais e tectônicos, sendo numerosas as evidências encontradas e apresentadas, embora atentando para o fato de que continuam sendo necessários trabalhos geomorfológicos estruturais mais detalhados. Ainda que o fator climático para a evolução do relevo na área seja secundário, este não pode ser negligenciado. O fator climático possui sua responsabilidade na esculturação do relevo verificado, que na área atua, principalmente, na percolação da água pluvial nas inúmeras fraturas e falhas observadas em todas as formações geológicas.

A caracterização geomorfológica aqui apresentada demonstrou o quanto é necessário relacionar a geologia e a tectônica com as formas atuais do relevo, o que deixa claro que é praticamente impossível pensar na evolução do relevo baseando-se apenas nos processos exógenos, principalmente quando se refere a uma área tectonicamente ativa, onde as forças endógenas se sobressaem às forças exógenas.

## Referências

- Andrades Filho, Clódis de Oliveira. 2010. "Análise morfoestrutural da porção central da Bacia Paraíba (PB) a partir de dados MDE-SRTM e ALOS-PALSAR FBD." Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo.
- Angel, Carlos, Jairo Esquivel, e Gustavo Sarmiento. 1985. *Geología del Departamento de Bolívar al norte del Canal del*

- Dique*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas).
- Barbosa, G. V., T. C. da Silva, T. Natali Filho, D. M. Del'Arco, e R. C. R. da Costa. 1984. *Evolução da metodologia para mapeamento geomorfológico do projeto Radambrasil*. Salvador: Projeto Radambrasil.
- Barrera Olmos, R. J. 1999. *Geología de las Planchas 16-17 Galerazamba y Barranquilla—escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Carvalho, Thiago Morato, e Edgardo Manuel Latrubesse. 2004. "Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia." *Revista Brasileira de Geomorfologia* 5 (1): 85-93. doi: 10.20502/rbg.v5i1.34.
- Duque-Caro, H. 1978. "Geotectónica y evolución de la región noroccidental colombiana." *Boletín Geológico - Ingeominas* 23 (3): 4-37.
- El Hamdouni, R., C. Irigaray, T. Fernández, J. Chacón, e E. A. Keller. 2008. "Assessment of Relative Active Tectonics, Southwest Border of the Sierra Nevada (Southern Spain)." *Geomorphology* 96 (1): 150-173. doi: 10.1016/j.geomorph.2007.08.004.
- Fitz, P. R. 2008. *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Furrier, Max, Wesley Ramos Nóbrega, e Alexandre dos Santos Souza. 2015. "Análise morfométrica e morfotectônica do gráben do rio mamanguape e adjacências, borda oriental do estado da Paraíba, Brasil." *Revista do Departamento de Geografia - USP* 28:25-38. doi: 10.11606/rdg.v28i0.474.
- Guzmán, G., E. Gómez, e B. Serrano. 2004. *Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del valle inferior del Magdalena - Caribe Colombiano*. Bogotá: Ingeominas.
- Hack, John T. 1973. "Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index." *Journal of Research of the U.S. Geological Survey* 1 (4): 421-429.
- Hartwing, M. E, e C. Riccomini. 2010. "Análise morfotectônica da região da Sierra dos Órgãos, sudeste do Brasil." *Revista Brasileira de Geomorfologia* 11 (1): 11-20.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (1968) 1980. *Estudio general de clasificación de los suelos de la cuenca alta del río Bogotá para fines agrícolas*, 2<sup>ed</sup>. Bogotá: IGAC.
- IGAC. 1982. *Estudio general de suelos de la zona del canal del Dique: municipios de Arjona, Calamar, Mahates, María la Baja, San Estanislao, Santa Rosa, Soplaviento, Turbaco, Turbana, y Villanueva (Departamento de Bolívar)*. Bogotá: IGAC e Ministerio de Hacienda y Crédito Público.
- IGAC. 2005. *Carta general Cartagena - hoja n.º 23*, escala 1:100000. Bogotá: IGAC.
- Ingeominas (Instituto Colombiano de Geología y Minería). 2001. *Geología de las planchas 23, Cartagena y 29-30 Arjona*. Memoria explicativa. Bogotá: Ingeominas.
- Ingeominas. 2003. *Geología de la plancha 23 Cartagena*, escala 1:100000. Bogotá: Ingeominas.
- Mescerjakov, J. P. 1968. "Les concept de morphostruture et de morphosculture: un nouvel instrument de l'analyse géomorphologique." *Annales de Géographie* 77 (423): 539-552.
- Penck, Walter. 1953. *Morphological Analysis of Landforms: A Contribution to Physical Geology*. Londres: Macmillan and Co.
- Ross, Jurandy Luciano. 1992. "O registro dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo." *Revista do Departamento de Geografia - USP* 6:17-29. doi: 10.7154/RDG.1992.0006.0002.
- Salomé, A. L., e H. J. Van Dorsser. 1982. "Examples of 1:50.000 Scale Geomorphological Maps of Part of Ardennes." *Zeitschrift fur Geomorphologie* 26 (4): 481-489.
- Seeber, L., e V. Gornitz. 1983. "River Profiles Along the Himalayan Arc as Indicators of Active Tectonics." *Tectonophysics* 92 (4): 335-367. doi: 10.1016/0040-1951(83)90201-9.
- Silva, Alexandre Marco da, Harry Edmar Schulz, e Plínio Barbosa de Camargo. 2003. *Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas*. São Carlos: Rima.
- Toto, El Arbi, e J. N. Kellogg. 1992. "Structure of the Sinú-San Jacinto Fold Belt - An Active Accretionary Prism in Northern Colombia." *Journal of South American Earth Science* 5 (2): 211-222. doi: 10.1016/0895-9811(92)90039-2.
- Wells, S. G., T. F. Bullard, C. M. Menges, P. G. Drake, K. A. Karas, K. I. Kelson, J. B. Ritter, e J. R. Wesling. 1988. "Regional Variations Tectonic Geomorphology Along a Segmented Convergent Plate Boundary, Pacific Coast of Costa Rica." *Geomorphology* 1 (3): 239-265. doi: 10.1016/0169-555X(88)90016-5.

### Max Furrier

Professor associado do Departamento de Geociências - Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

### Germán Vargas Cuervo

Professor associado do Departamento de Geografia - Faculdade de Ciências Humanas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.