

Geomorphological characterization and mapping of Cartagena de Indias and adjacencies

Max Furrier ^a; Germán Vargas-Cuervo ^b & Cristian Camilo Moncada ^c

^a Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil. max.furrier@gmail.com

^b Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. gvargasc@unal.edu.co

^c UT Estudios Ambientales – INERCO. Bogotá, Colombia, cmoncada@inerco.com

Received: June 03th, 2015. Received in revised form: March 1st, 2016. Accepted: May 7th, 2016.

Abstract

This work involves a geomorphological characterization of the topographic chart 23 III D, produced by IGAC, in which were developed thematic mappings and other cartographic products where the relief, both, in its morphology and its morphometric and spatial characteristics were the central theme. From the geomorphological point of view, the area in question is located on the Sinú Belt and the unconsolidated Quaternary sediments. Sinú Belt, which oldest geological formation is dated as Oligocene-Miocene, presents the highest altitudes in the mapped area reaching 146 meters in the Cerro La Popa. The lower levels of the relief in the area are the unconsolidated Quaternary deposits, which altitudes do not go over 20 meters. From mapping surveys, interpretation of orbital images, field observations and the integration of the interpretation obtained, it can be concluded that the Cenozoic tectonics is the most important setting factor in the morphological shape of the area.

Keywords: geomorphology; neotectonics; La Popa Formation.

Caracterización y mapeo geomorfológico de Cartagena de Indias y adyacencias

Resumen

Este trabajo abarca una caracterización geomorfológica de la hoja topográfica 23 III D, producida por IGAC, en que fueron elaborados mapeos temáticos y otros productos cartográficos donde el relieve, tanto en su morfología como en sus características morfométricas y espaciales constituyen el tema central. Desde el punto de vista geomorfológico, el área en cuestión se encuentra sobre el Cinturón del Sinú y sobre los sedimentos inconsolidados del Cuaternario. El Cinturón del Sinú cuya formación geológica más antigua es datada como Oligoceno-Mioceno, presenta las altitudes más elevadas en el área mapeada alcanzando 146 m en el Cerro La Popa. Los sectores más bajos del relieve del área son los depósitos cuaternarios inconsolidados, donde las altitudes no pasan los 20 m. A partir de levantamientos cartográficos, interpretaciones de imágenes orbitales, observaciones en campo y de la integración e interpretación obtenidas, se puede concluir que la tectónica cenozoica constituye el factor más importante en la configuración morfológica del área.

Palabras clave: geomorfología; neotectónica; Formación La Popa.

1. Introducción

El mapeo de zonas costeras en Colombia, en especial la franja caribeña, sin duda constituye una prioridad para la cartografía geológica de Colombia, pues dado el alto interés económico, social, y científico de dicha zona, se hace necesario iniciar un desarrollo sostenible apoyado en los

recursos naturales y en la instalación de nuevos proyectos industriales.

Sin embargo, la información geomorfológica ha sido utilizada tangencialmente con diferentes propósitos, en algunos casos únicamente con el objeto de cumplir un requisito de los informes geológicos y de ingeniería. No obstante lo anterior, la necesidad de llevar a cabo planes de ordenamiento territorial y planificación ambiental, así como

How to cite: Furrier, M., Vargas-Cuervo, G. & Moncada, C.C. Caracterización y mapeo geomorfológico de Cartagena de Indias y adyacencias Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 5-14, 2017.



Figura 1. Localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

de conocer la estructura del relieve y no solamente sus formas superficiales, ha permitido vislumbrar el valor que tiene la geomorfología, no solo por la información que proporciona, sino también porque facilita la tarea de definir zonas morfoestructurales homogéneas y su mapeo [1].

El Caribe colombiano, que se encuentra en la convergencia entre las placas del Caribe y de Sudamérica, es un punto clave para entender la evolución geomorfológica de los márgenes continentales activos. Es importante tener en cuenta que las unidades geológicas, a que se refiere este trabajo, están establecidas en el lecho marino en relación con el margen de una provincia con basamento oceánico, y que, debido a la intensa compresión y flexión, surgieron como las conocemos actualmente. Por lo tanto, es imposible comprender la Geomorfología del área sin un conocimiento del génesis geológico y su litología.

Toto y Kellogg (1992) [2] afirman que el Cinturón del Sinú posee una cuña sedimentaria de hasta 12 km de espesor, y que éste es afectado por la convergencia entre las placas Caribe y Sudamericana, siendo que la baja sismicidad se explica por una baja tasa de desplazamiento entre las dos placas, diferente de lo que ocurre en el sector del Pacífico colombiano. Sin embargo, esta tasa de desplazamiento no puede ser desconsiderada en su reflejo en la morfología del relieve del área.

1.2. Área de estudio

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas 1°50.000' N, 1°40.000' S, 85.000' W y 83.600' E, comprendiendo la hoja 23 III D [3], encontrándose en el sector central de la jurisdicción de la ciudad de Cartagena de Indias – Bolívar (Fig. 1).

El casco urbano de la ciudad se encuentra en su interior, ubicado alrededor de la Ciénaga la Virgen, y está rodeado por el Mar Caribe y la Bahía de Cartagena, en la porción externa. El área posee un clima tropical seco con temperatura media de 29°C, con algunas variaciones locales y lluvias anuales de 900 mm. Los vientos más fuertes se presentan de diciembre a abril debido a la influencia de los alisios del norte, con dirección predominante del cuadrante norte [3].

Cartagena de Indias posee una población total de 1.013.454 habitantes, siendo que 971.700 viven en el casco

urbano [4]. Principal ciudad turística de Colombia y Patrimonio Cultural de la Humanidad por UNESCO.

1.3. Breve contextualización geológica y tectónica

La ciudad de Cartagena de Indias y alrededores se encuentra predominantemente ubicada sobre sedimentos cuaternarios, comprendidos por depósitos de llanura costera, y depósitos de playa. Adicionalmente, en la ciudad se encuentran afloramientos de la Formación La Popa que reposa de forma discordante sobre la Formación Bayunca del Plioceno [5] (Fig. 2).

A la Formación Bayunca se le atribuye un origen en una zona entre costa afuera y plataforma continental. Sus características de sedimentación muestran también sedimentos formados en una zona intermareal, afectada por canales con abundante concentración de conchas y en otras partes areniscas rellenas de canales abandonados con contactos erosivos [6]. En detalle de campo se observa también estratificación ondulosa paralela que puede ser completamente borrada por la alta bioturbación.

Suprayaciendo la Formación Bayunca de forma discordante se encuentra la Formación La Popa del Pleistoceno Superior. El término Formación La Popa, se utilizó para describir rocas expuestas en el Cerro La Popa en Cartagena [5]. Para hacer referencia al miembro inferior, se utilizó el término unidad detrítica de La Popa, y al superior, el término calizas arrecifales de La Popa [7].

Para la Formación La Popa se advierte la existencia de ésta conformada por arrecifes formados en una plataforma submarina con una pendiente muy suave y por debajo del nivel de base de las olas, en un área con poco aporte de sedimentos terrígenos, aguas claras y temperaturas entre 21° y 25° C que permiten el desarrollo de arrecifes coralinos [2]. São rocas muy porosas y con densidad muy baja.

Los depósitos de llanura costera (Qlc) forman áreas planas al nordeste del casco urbano de Cartagena y gran parte de sus cursos de agua convergen en la Ciénaga de la Virgen. Dichos depósitos de llanura presentan un régimen de depósito progradante y origina la formación de depósitos orgánicos y clásticos. Los depósitos orgánicos son principalmente los manglares y los depósitos clásticos se consideran las arenas y arcillas depositadas y retrabajadas.

Los depósitos de playas (Qmp) están localizados a lo largo de la línea de costa y constan de arenas de grano fino a grueso, ocasionalmente con gravas; siendo la mayoría de color amarillo ocre a gris. Estos depósitos poseen un alto contenido de carbonato comprobado *in loco* por la reacción con ácido de cloruro. Su área geográfica de mayor exposición es a lo largo de la línea de costa del área de estudio densamente ocupada por una urbanización desprovista de cualquier tipo de planificación u ordenamiento territorial.

En menor proporción se encuentran los depósitos coluvio-aluviales (Qcal) que agrupan la sedimentación fluvial reciente y actual, y la generada por coluviones igualmente recientes, relacionados con arroyos y con los piedemontes. Están constituidos por cantos, bloques, arenas y arcillas, mezclados agradados, y cubren a las unidades rocosas y a los depósitos cuaternarios a sudeste del área.

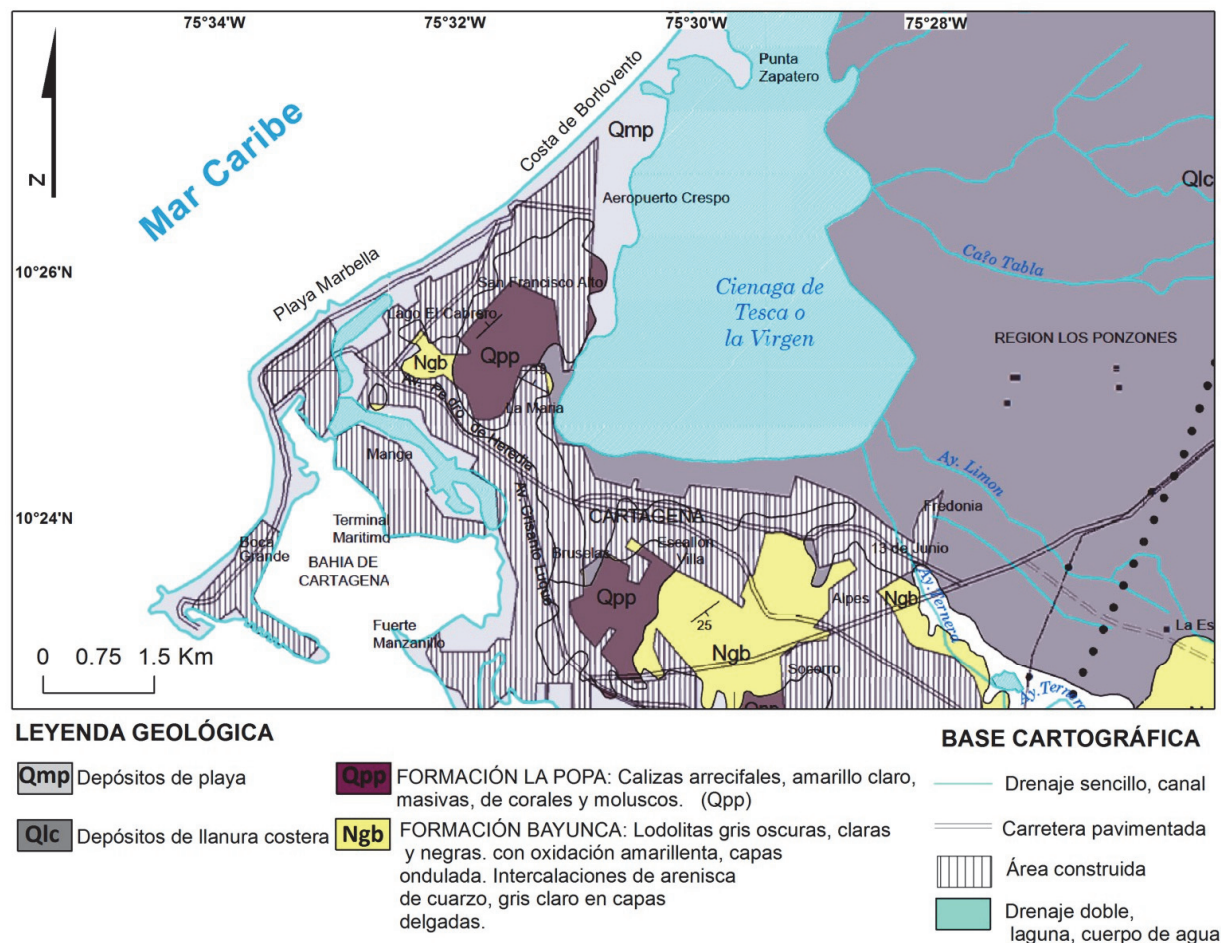


Figura 2. Plancha geológica del área de estudio.
Fuente: adaptado de [8].

En el Cinturón del Sinú, muchas estructuras de deformación presentes son producto del efecto de diapirismo de lodo, lo que genera algunos anticlinales y recientes esfuerzos tectónicos compresivos verificados en campo. Muchas anticlinales en la Formación Bayunca, observadas en campo, corroboran la existencia de una tectónica reciente. También fueron observadas en campo fallas inversas y normales asociadas a la neotectónica.

Las estructuras con deformaciones cenozoicas registradas en la Plancha Geológica de Cartagena [6], debido a la escala de mapeo original 1:100.000, son demasiado genéricas, por tanto, sólo las más significativas e importantes fueron descritas en tal plancha. Estudios pormenorizados a través de trabajos de campo detallados, indican que las estructuras de deformaciones son mucho más amplias y comunes, siendo encontradas en altas cantidades tanto en la Formación Bayunca, así como en la Formación La Popa, con una influencia visible e inconfundible sobre el relieve del área y su desarrollo.

2. Fundamentación teórica y metodológica

Inicialmente fue efectuada una recolección detallada de la bibliografía sobre los temas abordados y sobre el área de estudio, posibilitando la revisión de literatura existente para un mejor desempeño de la investigación. Los temas que fueron abordados en esta investigación fueron: geología, geomorfología y neotectónica. Todos los temas fueron manipulados mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Sin embargo, la literatura encontrada sobre el área es demasiado pobre.

El material cartográfico producido en este trabajo fue elaborado con la ayuda del *software* ArcGis® versión 10.2.1. Todos los productos cartográficos elaborados fueron generados a partir de curvas de nivel extraídas de una imagen *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) con resolución de 30 m, escala 1:100.000 con distancias entre las curvas de nivel de 10 m. El sistema de coordenadas utilizado fue el Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 18 Norte y el datúm Sirgas2000.

Fue generado un Modelo Numérico del Terreno (MNT) con la ayuda del *software* ArcGis® versión 10.2.1 y a partir de éste fueron elaboradas la plancha de inclinación de las pendientes y la plancha geomorfológica, además del perfil topográfico. El análisis de esos productos cartográficos fue de vital importancia para la elaboración de este trabajo, pues permitió observar varias discrepancias topográficas en el relieve y diferentes niveles de inclinación de las pendientes en el área. Estas observaciones refuerzan el control morfoestructural y morfotectónico de la configuración actual del relieve, y adicionalmente proporcionan datos cuantitativos inéditos sobre el área que pueden subsidiar otros trabajos futuros.

Análisis morfométricos y MNT son modelos matemáticos computacionales del relieve que presentan gran aplicación, también, en estudios morfotectónicos y morfoestructurales y pueden ser obtenidos a partir del procesamiento de planchas topográficas, fotografías aéreas y más recientemente datos de radar SRTM [9].

2.1. Elaboración de la plancha de inclinación de las pendientes

La plancha de inclinación de las pendientes proporciona información morfométrica sobre el relieve, siendo ésta la base para identificar y cuantificar pendientes, terrazas y planicies de inundación. En términos generales, el modelo ha demostrado ser muy satisfactorio y útil, sobre todo en zonas donde el relieve es accidentado [10]. La plancha de inclinación de las pendientes demuestra ser objeto de análisis casi obligatorio en trabajos relacionados con la planeación ambiental y territorial además de la investigación de la tectónica reciente [11].

De Biasi (1970) [12] y Christofolletti (2007) [13] afirman que la plancha de inclinación de las pendientes es de gran importancia en trabajos de Ciencias de la Tierra que se dedican al planeamiento de zonas urbanas, agrarias y de suelos, puesto que es una representación gráfica de la inclinación de las pendientes y de zonas homogéneas del terreno. Esto mejora la comprensión y entendimiento de los problemas asociados al espacio analizado.

Por medio de la generación de la matriz regular e irregular a partir de las curvas de nivel, como se explicó anteriormente, se procede a generar la plancha de inclinación de las pendientes. Para su elaboración, se ha seleccionado la extensión *spatial analyst tools* en la pestaña *Surface*, herramienta *slope*. Para este trabajo, con fines analíticos, se ha tomado la siguiente clasificación de pendientes propuesta por la *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* de Brasil (EMBRAPA) [14].

- Llano – superficie de topografía tenue u horizontal, donde los desniveles son muy bajos, con declividades $\leq 3\%$.
- Ligeramente inclinado – superficie de topografía poco ondulada, constituida por un conjunto de colinas y/o bajos cerros (elevaciones de altitudes relativas hasta 50 m y de 50 hasta 100 m, respectivamente), presentando declives poco inclinados variando de $> 3\%$ a $\leq 8\%$.
- Inclinado – superficie de topografía poco ondulada, constituida por conjunto de colinas y/o bajos cerros,

presentando declives moderados, predominantemente variando de $> 8\%$ a $\leq 20\%$.

- Fuertemente inclinado – superficie de topografía ondulada, formada por colinas y/o cerros (elevaciones de 50 a 100 m e de 100 a 200 m de altitudes relativas, respectivamente) con declives fuertes, predominantemente variando de $> 20\%$ a $\leq 45\%$.
- Montañoso – superficie de topografía vigorosa, con predominio de formas accidentadas, usualmente constituidas por cerros, montañas, macizos montañosos y lineamentos montañosos, presentando desniveles variables de $> 45\%$ a $\leq 75\%$.
- Escarpado – áreas con predominio de formas abruptas, comprendiendo superficies muy abruptas y escarpadas, tales como: cuestas, acantilados, pendientes con inclinación muy fuerte, usualmente ultrapasando 75%.

2.2. Perfil topográfico

Según Guerra y Guerra (2006) [15], el perfil topográfico es una representación de la superficie de la corteza terrestre que muestra una sección transversal a lo largo de un camino elegido. Por lo general, sigue siendo la misma escala, pero la escala vertical es exagerada para mejorar la visualización. Cuando se agregan las informaciones geológicas a los perfiles topográficos, el producto final obtiene una mayor importancia porque se pueden comparar, con una buena precisión, las formas del relieve con el basamento rocoso.

Para Fitz (2008) [16], el perfil topográfico muestra de una manera bastante fiable las características del relieve, proporcionando así una mejor comprensión de la superficie trabajada. El mismo autor también menciona que la preparación de los valores de los perfiles topográficos puede ser adquirida de forma manual, sin pérdida de precisión en los resultados. Por lo tanto, se decidió elaborar el perfil automáticamente, a través de los contornos obtenidos de las curvas de nivel generadas a partir de la imagen SRTM, trazando las líneas del perfil mediante la herramienta *Interpolate Line*, que crea un trazo 3D por interpolación de altitud a partir de una superficie funcional seleccionada. Después, con ayuda de la plancha geológica [8] fueron incluidas las informaciones litológicas.

El primer paso fue elegir la línea del perfil de aplicación. Se trazó un segmento que fue elegido en la dirección NW – SE. La elección de esta línea de perfil se basa en la plancha geológica, donde se buscó abarcar las principales formaciones geológicas y geomorfológicas, principalmente el Cerro La Popa, y así, obtener una correlación fidedigna entre la geología, la morfología del relieve y su topografía. Para la elaboración del perfil topográfico fue usado el *software* ArcGis® versión. 10.2.1. Para una visualización más adecuada del perfil, el mismo fue generado con una exageración vertical de 5 veces en relación a su longitud.

2.3. Elaboración de la plancha geomorfológica

Una de las funciones básicas de la geomorfología es mapear el relieve para desentrañar el modelado de su

estructura y a partir de allí, establecer las características que dieron origen a las formas del relieve actual. De esta forma, explicar las características de la superficie terrestre constituye el objeto de estudio de la geomorfología [17].

Teniendo en cuenta lo anterior, la cartografía geomorfológica es una importante herramienta en el estudio del relieve, pues en el mapa geomorfológico se traducen y sintetizan varias metodologías y los resultados de las respectivas investigaciones [18]. El mapa geomorfológico no puede solo describir las formas del relieve sin incluir, o subestimar, el basamento rocoso que sostiene las formas del relieve.

Penck (1953) [19] identificó que las actuales formas del relieve terrestre son resultados de dos fuerzas opuestas que actúan simultáneamente en todo el proceso de formación, estas fuerzas son denominadas endógenas y exógenas. Las primeras son originadas en la dinámica interior de la Tierra, mientras que las segundas comprenden los fenómenos atmosféricos como lluvias, vientos, variaciones en la temperatura y la acción química y física del agua, que, sumados a los agentes biológicos y antrópicos, dan como resultado formas del relieve.

Siguiendo los conceptos de Penck (1953) [19], Mescerjakov (1968) [20] estableció una clasificación del relieve terrestre en tres categorías genéticas principales necesarias en el análisis geomorfológico y su comprensión. Estas categorías se denominan geotextura, morfoestructura y morfoescultura.

Ross (1992) [21], basado en los conceptos metodológicos de Penck (1953) [19] y Mescerjakov (1968) [20], citados anteriormente, tomó como parámetros de clasificación la forma y alcance de cada unidad taxonómica. De esta forma el autor estableció seis niveles taxonómicos, siendo estos: morfoestructura, morfoescultura, patrón de forma del relieve, tipo de forma del relieve, tipos de vertientes y formas de procesos naturales actuales y antrópicos.

El primer taxón corresponde a la definición de morfoestructura presentada anteriormente, al igual que el segundo taxón referido representa la definición de morfoescultura. El tercer taxón está dado por las unidades de los patrones de formas semejantes de relieve o patrones de tipos de relieve. En éste taxón es donde los procesos morfoclimáticos actuales comienzan a ser bien percibidos. Esas unidades menores presentan diferencias entre sí, como la rugosidad topográfica o índice de disección del relieve. Los patrones de relieve pueden ser formas de acumulación, como planicies fluviales, marinas o intermareales (manglares), o denudacionales como colinas, cerros, mesetas, entre otros [18].

Esas unidades son representadas en el mapa geomorfológico por medio de un conjunto de letras mayúsculas y minúsculas. Las letras mayúsculas indican que los patrones se formaron por denudación (letra D) o por acumulación (letra A) y las minúsculas representan las formas generadas, como por ejemplo Dm (Denudación en forma de mesetas) o Apf (Acumulación en formas de planicie fluvial.) (Cuadro 1).

Cuadro 1.

Patrones de formas de relieve.

Formas de Denudación	Formas de Acumulación
D – DENUDACIÓN	A – ACUMULACIÓN
Da – Formas con ápices aguzados	Apf – Formas de planicie fluvial
Dc – Formas con ápices convexos	Apm – Formas de planicie marina
Dm – Formas en mesetas	Apl – Formas de planicie lacustre
De – Formas de escarpes	Api – Formas de planicie intermareal
Dv – Formas de vertientes	Ad – Formas de campos de dunas
	Atf – Formas de terraza fluvial
	Atm – Formas de terraza marina

Fuente: Adaptado de [21].

Los patrones de forma del relieve están acompañados de un conjunto de algoritmos arábcos de acuerdo con una matriz previamente elaborada, cuyas columnas indican tanto el grado de incisión de los valles y las líneas, como la dimensión interfluvial media (Cuadro 2). Las formas agradacionales no reciben los algoritmos arábcos pues no representan disección por procesos erosivos.

De manera general esos patrones se caracterizan por diferentes intensidades de disección de relieve por influencia de los cursos de agua temporales y permanentes [21]. Para calcular el índice de disección del relieve se debe considerar la incisión media de los valles y la dimensión interfluvial media. (Cuadro 2). Ross (1992) [21], resalta que el menor valor numérico de la disección más débil será 11 y el mayor valor numérico de la disección más fuerte será 55.

El cuarto taxón en orden decreciente se caracteriza por los tipos de formas de relieve individuales dentro de cada patrón de formas del relieve. Pueden ser tanto las de denudación, resultantes por desgaste por procesos erosivos (colinas, cerros y crestas), como las de gradación (planicies lacustres, fluviales y marinas). Los tipos de forma de relieve presentan semejanzas entre sí, tanto en su morfología como en su morfometría, es decir, en la forma y tamaño.

La representación cartográfica del cuarto taxón (tipos de forma del relieve) se hace en conjunto con la representación del tercer taxón (patrones de formas del relieve). Así, por ejemplo, un patrón de formas del relieve tipo Dc 23 es constituido por relieve denudacional de ápices convexos con incisión débil de 20 a 40 m y dimensión interfluvial media de 300 m a 700 m.

Para ser calculadas las incisiones fluviales es imprescindible considerar la estructura geológica/geomorfológica regional y la jerarquización de la red de drenaje. Para las zonas de cordillera y cinturones plegados como el Cinturón de San Jacinto, las incisiones fluviales que dan la dimensión real del relieve regional, son medidas en ríos de 4^{to} o mayor orden fluvial. En el caso de las bajas mesetas, los ríos de 3^{er} orden son incisiones fluviales que pueden ser suficientes para la jerarquización y caracterización de los patrones de las formas del relieve.

Cuadro 2.

Matriz de los índices de disección del relieve.

DIMENSIÓN INTERFLUVIAL MEDIA (clases)	MUY GRAND E (1) >1.500 m	GRAND E (2) 1.500 a 700 m	MEDI A (3) 700 m a 300 m	PEQUEÑ A (4) 300 a 100 m	MUY PEQUEÑ A (5) < 100 m
INCISIÓN MEDIA DE LOS VALLES (clases)					
MUY DÉBIL (1) < 20 m	11	12	13	14	15
DÉBIL (2) 20 a 40 m	21	22	23	24	25
MEDIA (3) 40 a 80 m	31	32	33	34	35
FUERTE (4) 80 a 160 m	41	42	43	44	45
MUY FUERTE (5) >160 m	51	52	53	54	55

Fuente: [21]

El quinto taxón, que corresponde a los tipos de pendientes, es formado por las pendientes o sectores de las pendientes que componen los tipos de formas del relieve individualizados. Una pendiente o un mismo sector de pendiente son individualizados por las características geométricas, genéticas y dinámicas.

Debido a las dimensiones o aspectos de sus propios sectores, el quinto taxón solo puede ser representado cartográficamente en grandes escalas mayores o iguales a 1:25.000. Tipos de formas del relieve individuales son representados por letras símbolo, como Ve (vertiente escarpada), Vc (vertiente convexa), Vcc (vertiente cóncava), Vr (vertiente rectilínea), Ac (ápices convexos), Ap (ápices planos), entre otros. Debido a la escala de este trabajo, el quinto taxón se analizará a través del perfil topográfico elaborado.

El sexto taxón, representa las menores formas mapeables. Son formas producidas por los procesos erosivos o deposicionales actuales. Como ejemplo de éste taxón pueden ser citadas formas causadas por agentes naturales, tales como hondonadas, cárcavas, surcos, cicatrices de deslizamientos, bancos de sedimentación actuales y las formas antrópicas como: cortes, nivelación por acción antrópica y canteras entre otros.

La representación cartográfica del sexto taxón tiene los mismos problemas que presenta el quinto taxón, es decir, sólo puede ser representada en escalas grandes, por tanto, la fotografía aérea e imágenes satelitales de alta resolución son herramientas indispensables. Su representación cartográfica, en los casos en que es posible, se hace por símbolos estandarizados.

Demek (1967) [22], es consciente de la importancia de la cartografía geomorfológica y consecuentemente destaca la importancia del color en un mapa geomorfológico, teniendo en cuenta que para cada color, hay dos posibilidades de expresión, a saber: el propio color y sus diferentes matices. El autor también aborda el problema de la escala en la que se representa el mapa geomorfológico. Por lo tanto,

dependiendo de la escala adoptada, es necesario generalizar la cartografía. En la representación cartográfica, cada unidad morfoestructural se indica mediante una familia de colores, como el verde o el rojo, por ejemplo. Cada variación del tono de estos colores indica una unidad morfoestructural.

La plancha geomorfológica del área de estudio fue elaborada con base en la metodología propuesta por Ross (1992) [21], que es una evolución metodológica desarrollada en el proyecto RADAMBRASIL, con adaptaciones hechas por Furrier (2007) [18] para mapeo en áreas exclusivamente sedimentarias con predominio de mesetas bajas. Su elaboración tuvo como base cartográfica y litológica la plancha geológica Cartagena [8], y la plancha de inclinación de las pendientes.

Para delimitar el primer taxón, correspondiente a las morfoestructuras, fueron consideradas las informaciones geológicas presentadas por IGEO MINAS (2001) [6]. En este sentido fueron establecidas 4 morfoestructuras: el Cinturón del Sinú, los depósitos coluvioaluviales, los depósitos de llanura costera y los depósitos de playa. Los depósitos de llanura costera (Qlc) y los depósitos coluvioaluviales (Qcal) fueron cartografiados. Los depósitos de playas (Qmp) fueron considerados una morfoestructura distinta por ser su génesis y composición completamente diferentes de los otros depósitos sedimentarios consolidados descritos anteriormente y, también, por su importancia ya que existen procesos erosivos intensos en el área de estudio.

Debido a la gran aplicabilidad de la metodología expuesta, la misma está siendo ampliamente utilizada en otros trabajos, incluyendo el mapeo geomorfológico del Estado de São Paulo [23] y del Estado de Paraná [24], dos importantes estados de Brasil. Esta metodología de mapeo geomorfológico está siendo difundida en diversas regiones de Brasil, y utilizada en varios artículos científicos, pues proporciona las herramientas para comprender fácilmente el mapa final que posee una amplia gama de información registrada en su leyenda integrada. Adicionalmente, cabe resaltar que el mapa final no solo demuestra la morfología sino que también es un producto morfométrico. Lo anterior hace que esta metodología sea adecuada para el desarrollo de la cartografía propuesta para el presente trabajo, pues el desarrollo del mismo permite comprobar la aplicabilidad tal metodología en un área adyacente a un Margen Continental Activo.

3. Resultados y Discusiones

En la presente sección serán presentados inicialmente los resultados referentes al material cartográfico producido. Los productos cartográficos elaborados y analizados son la plancha de inclinación de las pendientes y la plancha geomorfológica, además del perfil topográfico elaborado con la litología correspondiente. Estos productos fueron analizados de manera cualitativa y cuantitativa siempre relacionando la morfoestructura y la tectónica del área, debido a que son el marco que sustenta las formas del relieve que se encuentran en constante cambio por las fuerzas exógenas.

3.1. Plancha de inclinación de las pendientes

Con relación a la inclinación de las pendientes, el área de alcance de la hoja 23 III D presenta una topografía relativamente plana, con predominio de valores de inclinación de las pendientes de $< 3\%$, como se puede observar en la plancha de inclinación de las pendientes (Fig. 3). En general, esa clase de pendiente abarca el 62,99% del área de estudio.

Las pendientes $< 3\%$ son verificadas en los depósitos sedimentarios cuaternarios, pues los mismos son productos de la deposición actual y continúa, debido a que esas áreas están constantemente sometidas a inundaciones por sus bajas altitudes y por la dinámica marina actual, en las Terrazas y Planicies Marinas. Grande parte del casco urbano de Cartagena está situado sobre las Terrazas y Planicies Marinas y sobre las Terrazas y Planicies Costeras. Las primeras bajo la influencia actual del mar y las segundas bajo la influencia actual de inundaciones por lluvias. Sus delimitaciones geográficas son, actualmente, imposibles de hacer, debido a la intensa urbanización del área. Por lo tanto, la delimitación de estas dos unidades geomorfológicas fue basada, exclusivamente, en la plancha geológica de Cartagena [8].

Las pendientes más elevadas fueron verificadas en el sector oeste del área de estudio, principalmente en las pendientes del Cerro La Popa, en su porción sureste, donde

se observa, también, grandes movimientos de ladera y ocupación humana en el sopé de la pendiente (Fig. 4).

El Cerro de La Popa, en su sector noroeste, presenta una amplia pendiente con declividad menos elevada, pero es nítido que es una pendiente ampliamente fallada, formando escalones muy bien visibles (Fig. 5).

En campo, se puede determinar una relación sobresaliente entre una pendiente con una elevada inclinación y un salto de falla en la Formación La Popa, corroborando así que la relación, pendiente *versus* tectónica reciente, puede ser probada en el área y, por tanto, no se puede desconsiderar esto en estudios geomorfológicos. Otra relación determinada en campo es la relación movimiento de ladera *versus* pendiente elevada, que también apunta a indicar que los movimientos de ladera recientes son más comunes en pendientes con alta declividad, pero también acentúan aún más el grado de inclinación de la propia pendiente.

3.2. Caracterización geomorfológica

Con base en la construcción y análisis de la plancha geomorfológica (Fig. 6), fueron individualizadas cuatro morfoestructuras para el área de estudio. Las morfoestructuras identificadas son: Cinturón del Sinú, depósitos de llanura costera, depósitos coluvioaluviales y depósitos de playa. Las morfoestructuras fueron subdivididas en cuatro morfoesculturas

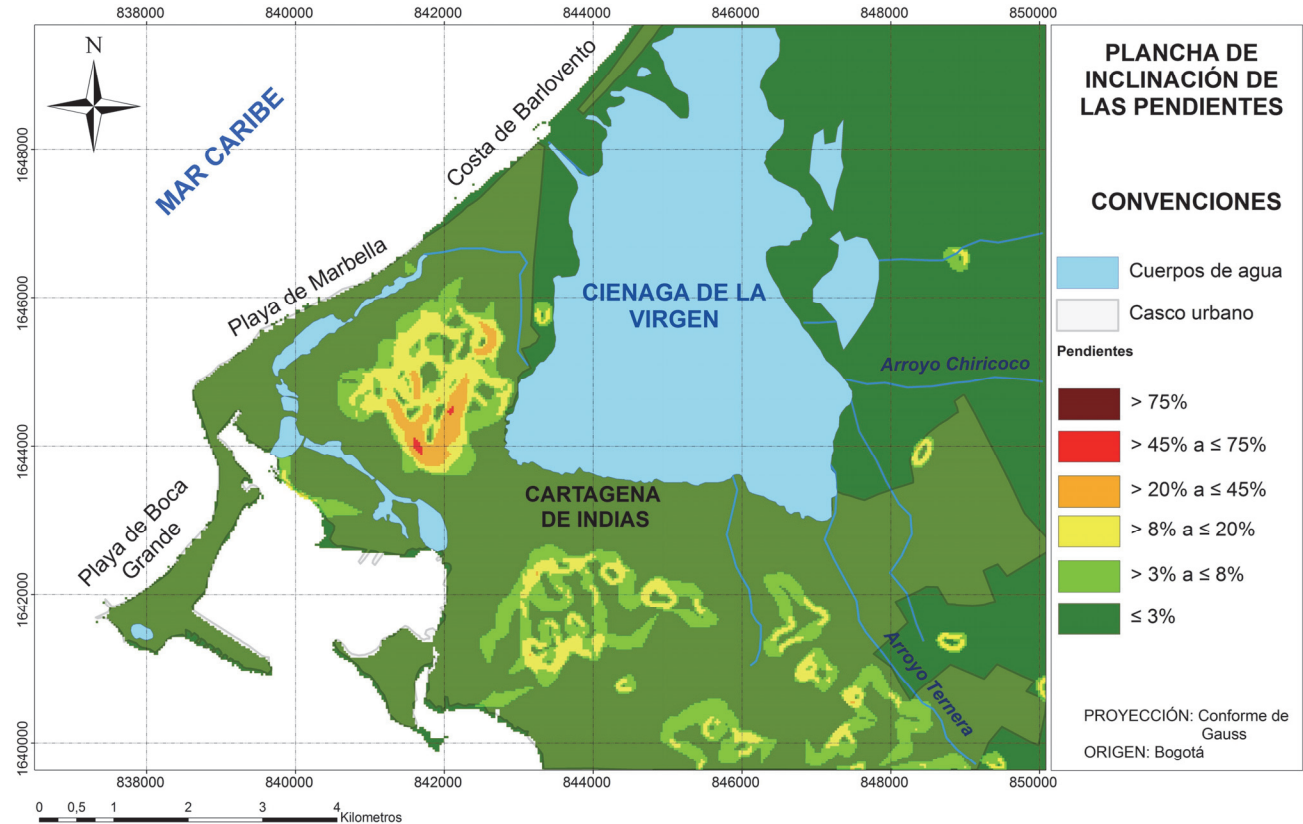


Figura 3. Plancha de Inclinación de las Pendientes
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Cerro La Popa con su pendiente con la mayor declividad. Observar movimientos de ladera.

Fuente: Elaboración propia



Figura 5. Cerro La Popa con su pendiente noroeste. Observar un escalón debido a una falla normal.

Fuente: Elaboración propia

que se constituyen en una jerarquía menor. Las morfoesculturas identificadas son: Cerros Testimonios del Sinú, Terrazas y Planicies Coluvioaluviales, Terrazas y Planicies Costeras y Terrazas y Planicies Marinas. Por cuestión de escala de trabajo, es imposible delimitar correctamente una planicie de una terraza. Así, en este mapeo las dos morfologías fueron juntadas.

La mayor variedad de patrones de forma de relieve fue verificada en la morfoescultura Cerros Testimonios del Sinú. En esta morfoescultura fueron encontradas tanto formas con ápices convexos como formas en mesetas de entalle medio de los valles y dimensión interfluvial media de diversos tamaños. La morfología más pronunciada y de ápices convexos (Da 42), es el caso del Cerro La Popa, en el casco urbano de Cartagena. Esta gran variedad de patrones de forma de relieve encontrado en esta morfoestructura está relacionada con las diferentes litologías (Formación Bayunca y La Popa) presentes y con el factor tectónico, ya que no hay manera de explicar tal variación en las formas del relieve por el factor climático exclusivamente, pues el área posee una dimensión geográfica pequeña donde no hay una variación climática notable que tenga la capacidad de esculpir formas distintas en las mismas litologías (Fig. 6).

Estas variaciones morfológicas encontradas en la Formación La Popa no se pueden explicar sin una influencia tectónica

notable y reciente. Además de la morfología anormal, estructuras geológicas tales como fallas y fracturas fueron ampliamente verificadas *in loco* en esta formación, lo que reafirma la fuerte influencia tectónica en el desarrollo de estos relieves.

El relieve agradacional formado por las Terrazas y Planicies Costeras presenta un área baja con altitudes máximas de 20 metros en su extremo oriente y altitudes mínimas de 5 m en las proximidades con la Ciénaga de la Virgen. Esta variación altimétrica puede ser considerada elevada, pues se trata de un área agradacional cuaternaria, de pequeña longitud y con inclinación en dirección E – O. La falta de estudios geológicos más detallados impide una descripción geomorfológica más precisa.

Las Terrazas y Planicies Costeras localizadas en el área de estudio están densamente pobladas en todo el casco urbano de Cartagena y en las áreas adyacentes, ocupación que se expande hacia el norte, siguiendo la autopista Cartagena – Barranquilla. Lo anterior dificulta sobre manera la correcta delimitación de la morfología delimitada como las Terrazas y Planicies Costeras. Hay en casi toda la franja costera del casco urbano de Cartagena obras de ingeniería costera para minimizar o impedir la erosión de las playas. No siendo la geomorfología costera el foco central de este trabajo, para una correcta interpretación de esos procesos de erosión costera sería necesario un análisis más preciso sobre el tema, sin embargo una caracterización actual fue hecha.

Sin embargo, es de conocimiento general que gran parte de la erosión costera en el mundo es debido al déficit sedimentario, y no por una elevación del nivel marino como ha sido incorrectamente difundido. En el área de estudio, es notable que los sedimentos son atrapados por las más diversas obras de ingeniería, principalmente el Guía Corriente construido para extravasar las aguas de la Ciénaga de la Virgen. Al norte de esta área no se verifica ninguna erosión costera, no obstante lo cual al sur, se construyeron varias obras para minimizar o impedir la fuerte erosión (Fig. 7).

Como los vientos son predominantemente del cuadrante norte (10°), la deriva de corriente costera en el área posee dirección NE – SW debido la morfología del litoral. Esta también es por tanto la dirección de los sedimentos de playa carreados por la deriva de corriente costera. Es notable, una fuerte erosión costera en toda orla de Cartagena, después del Guía Corriente en dirección a SW, ocasionando serios procesos erosivos en las playas de Marbella y Boca Grande.

Desde del Guía Corriente, hasta el final de la Playa de Boca Grande se observó 8,9 km de playas con obras de ingeniería para mitigar o impedir la acentuada erosión costera. Los principales tipos de estructuras de ingeniería son los quiebra mares (estructuras paralelas a la línea de costa) y los muelles (estructuras perpendiculares a la línea de costa).

Estas estructuras son todas constituidas por bloques de la Formación La Popa, por lo tanto, no son las más adecuadas debido a la densidad de las rocas calizas, su porosidad e inestabilidad química. Para este tipo de obra costera, la literatura apunta para rocas ígneas o metamórficas de densidades elevadas y masivas.

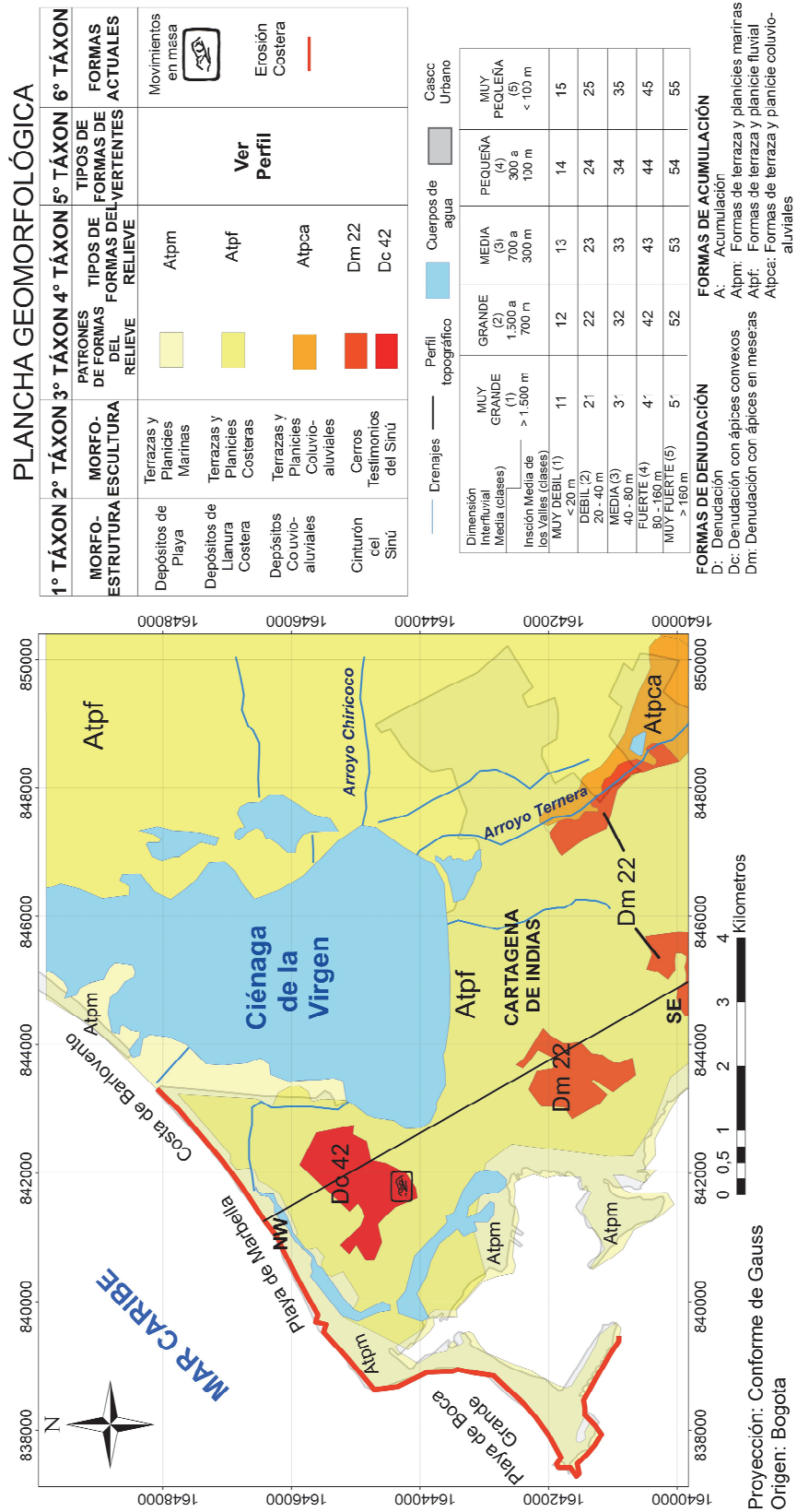


Figura 6. Plancha geomorfológica
Fuente: Elaboración propia



Figura 7. Canal de salida de agua de la Ciénaga de la Virgen con un Guía Corriente en la desembocadura atrapando los sedimentos.
Fuente: Adaptado de ArcGis Mape Base 2015.

3.2.1. Perfil topográfico

Conforme explicado en el ítem – fundamentación teórica metodológica – se decidió describir el 5° taxón en un perfil topográfico con la litología correspondiente que representase una gama importante de morfologías en el área y así no llenar la plancha geomorfológica con más datos que podrían afectar la asimilación del lector.

En el perfil topográfico con la respectiva litología, se muestra con total claridad la influencia tectónica tanto sobre la geomorfología del área como sobre las formas del relieve y sus respectivas pendientes (Fig. 8).

En el Cerro La Popa, principal morfología del área, muestra en su sector noroeste, que la pendiente es mucho más amplia, con presencia de fallas, escalonamientos e inclinaciones más bajas, no ultrapasando 20%. En su sector SE, la pendiente es mucho más escarpada, casi rectilínea y con presencia de movimientos de ladera. La inclinación de este sector es mucho más grande, con declividades entre 45 y 75% y también se encuentran fallas y fracturas en la Formación La Popa.

Siguiendo hacia Sureste, se encuentra una terraza densamente urbanizada hasta llegar a mesetas bajas sostenidas por la Formación La Popa. Continuando en dirección a Sureste, se encuentra una terraza sobre la Formación Bayunca y después una colina de baja altitud sostenida por la Formación La Popa.

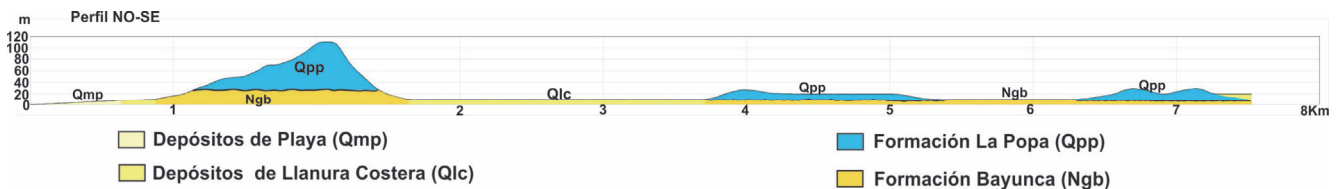


Figura 8. Perfil topográfico NO – SE
Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

La propuesta principal de este trabajo, que es la de una caracterización y mapeo geomorfológico, implicó un exhaustivo levantamiento bibliográfico y cartográfico de investigaciones previas realizadas en el área de estudio, además de un extenso trabajo de campo. Al mismo tiempo, se percibió que, dado el carácter pretérito disponible, en este momento, una caracterización geomorfológica de detalle es una tarea imposible. La integración de los datos obtenidos, levantados, producidos, analizados y discutidos resultó en una visión amplia e inédita del área objeto de estudio, siendo posible visualizar como la geología y la tectónica se integran con la geomorfología.

Para dar inicio a una caracterización geomorfológica fue imprescindible un sólido levantamiento geológico, tectónico y estructural del área, que implicó la consulta de fuentes bibliográficas producidas hace más de 40 años así como las publicadas más recientemente. Dicha investigación bibliográfica mostró la evolución de las ideas acerca de la geología del área objeto de estudio, no obstante lo cual, proporcionó pocos datos sobre la geomorfología, principalmente en escala de detalle.

La caracterización geomorfológica fue enfáticamente basada en los aspectos estructurales y tectónicos, siendo numerosas las evidencias encontradas, presentadas y discutidas con la mayor claridad posible. En todos los casos se llamó la atención sobre hecho de que, por más claras y obvias que fuesen tales evidencias, continúa siendo necesario contar con trabajos geomorfológicos detallados, que hasta el momento no se han realizado en el área objeto de estudio.

Aunque para la evolución del relieve el factor climático se ha colocado en segundo lugar, el mismo no puede ser desatendido. En efecto, dicho factor posee su parte de la responsabilidad en la esculturación y evolución del relieve, pues, particularmente en el área objeto de estudio, actúa fuertemente en los procesos de movimiento de ladera y de la corriente de deriva costera que influencia fuertemente la erosión verificada en las playas de Marbella y Boca Grande.

Para estudios integrados del paisaje los datos sobre la geomorfología son indispensables. El análisis del relieve permite sintetizar la historia de las interacciones dinámicas que ocurren entre el sustrato litológico, la tectónica y las variaciones climáticas. Los datos geomorfológicos permiten interpretar un problema indispensable para la planificación ambiental: la relación entre las configuraciones superficiales del terreno y la distribución de los núcleos o aglomeraciones humanas, es decir, la ocupación de suelos en función de las limitaciones impuestas por el relieve.

En virtud de esos conjuntos de características, es muy común que el relieve sea punto de referencia para los estudios de planificación ambiental y determinante de los espacios administrables. Es necesario enfatizar que los datos geomorfológicos son la base para la elaboración de diagnósticos ambientales cuyo resultado es de suma importancia para alternativas de minimización de riesgos ambientales. En resumen, las informaciones sobre el relieve siempre sumadas a los datos geológicos, permiten una evaluación más precisa del terreno, con sus relaciones de fragilidades y potencialidades naturales, así como las consecuencias de la intervención humana. Por lo tanto, es importante llevar a cabo investigaciones geomorfológicas en Colombia que permitan una integración más amplia y consolidada del basamento rocoso con la tectónica.

Referencias

- [1] Carvajal, J.H., Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS, 2012.
- [2] Toto, E.A. and Kellogg, J.N., Structure of the Sinú–San Jacinto fold belt – An active accretionary prism in norther Colombia. *Journal of South American Earth Science*, 5(2), pp. 211-222, 1992.
- [3] IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Hoja N.23 III D. Bogotá: IGAC, 1 hoja, B/N. 90 cm x 70 cm. Escala 1:25.000. 1996.
- [4] DANE, Departamento Administrativo Nacional Estadística. Resultados y proyecciones (2005–2020) del censo de 2005 [consulta, 1-8 de octubre de 2015]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20
- [5] INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del valle inferior del Magdalena – Caribe Colombiano, escala: 1:300.000. Bogotá: INGEOMINAS, 2004.
- [6] INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Geología de las planchas 23, Cartagena y 29 – 30 Arjona. Bogotá: INGEOMINAS, 2001.
- [7] Angel, C., Esquivel, J. y Sarmiento, G., Geología del Departamento de Bolívar al norte del Canal del Dique. Bogotá: INGEOMINAS, (Informe, 1941), 1985.
- [8] INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Geología de la plancha 23 Cartagena. Bogotá: INGEOMINAS, plancha color., 90 cm x 70 cm. Escala: 1.100.000, 2003.
- [9] Hartwing, M.E. y Riccomini, C., Análise morfotectônica da região da Serra dos Orgãos, sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 11(1), pp. 11-20, 2010. DOI: 10.20502/rbg.v11i1.137
- [10] Carvalho, T.M. e Latrubesse, E.M., Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: O caso da bacia hidrográfica do Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 5(1), pp. 85-93, 2004. DOI: 10.20502/rbg.v5i1
- [11] Barbosa, M.E.F. e Furrier, M., Caracterização geomorfológica e morfométrica para averiguação de atividade tectônica. *Revista Mercator*, 14(3), pp. 123-149, 2015. DOI: 10.4215/RM2015.1403.0008
- [12] De Biasi, M., Carta de declividade de vertentes: confecção e utilização. *Geomorfologia*. São Paulo, 21, pp. 8-13, 1970.
- [13] Christofoletti, A., Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B (Org.). *Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos*. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007, pp. 415-437.
- [14] EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006.
- [15] Guerra, A.T. e Guerra, A.J.T., *Novo dicionário geológico-geomorfológico*. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- [16] Fitz, P. R. *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo: Oficina de Textos. 2008.
- [17] Marquez, J.S., *Ciência geomorfológica*. In: Guerra, A.J.T., Cunha, S.B., (Org.). *Geomorfologia: Uma atualização de bases conceitos*. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. pp. 23-50.
- [18] Furrier, M., *Caracterização geomorfológica e do meio físico da folha João Pessoa 1:100.000*. Tese Dr. em Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2007, 213 P.
- [19] Penck, W., *Morphological analysis of landforms*. London: Macmillan and Co, 1953.
- [20] Mescerjakov, J.P., Les concept de morphostruture et de morphosculture: un nouveau instrument de l'analyse geomorphologique. *Annales de Geographie*, Paris, 77 années, N. 423, pp. 539-532, 1968.
- [21] Ross, J.L.S., O registro dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia da FFLCH/USP*, São Paulo, 6(1), pp. 17-29, 1992.
- [22] Demek, J., Generalization of geomorphological maps. *Progress maden geomorphological Mapping*. Brno, pp. 36-72, 1967.
- [23] Ross, J.L.S. e Moroz, I.C., *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: FFLCH-USP/IPT/FAPESP, 1997.
- [24] MINEROPAR. Serviço Geológico do Paraná. *Mapa geomorfológico do Estado do Paraná*. Paraná: MINEROPAR, 2006. 1 mapa, color. Escala 1:650.000

M. Furrier, es Geógrafo de la Universidade de São Paulo, MSc. y Dr. en Geografia Física. Es profesor asociado de la Universidade Federal da Paraíba donde suministra clases de Geomorfología y Geología General para las carreras de Geografia e Ingeniería Ambiental. Es profesor es investigador en el Programa de Posgrado en Geografia con investigaciones en Geomorfologia Estructural, Ambiental y Urbana. Fue pasante posdoctoral en el Departamento de Geografia de la Universidad Nacional, sede Bogotá. ORCID: 0000-0001-8882-5290

G. Vargas-Cuervo, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, DESS en Teledetección y Dr. en Ciencias de la Tierra de la Universidad Pierre et Marie Curie, Paris VI. Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografia, sede Bogotá. ORCID: 0000-0003-2489-39

C. C. Moncada, es Ing. Geógrafo y Ambiental de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. ORCID: 0000-0002-6082-4875