



Vulnerabilidad costera ante el ascenso del nivel del mar en el suroccidente del Caribe colombiano

Coastal vulnerability to sea level rise in the southwestern Colombian Caribbean

Luz Marleny García Echavarría^{1*}, Javier Alcántara-Carrió² y Alfredo Jaramillo Vélez¹

0000-0003-2469-8469

0000-0002-9840-4980

0000-0002-4901-0416

1. Grupo de Investigación en Sistemas Marinos y Costeros (GISMAC), Corporación Académica Ambiental, Universidad de Antioquia, Calle 70 No, 52-21 Medellín, Antioquia, Colombia. marleny.garcia@udea.edu.co*, alfredo.jaramillov@udea.edu.co

2. Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, España. javier.alcantara@uam.es

* Autor de correspondencia / Corresponding author:

RESUMEN

Una de las preocupaciones sobre cambio climático es el ascenso del nivel del mar, el cual se encuentra asociado a un incremento de la erosión costera, intrusión salina en estuarios y riesgo de inundación. Estas alteraciones hacen necesaria evaluar la susceptibilidad costera y su capacidad de adaptación ante este fenómeno. El Índice de Vulnerabilidad Costera integrado por las variables geomorfología, pendiente, tasa de cambio de línea de costa, altura del oleaje significativa, tasa de cambio del nivel relativo del mar y rango mareal medio, busca estimar localmente la vulnerabilidad. El presente trabajo se enfocó en determinar la vulnerabilidad en la línea costera de los sectores Volcán de Lodo, río Hobo, Zapata y punta Las Vacas, mediante el uso de fotografías aéreas, imágenes satelitales, datos *in situ* e información gubernamental, con el fin de precisar aquellos espacios en los cuales se debe concentrar una gestión eficaz para una futura adaptación. La aplicación del Índice de Vulnerabilidad Costera integrado (IVC) muestra que más de un tercio del litoral estudiado se encuentra en situación de muy alta vulnerabilidad, destacando la combinación de alta tasas de erosión (entre 2 y 9,8 m/año) con ascensos del nivel del mar que alcanzan 3 mm/año, poniendo en evidencia la necesidad urgente de priorizar y proteger los sitios Volcán de Lodo y río Hobo. Los resultados de vulnerabilidad generados ante el aumento del nivel del mar no evalúan la magnitud, ni la probabilidad de ocurrencia del mismo, ni intentan cuantificar daños o costos. Por tanto, se sugiere continuar con estudios más detallados en aquellos puntos que se consideren prioritarios para realizar el análisis de amenazas y cálculo de riesgo.

PALABRAS CLAVE: susceptibilidad, cambio climático, ascenso del nivel del mar, erosión costera.

ABSTRACT

One of the concerns about climate change is the rise in sea level, which is associated with an increase in coastal erosion, saline intrusion in estuaries and the risk of flooding. These changes make it necessary to evaluate the coastal susceptibility and its adaptation capacity facing with this phenomenon. The Coastal Vulnerability Index made up of the variables geomorphology, slope, rate of change of coastline, significant wave height, rate of change of relative sea level and mean tidal range, seeks to locally estimate vulnerability. This work focused on determining the Vulnerability in the coastline of the sectors Volcán de Lodo, Río Hobo, Zapata and Punta Las Vacas through the use of aerial photographs, satellite images, *in situ* data and government information, in order to specify those spaces in which effective management efforts must be concentrated for future adaptation. The application of the Integrated Coastal Vulnerability Index (IVC) shows that more than a third of the coastline studied is in a situation of very high vulnerability, highlighting the combination of high erosion rates (between 2 and 9.8 m/year) with sea level increases that reach 3 mm/year, highlighting the urgent need to prioritize and protect the Volcán de Lodo and Río Hobo sites. The vulnerability results generated by sea level rise do not assess the magnitude or the probability of its occurrence, nor do they attempt to quantify damages or costs. Therefore, it is suggested to continue with more detailed studies in those areas that are considered a priority to carry out the threat analysis and risk calculation.

KEYWORDS: susceptibility, climate change, sea level rise, coastal erosion.

DOI: <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2022.51.2.1124>

Publicado por Invemar

Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia CC Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual

Published by Invemar

This is an open Access article under the CC BY-NC-SA

INTRODUCCIÓN

A nivel global el nivel medio del mar está aumentando, la suma de las contribuciones de los glaciares y las capas de hielo es ahora la fuente dominante de aumento (IPCC, 2019). Se pronostica que el aumento del nivel del mar será de aproximadamente 65 cm para 2100 (Nerem *et al.*, 2018). El quinto informe de evaluación del IPCC considera un escenario de emisiones muy altas y predice un aumento global entre 52 y 98 cm para fines de este siglo. Se espera que este aumento continúe por siglos, incluso si la emisión de los gases efecto invernadero son reducidos y las concentraciones atmosféricas estabilizadas (IPCC, 2014).

Actualmente se observan impactos severos en las regiones costeras debido al aumento del nivel del mar. Las consecuencias más drásticas del aumento del nivel del mar son la erosión, cuyo resultado es la inundación permanente de las áreas costeras, la disminución de la calidad del agua, la disminución del cultivo de peces, la intrusión de agua de mar en los recursos de agua dulce, la inundación de humedales y estuarios y la disminución de la calidad del agua (Koroglu *et al.*, 2019). Entre los impactos esperados en los ecosistemas costeros a causa de este aumento del nivel del mar se incluyen la contracción del hábitat, la pérdida de funcionalidad, biodiversidad y migración lateral e interior (IPCC, 2019). Las zonas costeras, que en su gran mayoría son bajas y están densamente pobladas, estarían sujetas a una erosión acelerada, además de la intrusión de agua salada en acuíferos costeros subterráneos, inundación de humedales y estuarios, amenazando recursos históricos, culturales e infraestructuras (Pendleton *et al.*, 2004).

Las condiciones de erosión a lo largo de la mayor parte del litoral antioqueño y su alta vulnerabilidad debido a factores como el ascenso del nivel del mar han sido documentadas ampliamente en artículos y comunicados de prensa. Publicaciones de Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia y numerosos estudios académicos (Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia, 1998; Invemar, 2003; Correa y Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2005; Posada y Henao, 2008; Prussmann, 2011; Paniagua, 2013; Rangel y Anfuso, 2015; Correa y Paniagua, 2016).

La presencia en el suroccidente del Caribe colombiano de niveles de terrazas marinas emergidas e inclinadas son evidencia de fuertes deformaciones tectónicas, que conllevan a levantamientos diferenciales de terrenos que muy probablemente promueven la erosión litoral. Los cambios en los niveles tierra-mar asociados al ascenso eustático del

INTRODUCTION

The global average sea level is rising. The sum of the glaciers and ice layers' contributions is now the predominant source of the increase (IPCC, 2019). It is predicted that the rise in the sea level will be around 65 cm by 2100 (Nerem *et al.*, 2018). The fifth assessment report of the IPCC considers a very high-emissions scenario and predicts a global rise between 52 and 98 cm for the end of this century. This increase is expected to continue for centuries, even if greenhouse gas emissions are reduced and the atmospheric concentrations are stabilized (IPCC, 2014).

Severe impacts are currently being observed in coastal regions, which is due to the sea level rise. The most drastic consequences of this phenomenon are erosion, which results in the permanent flooding of coastal areas; a decrease in the quality of water; a decrease in fish farming; the intrusion of seawater in freshwater resources; and the flooding of wetlands and estuaries (Koroglu *et al.*, 2019). Among the impacts expected in coastal ecosystems due to this sea level rise are the contraction of the habitat, the loss of functionality and biodiversity, and lateral and interior migration (IPCC, 2019). The coastal zones, which are mostly low and densely populated, would be subjected to accelerated erosion, in addition to the intrusion of salt water in coastal underground aquifers, thus threatening historical and cultural resources as well as the infrastructure (Pendleton *et al.*, 2004).

The erosion conditions along most of the Antioquia littoral and its high vulnerability due to factors such as the sea level rise have been broadly documented in papers and press statements. This includes publications by Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia and numerous academic studies (Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia, 1998; Invemar, 2003; Correa and Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2005; Posada and Henao, 2008; Prussmann, 2011; Paniagua, 2013; Rangel and Anfuso, 2015; Correa and Paniagua, 2016).

The presence of emerging and inclined marine terrace levels in the Southwest of the Colombian Caribbean evidences strong tectonic deformations leading to differential terrain lifting that most likely fosters littoral erosion. Changes in land-sea levels associated with eustatic increases in the sea level and hydro-isostasy (lifting of the emerging coast and subsidence in the marine platform) are also important factors in this context (Vernet *et al.*, 1992; Invemar, 2003; Correa and Vernet, 2004).

nivel del mar y a la hidroisostasia (levantamiento de la costa emergida y subsidencia en la plataforma marina) son también factores de importancia en este contexto (Vernette *et al.*, 1992; Invemar, 2003; Correa y Vernet, 2004).

Otro factor que destacar son las condiciones geotécnicas deficientes de las rocas a lo largo de la línea de costa antioqueña, compuesta en su mayor longitud sobre limolitas y arcillolitas con grados altos de alteración química y física. Estas rocas y sus suelos asociados resisten poco las acciones físicas del agua (oleajes, lluvias y escorrentía) y su fracturamiento denso con inclinaciones (buzamientos) hacia el mar, permite percolaciones altas de aguas lluvias y residuales. Lo anterior facilita y promueve agrietamientos, generación de cárcavas y movimientos de masa, particularmente flujos de derrubios y caídas de rocas a lo largo de la línea de costa (Correa y Vernet, 2004).

La ubicación de más de 160 espolones a lo largo de la línea de costa, estructuras de diferentes dimensiones y construidas en las últimas décadas con bolsacretos, rocas y pentápodos/hexápodos ubicados perpendicularmente a la línea de costa, se interpretan como los factores aceleradores más importantes de la erosión de la línea de costa, puesto que han interrumpido el tránsito de arenas y generando erosión o acelerando la preexistente en los sectores adyacentes. En pocas décadas son responsables en su mayoría de las situaciones críticas que se viven hoy en sectores como Arboletes, Damaquiel, Zapata, Necoclí, El Totumo y Turbo. También se debe considerar la extracción intensiva de arenas y gravas de playas en ambientes cercanos a la línea de costa, los cuales no se pueden cuantificar debido a la falta de registros. Como hecho adicional, se anota la contaminación por aguas residuales, así como por la minería y las plantaciones agrícolas intensivas (Vallejo Toro *et al.*, 2016). Todo lo anterior ha llevado a clasificar la línea de costa del litoral antioqueño en categorías paisajísticas y de calidad de playas muy bajas (Rangel-Buitrago y Posada, 2013).

A lo largo del litoral antioqueño entre Necoclí y Turbo se han identificado intensos cambios de la línea de costa (Aristizábal *et al.*, 1990; Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia, 1998). Los aspectos principales de estos trabajos se resumieron y actualizaron en Correa y Vernet (2004) y en mapas y esquemas geomorfológicos del litoral antioqueño. En los documentos citados se consignan el carácter micromareal de la zona (mareas astronómicas con amplitudes máximas de aproximadamente 40 cm), el transporte neto de sedimentos arenosos hacia el sur, asociado a la incidencia de los vientos de la época de sequía (N y NE,

Another factor that is worth highlighting corresponds to the deficient geotechnical conditions of the rocks along the Antioquia coast, which is composed through most of its length of siltstones and claylites with high degrees of physical and chemical alteration. These rocks and their associated soils are little resistant to the physical action of water (waves, rains, and runoffs), and their dense fracturing, with inclinations (dips) towards the sea, allows for high percolations of rainwater and wastewater. The above facilitates and fosters cracking, the generation of gullies, and mass movements, particularly debris flow and rockfall along the coastline (Correa and Vernet, 2004).

The placement of more than 160 groyne along the coastline, structures of different dimensions and built during the last decades with bagcretos, rocks, and pentapods/hexapods located perpendicular to the coastline, are interpreted as the most important accelerating factors of the erosion along the coastline, given that they have interrupted the transit of sands, thus generating erosion or accelerating the one that preexisted in adjacent sectors. In a few decades, they have been mostly responsible for the critical situations currently being experienced in sectors such as Arboletes, Damaquiel, Zapata, Necoclí, El Totumo, and Turbo. The intensive extraction of sand and gravel from the beaches in areas close to the coastline should also be considered, which cannot be quantified due to a lack of records. As an additional fact, the pollution caused by wastewater is noted, as well as that caused by mining and intensive agricultural crops (Vallejo Toro *et al.*, 2016). All of the above has led to classify the coastline of the Antioquia littoral into very low landscape and beach quality categories (Rangel-Buitrago and Posada, 2013).

Along the Antioquia littoral between Necoclí and Turbo, intense changes in the coastline have been identified (Aristizábal *et al.*, 1990; Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia, 1998). The main aspects of these works were summarized and updated in Correa and Vernet (2004), as well as in maps and the geomorphological schemes of the Antioquia littoral. The cited documents contain the microtidal nature of the area (astronomic tides with maximum amplitudes of approximately 40 cm) and the net transport of sandy sediments towards the south, which is associated with the incidence of drought-time winds (N and NE, from November to March), with inversions towards the north during the incidence of the southern (S) winds in the rainy season.

The semiquantitative inventory of littoral erosion and accretion, based on comparisons of aerial photographs

noviembre a marzo), y con inversiones hacia el norte durante la incidencia de los vientos del sur (S) en la temporada lluviosa.

El inventario semicuantitativo de erosión y acreción litoral basado en comparaciones de aerofotografías Igac tomadas entre 1940 y 1985 (expresado como tasas de avance o retroceso de la línea de costa en m/año) evidencia el predominio de tendencias erosionales a lo largo de todo el litoral (Correa y Vernet, 2004). La máxima tendencia erosiva (20 m/año) se identificó en el extremo distal de la espiga de Punta Las Vacas (Gobernación de Antioquia – Universidad de Antioquia, 2018). Así mismo, las últimas determinaciones sistemáticas sobre los cambios en la línea de costa entre el delta del río Turbo y el extremo de la espiga punta Las Vacas para el periodo 1959-2010 estiman valores de erosión para las playas norte y centro de la espiga del orden de 116 a 174 m (Gobernación de Antioquia-Corporación Inveimar, 2010; Paniagua-Arroyave, 2013). Por consiguiente, la vulnerabilidad y su impacto en la economía de los países con litorales costeros hacen necesario evaluar el aumento del nivel del mar y a la vez formular estrategias de respuesta que se ajusten a los cambios (Vafeidis *et al.*, 2008).

El concepto de vulnerabilidad es explicado de diversas formas por expertos de diferentes disciplinas. En este caso la vulnerabilidad se asocia a la sensibilidad de un ecosistema (grado en que puede verse afectado en función de su exposición) ante un fenómeno (subida del nivel del mar) y/o a su capacidad de adaptación (Ojeda *et al.*, 2009). Uno de los métodos más simples y utilizados para evaluar la vulnerabilidad costera es el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC), desarrollado inicialmente por Gornitz y Kanciruk (1989) con el objetivo de desarrollar una base de datos de peligros costeros para proporcionar una visión global de las vulnerabilidades relativas de las costas del mundo a los peligros de inundación y erosión asociados con el aumento del nivel del mar. Para calcular dicho índice, Gornitz y Kanciruk (1989) emplean como variables: la geomorfología costera, la pendiente costera regional, el cambio relativo del nivel del mar, la altura media significativa de las olas, la tasa histórica de cambio de la costa, y la amplitud media de las mareas.

El IVC ha sido aplicado y adaptado para evaluar la vulnerabilidad costera alrededor en diferentes regiones del mundo (por ejemplo: Gornitz, 1991; Shaw *et al.*, 1998; Thieler y Hammar-Klose, 1999, 2000; Pendleton *et al.*, 2004; Boruff *et al.*, 2005; Doukakis, 2005; Diez *et al.*, 2007; Nageswara Rao *et al.*, 2008; Ojeda *et al.*, 2009; Abuodha y Woodroffe, 2010; Ozyurt y Ergin, 2010; López *et al.*, 2016;

taken by Igac between 1940 and 1985 (expressed as coastline advancement or recession ratios in m/year), evidences the prevalence of erosion tendencies across the whole littoral (Correa and Vernet, 2004). The maximum erosive tendency (20 m/year) was identified in the distal end of the Punta Las Vacas spits (Gobernación de Antioquia – Universidad de Antioquia, 2018). In the same way, the last systematic determinations of the changes in the coastline between the delta of the Turbo River and the end of the Punta Las Vacas spike for the period between 1959 and 2010 estimate erosion values for the northern and central beaches of the spike in the order of 116-174 m (Gobernación de Antioquia-Corporación Inveimar, 2010; Paniagua-Arroyave, 2013). Consequently, vulnerability and its impact on the economies of countries with coastlines make it necessary to evaluate the sea level rise and, in turn, to formulate fitting response strategies for these changes (Vafeidis *et al.*, 2008).

The concept of vulnerability is explained in diverse ways by experts of different disciplines. In this case, vulnerability is associated with the sensitivity of an ecosystem (the degree in which it may be affected in terms of its exposure) to a phenomenon (sea level rise) and/or its adaptation capabilities (Ojeda *et al.*, 2009). One of the simplest and most commonly employed methods for evaluating coastal vulnerability is the Coastal Vulnerability Index (CVI), which was initially developed by Gornitz and Kanciruk (1989) with the purpose of developing a database of coastal hazards in order to provide a global perspective on the relative vulnerabilities of the world's coasts against the dangers of flooding and erosion associated with the sea level rise. To calculate this index, Gornitz and Kanciruk (1989) used the following variables: coastal geomorphology, the regional coastal slope, the relative change in the sea level, the mean significant wave height, the historical change rate of the coast, and the mean amplitude of the tides.

The CVI has been applied and adapted for evaluating coastal vulnerability in different regions around the world (for example: Gornitz, 1991; Shaw *et al.*, 1998; Thieler y Hammar-Klose, 1999, 2000; Pendleton *et al.*, 2004; Boruff *et al.*, 2005; Doukakis, 2005; Diez *et al.*, 2007; Nageswara Rao *et al.*, 2008; Ojeda *et al.*, 2009; Abuodha and Woodroffe, 2010; Ozyurt and Ergin, 2010; López *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2016). The results of the CVI can be used to highlight the regions where the sea level rise contributes to coastal changes which may have a greater potential to contribute to changes in coastal recession (Gutiérrez *et al.*, 2009). In this article, coastal vulnerability is evaluated in

Ramos *et al.*, 2016). Los resultados del IVC se pueden utilizar para resaltar las regiones en las que el ascenso del nivel del mar contribuye a los cambios de la costa y pueden tener el mayor potencial para contribuir a los cambios en el retroceso costero (Gutiérrez *et al.*, 2009). En este trabajo se evalúa la vulnerabilidad costera ante el ascenso en el nivel del mar en cuatro sectores críticos en la costa del suroccidente del Caribe colombiano a través del IVC.

ÁREA DE ESTUDIO

En el suroccidente del Caribe colombiano está ubicado el golfo de Urabá (Figura 1), entre 7° 55' y 8° 40' N y 76° 53' y 7° 23' O. Tiene aproximadamente 80 km de largo y 25 km de ancho, presenta profundidades bajas con promedios de 30 m y valores máximos de 80 m en la frontera al norte (Montoya y Toro, 2006). La hidrodinámica del golfo está influenciada por la variación estacional de la descarga fluvial del río Atrato, la posición de la ZCIT, el oleaje, las mareas y los gradientes de densidad (Escobar *et al.*, 2011).

Los sectores norte (Volcán de Lodo) y sur (río Hobo) del municipio de Arboletes presentan erosión marina acelerada, posiblemente por la acción de las olas que llegan hasta la base del escarpe de la terraza marina y la socavan, erosionando los estratos sedimentarios inferiores de menor resistencia mediante la formación de una serie de cavidades que eventualmente provocan un desprendimiento de las porciones superiores de la terraza. Además, la parte superior de la terraza sufre procesos de expansión y contracción en el material arcilloso presente en los suelos que causa pérdida de cohesión de la estructura edáfica y luego arrastre. Este problema de erosión marina ha sido objeto de varios planes de desarrollo de los últimos gobiernos de Arboletes (PDM 2008-2011, 2012-2015, 2016-2019).

Zapata también cuenta con procesos erosivos, los cuales determinaron la realización de obras de protección como jarillones y muros de roca (enrocado) (Corpourabá-EAFIT, 2015), para mitigar la energía de la ola que llega a la base de la terraza. Sin embargo, la terraza hacia el suroccidente de los jarillones aún está siendo fuertemente erosionada por la acción de las olas que inciden en la base del acantilado, lo socavan y ocasionan pérdida de soporte para el estrato suprayacente, debido a la debilidad del estrato basal. En la espiga de punta Las Vacas, el frente externo comenzó a erosionarse desde la década de los años 40. Este proceso se ha extendido gradualmente hasta cubrir la totalidad de las playas del sector, generando retrocesos estimados de 70 m en algunos tramos en los últimos 80 años (Invemar, 2003).

light of the sea level rise and for critical sectors of the southwestern coast of the Colombian Caribbean by means of the CVI.

STUDY AREA

The Gulf of Urabá is located in the southwestern Colombian Caribbean (Figure 1), between 7° 55' and 8° 40' N, and between 76° 53' and 7° 23' W. It is approximately 80 km long and 25 km wide, and it has shallow depths, with averages of 30 m and maximum values of 80 m at the border in the north (Montoya and Toro, 2006). The Gulf's hydrodynamics are influenced by the seasonal variation of the fluvial discharge of the Atrato River, the position of the ITCZ, the waves, the tides, and the density gradients (Escobar *et al.*, 2011).

The northern (Volcán de Lodo) and southern (Hobo River) sectors of the municipality of Arboletes exhibit an accelerated marine erosion, which is probably due to the effect of the waves reaching the escarpment of the marine terrace and undermining it, thus eroding the less-resistant inferior sediment strata through the formation of a series of cavities that eventually cause the detachment of the superior portions of the terrace. Moreover, the superior part of the terrace undergoes expansion and contraction processes in the clay material present in the soils, which causes a loss of cohesion in the soil structure and later dragging. This marine erosion problem has been the object of several development plans by the last governments of Arboletes (PDM 2008-2011, 2012-2015, 2016-2019).

Zapata also shows erosive processes, which have determined the implementation of protective works such as levees and rock walls (revetments) (Corpourabá-EAFIT, 2015) in order to mitigate the energy of the waves reaching the base of the terrace. However, towards the southwest of the levees, the terrace is still being strongly eroded by the action of the waves that impact the base of the cliff, undermine it, and cause a loss of support in the overlying stratum given the weakness of the basal stratum. In the Punta Las Vacas spike, the external front started to erode in the 1940s. This process has gradually expanded across the entirety of the beaches in this sector, thus generating estimated recessions of 70 m in some areas during the last 80 years (Invemar, 2003).

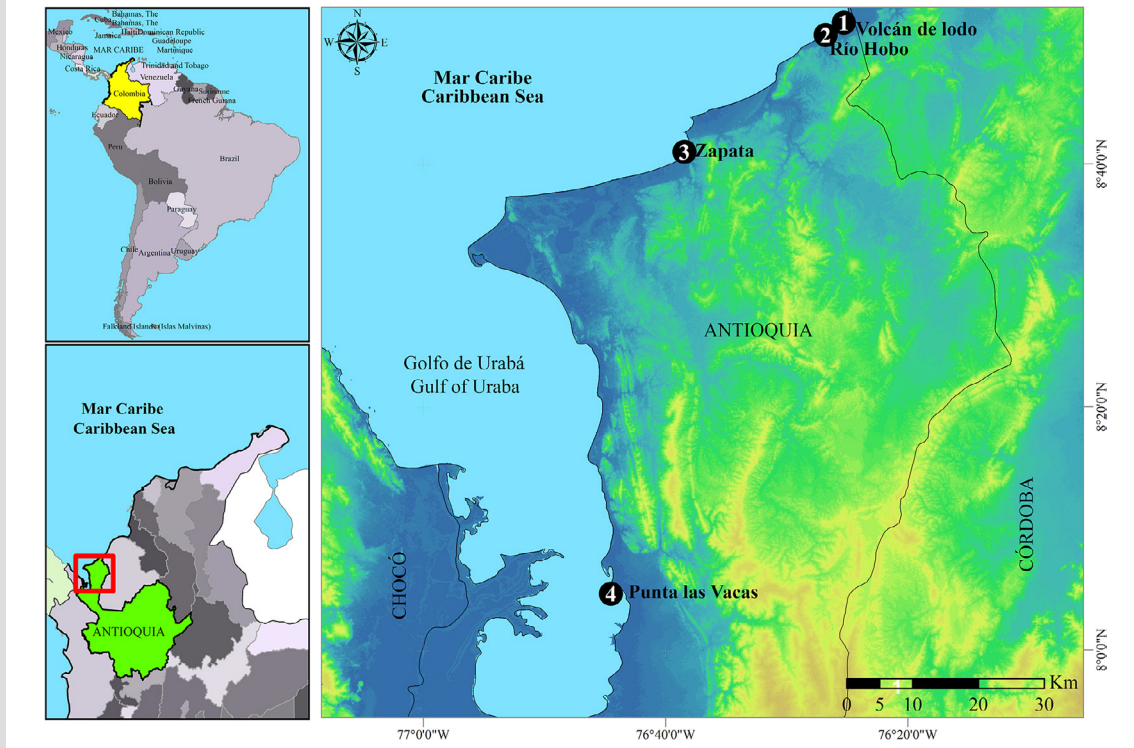


Figura 1. Localización de las cuatro localidades de estudio en el suroccidente del Caribe colombiano: 1) Volcán de Lodo, 2) Río Hobo, 3) Zapata y 4) Punta Las Vacas.

Figure 1. Location of the four study sites in the southwestern Colombian Caribbean: 1) Volcán de Lodo, 2) Hobo River, 3) Zapata, and 4) Punta Las Vacas

MATERIALES Y MÉTODOS

La vulnerabilidad costera se evaluó mediante el IVC, que integra seis variables (Ojeda *et al.*, 2009). El IVC permite que las variables se relacionen de manera cuantificable y expresa la vulnerabilidad relativa de la costa a los cambios físicos debido al futuro aumento del nivel del mar. Dicho índice se calcula como la raíz cuadrada del producto de las variables clasificadas, dividido por el número total de variables. Una vez incorporadas las seis variables en el SIG, los resultados se integraron siguiendo la ecuación:

$$IVC = \frac{\sqrt{a \times b \times c \times d \times e \times f}}{6}$$

donde: *a* representa la variable geomorfología, *b* la pendiente costera, *c* la tasa de cambio de la línea de costa, *d* representa el oleaje significativo medio, *e* la tasa de cambio del nivel del mar, y *f* el rango mareal. Este método produce datos numéricos adimensionales que no corresponden a ninguna magnitud física. Sin embargo, permite identificar áreas donde los diversos efectos del aumento del nivel del mar pueden ser mayores. El IVC presentado aquí es similar al utilizado por Gornitz y Kanciruk (1989), Gornitz (1991), Shaw *et al.* (1998), Thieler y Hammar-Klose (1999) y Ojeda *et al.* (2009).

MATERIALS AND METHODS

Coastal vulnerability was evaluated by means of the CVI, which integrates six variables (Ojeda *et al.*, 2009). The CVI allows the variables to interact in a quantifiable way and expresses the relative vulnerability of the coast to physical changes caused by the future sea level rise. Said index is calculated as the square root of the product of the classified variables, which is divided by the total number of variables. Once these six variables were incorporated into the GIS, the results were integrated according to the following equation:

$$CVI = \frac{\sqrt{a \times b \times c \times d \times e \times f}}{6}$$

where *a* represents the geomorphology, *b* the coastal slope, *c* the coastline change rate, *d* the mean significant waves, *e* the sea level change rate, and *f* the tidal range. This method yields dimensionless numerical data which do not correspond to any physical magnitude. However, it allows identifying areas where the diverse effects of the sea level rise may be greater. The CVI presented herein is similar to that used by Gornitz and Kanciruk (1989), Gornitz (1991), Shaw *et al.* (1998), Thieler and Hammar-Klose (1999), and Ojeda *et al.* (2009).

Debido a que las variables que utiliza el IVC son cuantitativas y cualitativas, con diferentes escalas y unidades, se le asignó a la clasificación de éstas un valor 1 a 5 para su integración (Tabla 1). En dicha tabla también se indica la fuente de los datos y el periodo de datos que se utilizó para obtener los valores de cada una de las variables. El valor 5 representó la clase con mayor vulnerabilidad y el valor 1 la de menor vulnerabilidad.

Given that the variables employed by the CVI are both quantitative and qualitative, with different scales and units, their classification was assigned a value from 1 to 5 for their integration (Table 1). Table 1 also indicates the source of the data and the period of time used to obtain the values of each variable. Value 5 represents the class with the greatest vulnerability, and value 1 corresponds to the lowest one.

Tabla 1. Rango de valores utilizados para el cálculo del IVC, tomados de Ojeda *et al.* (2009).

Table 1. Range of values utilized to calculate the CVI, taken from Ojeda *et al.* (2009)

Variables	Datos / Data		Valor de la vulnerabilidad / Vulnerability value				
	Fuente / Source	Periodo / Period	1 Muy baja / Very low	2 Baja / Low	3 Media / Medium	4 Alta / High	5 Muy alta / Very high
a) Geomorfología / Geomorphology	Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia / Gobernación de Antioquia and Universidad de Antioquia (2018)	2019	Acantilados altos sobre rocas coherentes / High cliffs over coherent rocks	Acantilados medios sobre rocas de resistencia media / Medium-sized cliffs over medium-resistance rocks	Acantilados medios-bajos sobre formaciones sedimentarias de alta erodabilidad / Medium-low cliffs over high-erodibility settlement formations	Playas extensas adosadas a planicies sedimentarias litorales poco elevadas / Extensive beaches coterminous with low-elevation sedimentary littoral plains	Playas adosadas a formaciones de islas-barrera, tómbolos, flechas litorales, deltas, etc. También sectores que protegen formaciones de marismas mareales o fluvio-mareales / Beaches coterminous with island-barrier formations, sandbank, littoral arrows, deltas, etc. there are also sectors that protect tidal or fluvial-tidal marsh formations
b) Pendiente costera / Coastal slope (%)	Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia / Gobernación de Antioquia and Universidad de Antioquia (2019)	2019	Mayor o igual a 8 / Higher or equal to 8	Entre 4 y 8 / Between 4 and 8	Entre 2 y 4 / Between 2 and 4	Entre 1 y 2 / Between 1 and 2	Entre 0 y 1 / Between 0 and 1
c) Tasa de cambio de línea de costa / Coastline change rate	Imágenes satelitales Landsat (1996) y Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia (2018) / Landsat satellite images (1996) and Gobernación de Antioquia and Universidad de Antioquia (2018)	1996-2018	(2, máx.]	(1, 2]	(-1, 1]	(-2, -1]	[mín., -2]
d) Oleaje significativo medio / Mean significant waves	Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia / Gobernación de Antioquia and Universidad de Antioquia (2019)	2005-2017	(0 - 0.75)	(0.75 - 0.85)	(0.85 - 0.95)	(0.95 - 1.05)	(1.05 - 1.15)
e) Tasa de cambio del nivel relativo del mar (mm/año) / Relative sea level change rate (mm/year)	Corpourabá (2019)	1998-2017	(0 - 1.8)	(1.8 - 2.5)	(2.5 - 3.0)	(3.0 - 3.5)	(3.5 - máx.)
f) Rango mareal / Tidal range	FES (2014)	2018	(6 - máx.]	(4 - 6]	(2 - 4]	(1 - 2]	[0 - 1]

La clasificación geomorfológica se realizó por fotointerpretación y se corroboró con visitas de campo. La línea de costa se definió cada 100 m a través de polilíneas, para determinar en cada uno de estos tramos su valor de vulnerabilidad. La información primaria fue procesada en *ArcGIS* 10.5. La pendiente se obtuvo a partir del levantamiento topográfico y batimétrico generando mapas a través de la herramienta “*slope*” en la ruta (3D Analyst tool - Raster Surface) en *ArcGIS* 10.5 (Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia, 2018). La pendiente se calculó porcentualmente como el cociente entre la diferencia de elevaciones y la distancia horizontal recorrida.

Por su parte, la tasa de cambio de línea de costa se obtuvo mediante el análisis de la evolución de la línea de costa entre 1996 y 2018. Las líneas de costa correspondientes a 1996 fueron determinadas por medio de imágenes satelitales Landsat (1996). Este tipo de imágenes son también utilizadas en documentos anteriores debido a que en la región no existen imágenes de mejor calidad (Correa *et al.*, 2007; Rangel *et al.*, 2015). Las imágenes correspondientes a 2018 fueron levantadas a través de vuelos de dron en todos los sitios, excepto punta Las Vacas (Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia, 2018). En este sitio no se pudo volar el dron debido a la presencia de un inhibidor de señal, por lo cual se trabajó de manera similar a cómo se obtuvo la línea de costa de 1996. Los efectos del oleaje no fueron considerados debido a que no se observaron condiciones de tormenta en ninguna de las fotografías aéreas. La tasa de cambio de línea de costa (m/año) fue evaluada mediante el trazo de transectos perpendiculares semiautomatizados entre la línea base actual y las líneas de costa obtenidas de la información histórica. Los cambios de la línea costera se analizaron usando el software DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*). Dicha herramienta calcula parámetros estadísticos que indican el estado y las tendencias evolutivas para periodos específicos de tiempo (Thieler *et al.*, 2005).

Con el objetivo de representar las mejores condiciones del oleaje significativo medio, se utilizó el modelo *WaveWatch* IIITM desde el mar Caribe hasta el golfo de Urabá con múltiples mallas anidadas de $1/6^\circ$, $1/12^\circ$ y $1/60^\circ$ (Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia, 2018). En resumen, se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes tamaños de malla y se determinó la influencia energética del oleaje proveniente del Atlántico Norte hacia cada uno de los puntos. Para la valoración de la tasa de cambio del nivel relativo del mar se utilizaron datos de anomalías del nivel del mar durante 1994 y 2017, obteniendo las tasas de ascenso del nivel del mar en el Caribe colombiano en seis celdas costeras del golfo de Urabá entre 1998 y 2017 (20 años) (Corpourabá, 2019).

Geomorphological classification was carried out through photointerpretation and corroborated via field visits. The coastline was defined every 100 m by means of polylines in order to determine the vulnerability value of each area. The primary information was processed in *ArcGIS* 10.5. The slope was obtained from topographic and bathymetric mapping by means of the “*slope*” tool through the *3D Analyst tool - Raster Surface* path in *ArcGIS* 10.5 (Gobernación de Antioquia and Universidad de Antioquia, 2018). The slope percentage was calculated as the quotient between the elevation difference and the horizontal distance traveled.

In turn, the coastline change rate was obtained by analyzing the evolution of the coastline between 1996 and 2018. The coastlines corresponding to 1996 were determined via Landsat satellite images (1996). This type of image is also used in previous documents, given that there are no images of the region with better quality (Correa *et al.*, 2007; Rangel *et al.*, 2015). The images corresponding to 2018 were obtained via drone flights at all sites except Punta las Vacas (Gobernación de Antioquia and Universidad de Antioquia, 2018). At this site, it was not possible to fly the drone because of the presence of a signal inhibitor, which is why we proceeded similarly to the way in which we obtained the coastlines for 1996. The effects of the waves were not considered, since no storm conditions were observed in any of the aerial photographs. The coastline change rate (m/year) was evaluated by drawing semi-automatized perpendicular transects between the current baseline and the coastlines obtained from historical information. Coastline changes were analyzed using the DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) software. This tool calculates statistical parameters indicating the status and evolutionary tendencies of specific periods of time (Thieler *et al.*, 2005).

Aiming to represent the best mean significant wave conditions, the *WaveWatch* IIITM model was used from the Caribbean Sea to the Gulf of Urabá with multiple $1/6^\circ$, $1/12^\circ$, and $1/60^\circ$ nested meshes (Gobernación de Antioquia and Universidad de Antioquia, 2018). To summarize, a sensitivity analysis with different mesh sizes was performed, and the energetic influence of the waves coming from the northern Atlantic to each site was determined. To assess the relative sea level change rate, data regarding anomalies in the sea level between 1994 and 2007 were used, thus obtaining the sea level rise rates in the Colombian Caribbean for six coastal cells of the Gulf of Urabá between 1998 and 2017 (20 years) (Corpourabá, 2019).

On the other hand, the tidal range of the Volcán de Lodo, Hobo River, and Zapata sites was determined by

De otro lado, el rango mareal de los sitios Volcán de Lodo, río Hobo y Zapata fue determinado utilizando el modelo FES2014. Para punta Las Vacas se implementaron los datos del mareógrafo situado en la estación de guardacostas del apostadero naval de Turbo, modelados con el método de análisis de armónicos (Higuita y Quintana, 2020). Una vez evaluadas todas las variables en cuadrículas de 100 m * 100 m, se realizaron los cálculos pertinentes para cada tramo y los resultados obtenidos se dividieron en cuatro clases, utilizando como límites los percentiles 25 %, 50 % y 75 % y empleando la clasificación de Ojeda *et al.* (2009) indicados en la Tabla 2.

using the FES2014 model. For Punta Las Vacas, data from the tide gauge located at the Coast Guard station of the Turbo Naval Base were employed. These were modeled through the harmonics analysis method (Higuita and Quintana, 2020). Once all the variables had been evaluated in 100 m * 100 m grids, the relevant calculations were performed for each area, and the results obtained were divided into four classes, using the 25, 50, and 75 % percentiles as limits, as well as by applying the classification by Ojeda *et al.* (2009), as indicated in Table 2.

Tabla 2. Clasificación del IVC, tomado de Ojeda *et al.* (2009).

Valor del IVC / CVI Value	Clase / Class	Vulnerabilidad clasificada / Classified vulnerability
(2.23–6.32]	Baja / Low	1
(6.32–10.00]	Media / Medium	2
(10.00–14.14]	Alta / High	3
(14.14–35.35]	Muy Alta / Very high	4

Table 2. CVI classification, taken from Ojeda *et al.* (2009).

RESULTADOS

Al evaluar la respuesta de la costa del suroccidente del Caribe colombiano ante el ascenso del nivel del mar, se encuentra poca variabilidad en los datos obtenidos, debido a que las dimensiones de los tramos de línea de costa analizados son inferiores a 3 km. Los lugares Volcán de Lodo, río Hobo y Zapata comparten algunas de las clasificaciones de vulnerabilidad debido a su ubicación geográfica fuera del golfo de Urabá, siendo en conjunto diferentes a los valores de vulnerabilidad obtenidos para punta Las Vacas. Se presentan a continuación los resultados obtenidos para cada una de las variables empleadas para el cálculo del IVC.

- La clasificación geomorfológica en Volcán de Lodo, río Hobo y Zapata está dominada por acantilados sobre formaciones sedimentarias de alta erodabilidad. Lo anterior representa una vulnerabilidad media. En punta Las Vacas, las formaciones de playa otorgan un nivel de vulnerabilidad alta.
- Volcán de Lodo y Zapata están dominados mayormente por pendientes altas que alcanzan valores del 63 %, ambos sitios cuentan con clasificaciones de vulnerabilidad baja y muy baja. Las bajas pendientes de río Hobo y punta Las Vacas, que se encuentran en valores cercanos a 2 %, son clasificadas en el índice con un nivel de vulnerabilidad media hasta muy alta.

RESULTS

While analyzing the response of the southwestern coast of the Colombian Caribbean to the sea level rise, little variability is found among the data obtained, given that the dimensions of the analyzed coastline sections are smaller than 3 km. The Volcán de Lodo, Hobo River, and Zapata sites share some of their vulnerability classifications, given that their geographical location is outside the Gulf of Urabá. As a group, the vulnerability values for these sites are different from those obtained for Punta Las Vacas. Next, the results obtained for each of the variables employed for calculating the CVI are presented.

- The geomorphological classification of the Volcán de Lodo, Hobo River, and Zapata sites predominantly comprises cliffs over high-erodibility sediment formations. This constitutes a medium vulnerability. In Punta Las Vacas, beach formations constitute a high level of vulnerability.
- Volcán de Lodo and Zapata predominantly comprise high slopes that reach values of 63 %. Both sites are classified as having low and very low vulnerability. The low slopes of Hobo River and Punta Las Vacas, which have values close to 2 %, are classified within the index with a medium to very high vulnerability level.

c) La tasa de cambio de la línea de costa en Volcán de Lodo, río Hobo y Zapata tiene valores de hasta 4 m/año, generando vulnerabilidades muy altas (Figura 2).

c) The coastline change rate in Volcán de Lodo, Hobo River, and Zapata shows values of up to 4 m/year, thus constituting very high vulnerabilities (Figure 2). Punta

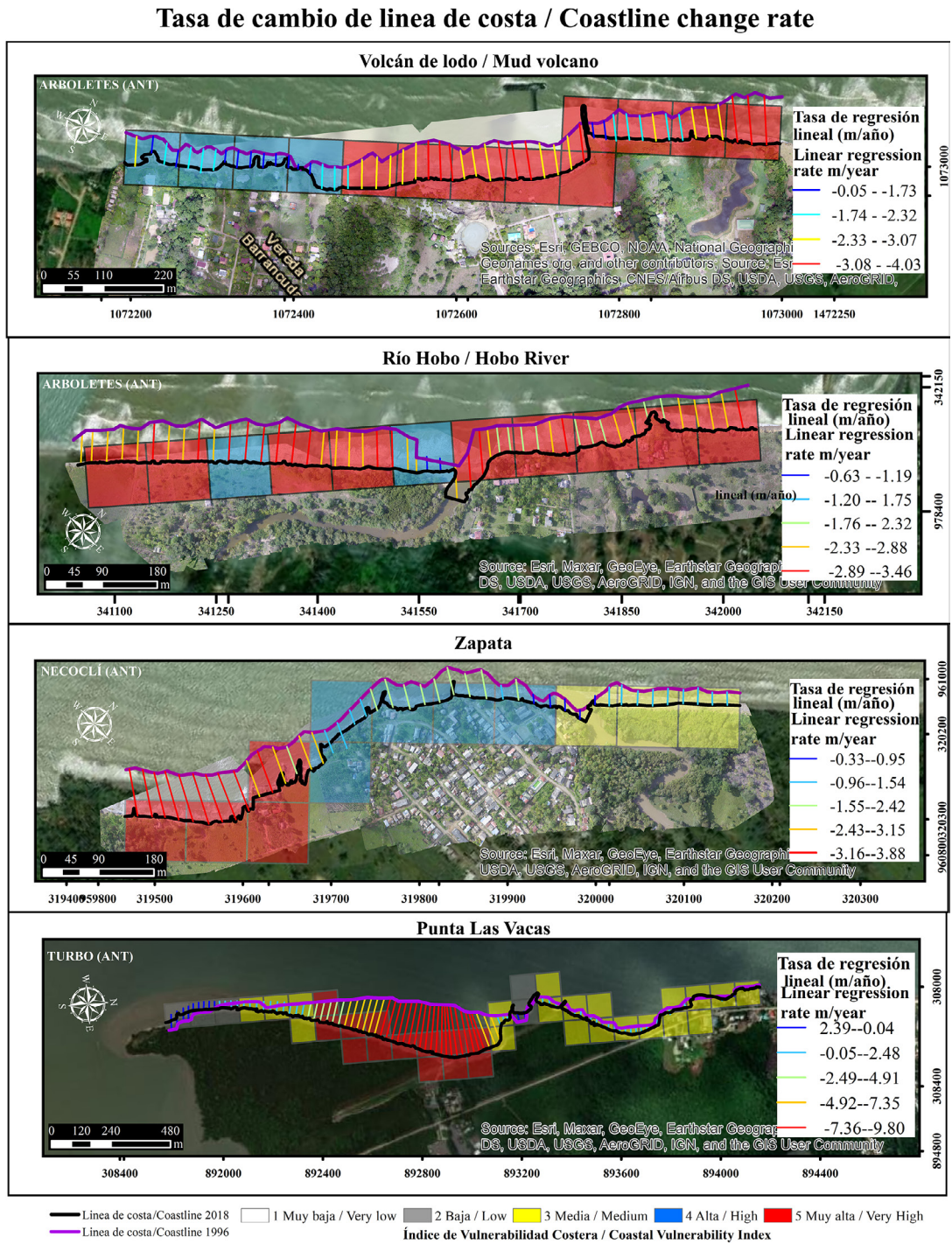


Figura 2. Tasa de cambio de la línea de costa en Volcán de Lodo, río Hobo, Zapata y punta Las Vacas. Sistema de coordenadas WGS 1984 UTM, zona 18N, proyección Transversal Mercator, unidades en metros, cuadrículas 100 * 100 m. Ortofotos tomadas del proyecto de investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia, Ascon 18- 417, componente topo-batimetría (2018).

Figure 2. Coastline change rate in Volcán de Lodo, Hobo River, Zapata, and Punta Las Vacas. WGS 1984 UTM coordinate system, 18N zone, Transverse Mercator projection, units: meters, 100 * 100 m grids. Ortophotos taken from the research project for the reversal of erosion in the coasts of the Antioquia Sea, Ascon 18-41, topo-bathymetry component (2018).

Punta Las Vacas alcanza retrocesos de hasta 9,8 m/año; la parte más afectada es la central, donde anteriormente existía una pista de aterrizaje, pero hoy en día está dividida en dos partes debido a la erosión costera.

- d) El oleaje significativo medio fue menor a 0,85 m en todos los sitios estudiados (Tabla 3) (Gobernación de Antioquia – Universidad de Antioquia, 2018), por lo cual se clasificó con una vulnerabilidad baja.
- e) En cuanto a la tasa de cambio del nivel relativo del mar, todos los sitios se encuentran por encima de 3 mm/año (Tabla 3), (Corpourabá, 2019), clasificando su vulnerabilidad entre alta y muy alta.
- f) El rango mareal no supera los 0,52 m en ninguno de los sitios estudiados (Tabla 3), clasificando el nivel de vulnerabilidad como muy alta.

Las Vacas reaches recessions of up to 9,8 m/year. The most effective part is the center, where there used to be a landing strip, but it is nowadays divided in two parts due to coastal erosion.

- d) The mean significant waves were lower than 0,85 m in all the studied sites (Table 3) (Gobernación de Antioquia – Universidad de Antioquia, 2018), which is why it was classified as having a low vulnerability.
- e) As for the relative sea level change rate, all sites are above 3 mm/year (Table 3) (Corpourabá, 2019), thus constituting high to very high vulnerabilities.
- f) The tidal range does not exceed 0,52 m at any of the studied sites (Table 3), which constitutes a very high level of vulnerability.

Tabla 3 . Variables físicas: Oleaje (Gobernación de Antioquia – Universidad de Antioquia, 2018), Nivel del mar (Corpourabá, 2019), Rango mareal medio (Higuita y Quintana, 2020).

Table 3. Physical variables: waves (Gobernación de Antioquia – Universidad de Antioquia, 2018), sea levels (Corpourabá, 2019), mean tidal range (Higuita and Quintana, 2020)

Sitio / Site	Oleaje / Waves (m)	Nivel del mar (mm/año)/ Sea level (mm/year)	Rango Mareal Medio / Rango Mareal Medio (m)
Volcán de Lodo	0.8	3.93	0.51
Río Hobo	0.64	3.93	0.51
Zapata	0.48	3.92	0.52
Punta Las Vacas	0.4	3.43	0.52

Los valores del IVC se encontraron entre 7,07 y 28,86. El 62 % de la línea de costa de Volcán de Lodo está constituida por una vulnerabilidad muy alta, asociada a sectores de acantilados con formaciones sedimentarias erosionables y retrocesos altos de la línea de costa, mientras que en 38 % restante, donde la vulnerabilidad es alta, son lugares donde existen pequeñas obras de defensa costera (Figura 3).

El 73 % del área en río Hobo se encuentra en vulnerabilidad muy alta, principalmente en el sector de la desembocadura del río y la zona de manglar aledaña, donde se encuentran formaciones de playa. El 27 % restante, con vulnerabilidad alta, corresponde a las zonas de acantilados (Figura 4).

En Zapata, 8 % de la costa tiene vulnerabilidad muy alta, asociada a la desembocadura del río, principalmente por el parámetro de pendiente, mientras que 92 % está presenta vulnerabilidad media, correspondiendo a los tramos con obras de protección costera (Figura 5).

The CVI values were found to be between 7.07 and 28.86. 62 % of the coastline of Volcán de Lodo has a very high vulnerability, which is associated with cliff areas with erodible sediment formations and high coastline recessions, whereas the remaining 38 %, where the vulnerability is high, comprises places with small coastal defense works (Figure 3).

73 % of the area in Hobo River has a very high vulnerability, mainly at the river mouth and the neighboring mangrove zone, where the beach formations are located. The remaining 27 % has a high vulnerability and corresponds to cliff areas (Figure 4).

In Zapata, 8 % of the coast has a very high vulnerability, which is associated with the river mouth, mainly due to the slope parameter. Meanwhile, 92 % shows a medium vulnerability, which corresponds to the sections with coastal protection works (Figure 5).

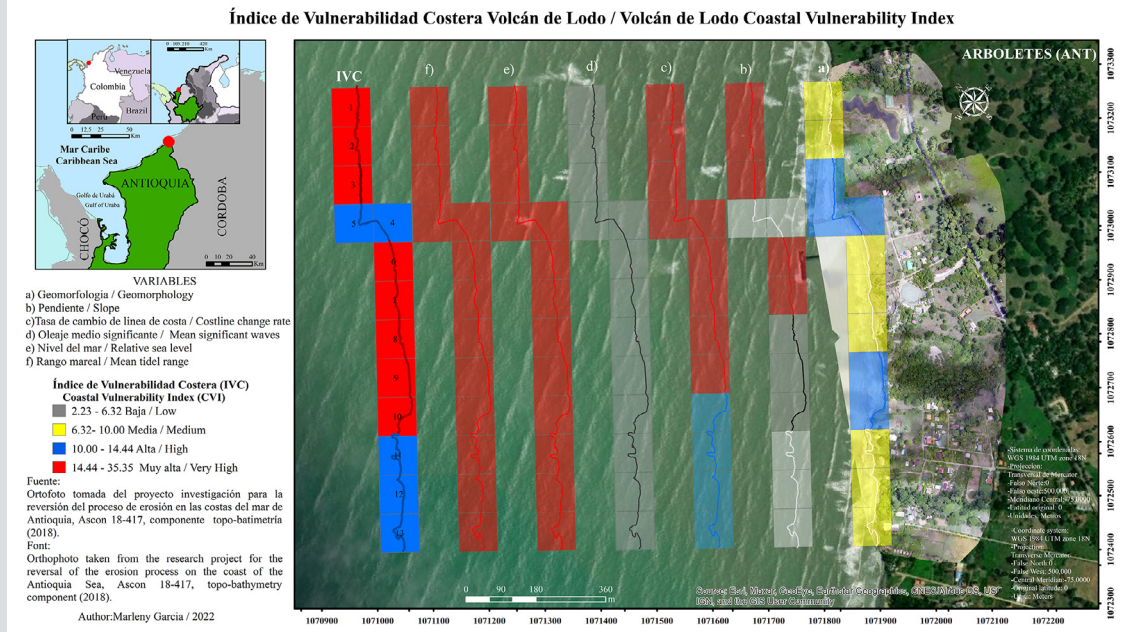


Figura 3. Variables a) Geomorfología b) Pendiente, c) Tasa de cambio de la línea de costa, d) Oleaje significativo medio, e) Tasa de cambio del nivel relativo del mar, f) Rango marea medio y por último, a la izquierda, valor del IVC para la línea de costa de Volcán de Lodo.

Figure 3. Variables: a) geomorphology, b) slope, c) coastline change rate, d) mean significant waves, e) relative sea level change rate, f) mean tidal range, and, finally, the CVI value for the coastline of Volcán de Lodo (left).

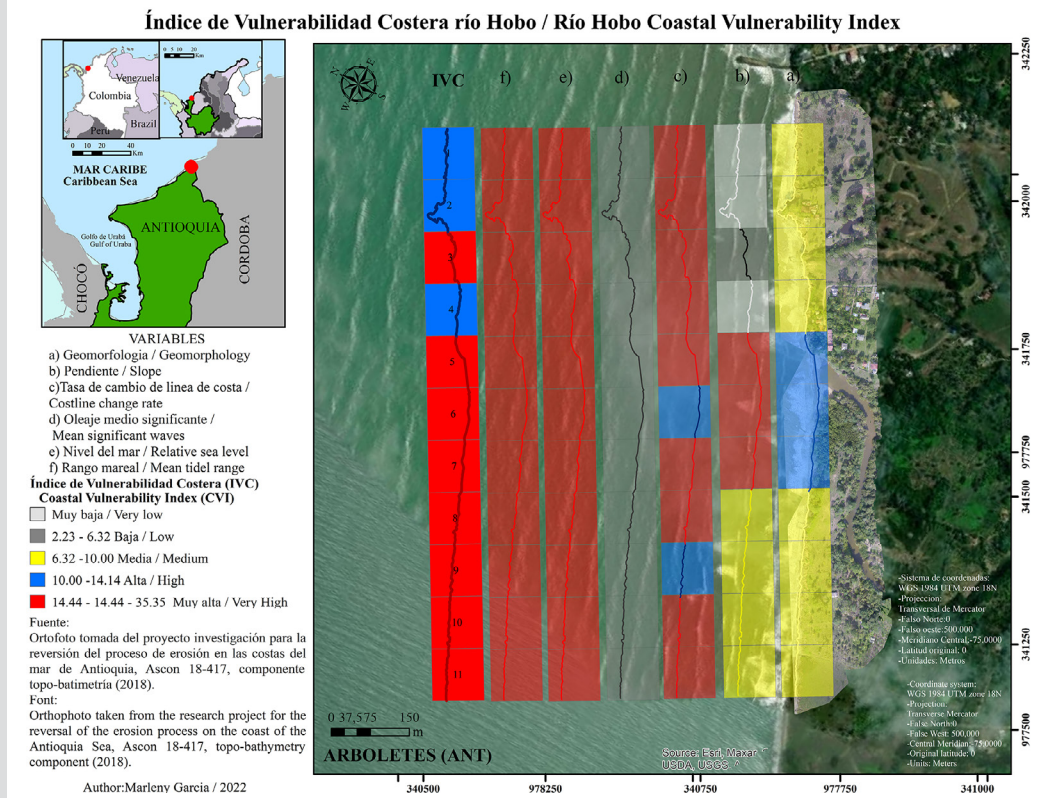


Figura 4. Variables a) Geomorfología b) Pendiente, c) Tasa de cambio de la línea de costa, d) Oleaje significativo medio, e) Tasa de cambio del nivel relativo del mar, f) Rango marea medio y por último, a la izquierda, valor del IVC para la línea de costa de río Hobo.

Figure 4. Variables: a) geomorphology, b) slope, c) coastline change rate, d) mean significant waves, e) relative sea level change rate, f) mean tidal range, and, finally, the CVI value for the coastline of Hobo River (left).

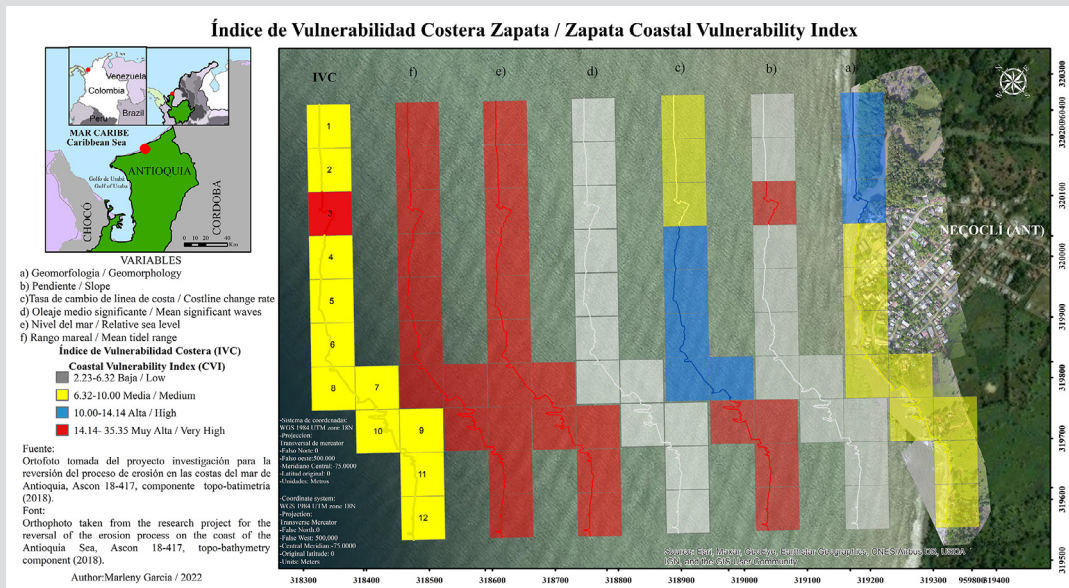


Figura 5. Variables a) Geomorfología b) Pendiente, c) Tasa de cambio de la línea de costa, d) Oleaje significativo medio, e) Tasa de cambio del nivel relativo del mar, f) Rango marea medio y por último, a la izquierda, valor del IVC para la línea de costa de Zapata.

Figure 5. Variables: a) geomorphology, b) slope, c) coastline change rate, d) mean significant waves, e) relative sea level change rate, f) mean tidal range, and, finally, the CVI value for the coastline of Zapata (left).

Por último, en punta Las Vacas 63 % presenta vulnerabilidad muy alta, con procesos erosivos en especial en el sector central de la espiga. El 37 % restante muestra vulnerabilidad alta (Figura 6).

Finally, in Punta Las Vacas 63 % has a very high vulnerability, with erosive processes especially in the central sector of the spike. The remaining 37 % shows a high vulnerability (Figure 6).

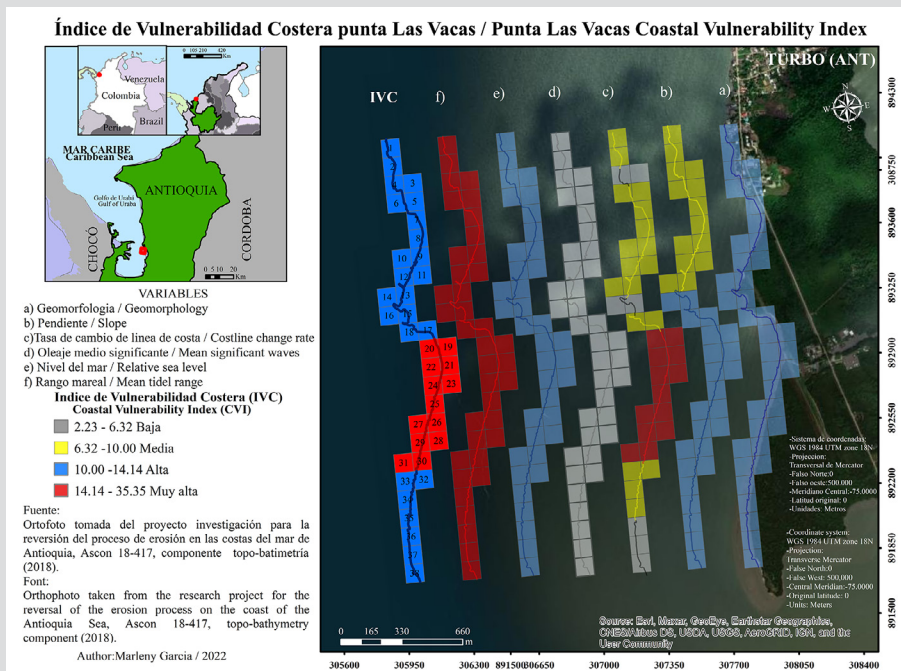


Figura 6. Variables a) Geomorfología b) Pendiente, c) Tasa de cambio de la línea de costa, d) Oleaje significativo medio, e) Tasa de cambio del nivel relativo del mar, f) Rango marea medio y por último, a la izquierda, valor del IVC para la línea de costa de punta Las Vacas.

Figure 6. Variables: a) geomorphology, b) slope, c) coastline change rate, d) mean significant waves, e) relative sea level change rate, f) mean tidal range, and, finally, the CVI value for the coastline of Punta Las Vacas (left).

DISCUSIÓN

Los trabajos realizados con IVC contemplan diferentes números de variables, Gornitz (1991, 1994), quien es una de las pioneras del índice, contempla el uso de siete a trece variables en la costa oriental de EE. UU., Shaw *et al.* (1998) tienen en cuenta en su trabajo para las costas de Canadá siete variables, mientras Nageswara *et al.* (2008) para las de la India sólo consideró la importancia de cinco variables. Por su parte, Ojeda *et al.* (2009) incluyeron seis variables para las costas de España. Es importante analizar que variables son relevantes para cada zona costera, de acuerdo con la dinámica de la misma, si bien, como muestran estos estudios previos, el número de variables también depende de la cantidad de información disponible.

En este trabajo se analizó un total de 8 km de línea de costa. Los valores del IVC se encontraron entre 7,07 y 28,86. El 80 % se encuentra en situación de alta vulnerabilidad, en su mayoría sectores costeros bajos cercanos a desembocaduras de ríos, caracterizados por presencia de manglares, costas erosivas con ritmos de retroceso altos, con similitudes a las encontradas en lugares como Mar Chiquita en Argentina (Fernández *et al.*, 2018) o Cartagena de Indias en Colombia, con un litoral muy vulnerable asociado principalmente al retroceso costero y ocupación antropogénica (Rangel y Posada, 2013). Es posible que algunas zonas de alta vulnerabilidad podrían estar asociadas a impactos negativos de obras de protección costera mal implementadas.

Los manglares ubicados en las áreas de estudio se encuentran asociados a pequeños ríos, quebradas o depresiones costeras. Dichos manglares están amenazados por la progresiva erosión costera e inclusive se predice que en gran parte del litoral antioqueño desaparecerán las áreas pequeñas de manglar ubicadas en localidades con déficit de aporte de sedimentos (Blanco-Libreros, 2016).

Las condiciones de erosión a lo largo de la mayor parte del litoral antioqueño, así como su alta vulnerabilidad debido a factores como el ascenso del nivel del mar, han sido documentadas ampliamente en artículos y comunicados de prensa, publicaciones de Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia y numerosos estudios académicos (Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia, 1998; Invemar, 2003, 2007; Correa y Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2005; Posada y Henao, 2008; Torres-Parra *et al.*, 2008; Rangel y Anfuso, 2009; Prussmann, 2011; Paniagua, 2013; Rangel *et al.*, 2015; Correa y Paniagua, 2016). El ascenso del nivel del mar en las zonas estudiadas puede llegar hasta 3,93 mm/año

DISSCUSSION

Studies carried out with the CVI contemplate different numbers of variables. Gornitz (1991, 1994), one of the pioneers of the index, contemplates the use of seven to thirteen variables in the eastern coast of the United States. In their work on the coasts of Canada, Shaw *et al.* (1998) consider seven variables, whereas Nageswara *et al.* (2008) considered the importance of only five variables for the coasts of India. On their part, Ojeda *et al.* (2009) included six variables for the coasts of Spain. It is important to analyze which variables are relevant for each coastal zone according to its dynamics, even though, as shown by these previous studies, the number of variables also depends on the amount of available information.

This work analyzed a total of 8 km of coastline. The IVC values were found to be between 7.07 and 28.86. 80 % currently have a high vulnerability, mostly low coastal sectors near river mouths, which are characterized by the presence of mangroves, erosive coasts with high recession rates, with similarities found with places such as Mar Chiquita in Argentina (Fernández *et al.*, 2018) or Cartagena de Indias in Colombia, with a very vulnerable littoral, which is mainly associated with coastal recession and anthropogenic occupation (Rangel and Posada, 2013). It is possible that some high-vulnerability zones are associated with the negative impact of badly implemented coastal protection works.

The mangroves located in the study areas are associated with small rivers, streams, or coastal depressions. Said mangroves are threatened by progressive coastal erosion and, and it is even predicted that, in a great portion of the Antioquia littoral, small mangrove areas located in places with a sediment contribution deficit will disappear (Blanco-Libreros, 2016).

Erosion conditions along most of the Antioquia littoral, as well as the high vulnerability due to factors such as the sea level rise, have been broadly documented in articles and press statements. This includes publications by Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia and numerous academic studies (Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia, 1998; Invemar, 2003, 2007; Correa and Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2005; Posada and Henao, 2008; Torres-Parra *et al.*, 2008; Rangel and Anfuso, 2009; Prussmann, 2011; Paniagua, 2013; Rangel *et al.*, 2015; Correa and Paniagua, 2016). The sea level rise in the study areas can reach 3,93 mm/year (Corpourabá, 2019). These values are low in comparison, for example, with cities such as Cartagena,

(Corpourabá, 2019); valores bajos comparados por ejemplo con ciudades como Cartagena donde los niveles van desde $5,3 \pm 1,3$ mm/año (Torres- Parra, 2008), o el Golfo de México, que van desde $1,8 \pm 9,2$ mm/año (Zavala *et al.*, 2011). Uno de los pocos trabajos puntuales sobre la variación del nivel medio del mar en el área de estudio registra un aumento para el período 2011-2015 de $\sim 19,4$ mm/año (Londoño y Murillo, 2018). Sin embargo, los impactos no son iguales en todas las costas, debido a que existen diferentes procesos tales como hundimientos naturales, aportes de sedimentos, alta presión humana, zonas protegidas con infraestructura costeras como geotubos, escolleras y espigones. En el caso particular del sur del Caribe, se reporta un hundimiento del terreno del orden de 4 mm/año en las terrazas costeras, debido a la sedimentación y tectónica compresiva (Blanco-Libreros, 2016). Otras opiniones con respecto a la cuenca del mar Caribe concluyen que parece dominado por subcuencas y procesos locales y por lo tanto, las estimaciones mundiales e incluso regionales no son suficientes para proporcionar una guía de planificación y protección costera ni para la estimación de la vulnerabilidad costera ante el cambio del nivel del mar (Torres-Parra y Tsimplis, 2013).

Ninguno de los sitios estudiados obtuvo baja vulnerabilidad, debido a las altas tasas de erosión en las últimas décadas, las cuales también pueden ser un indicativo del ascenso del nivel del mar en esta zona. Si dicho ascenso continúa hasta alcanzar ~ 65 cm en 2100 (Nerem *et al.*, 2018), es probable que las costas aquí analizadas se erosionen drásticamente.

Por otro lado, los retrocesos de la línea de costa en el área estudiada varían entre 4 y 9,8 m/año, valores similares a los 2,5 a 11 m/año obtenidos en la costa de Tabasco, México (Hernández *et al.*, 2008). Caleta Portales, Chile, registró un retroceso de 12,6 m entre 2004 y 2016, provocado por un ligero cambio costero (Martínez *et al.*, 2018). Las desembocaduras de los ríos en el caso de río Hobo y Zapata muestran una vulnerabilidad muy alta; los ecosistemas presentes en dichas desembocaduras ya han sido nombrados como vulnerables al aumento del nivel del mar (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2001).

La composición geomorfológica de la región, descrita por Correa y Vernet (2004), indica que Volcán de Lodo, río Hobo y Zapata forman parte de un sistema de “costa abierta” y su morfología es dominada por terrazas marinas emergidas. Por el contrario, punta Las Vacas forma parte de un sector de costa “semiprottegida”, dominada por terrazas marinas bajas interrumpidas por las playas, cordones de playa y espigas.

where the levels start at 5.3 ± 1.3 mm/year (Torres- Parra, 2008), or with the Gulf of Mexico, where these values start at 1.8 ± 9.2 mm/year (Zavala *et al.*, 2011). One of the only works that specifically dealt with the variation in the mean sea level in the study area reports an increase of ~ 19.4 mm/year for the period between 2011 and 2015 (Londoño and Murillo, 2018). However, the impacts are not the same in all coasts, given that there are different processes such as natural subsidence, sediment contributions, high human pressure, and protected zones with coastal infrastructures such as geotubes, breakwaters, and jetties. In the particular case of the southern Caribbean, a land subsidence in the order of 4 mm/year is reported in the coastal terraces, which is due to sedimentation and compressive tectonics (Blanco-Libreros, 2016). Other opinions with regard to the Caribbean Sea basin conclude that it seems to be dominated by subbasins and local processes, and, therefore, global and even regional estimations are not sufficient for providing planning and coastal protection guidelines or for estimating the coastal vulnerability in light of the sea level change (Torres-Parra and Tsimplis, 2013).

None of the studied sites obtained a low vulnerability given the high erosion rates of the last decades, which may also be an indicator of the sea level rise in this area. If said rise continues until it reaches ~ 65 cm in 2100 (Nerem *et al.*, 2018), it is likely that the herein analyzed coasts will be drastically eroded.

On the other hand, the coastline recessions in the studied area vary between 4 and 9.8 m/year. These values are similar to the 2.5-11 m/year obtained for the coast of Tabasco, Mexico (Hernández *et al.*, 2008). Caleta Portales, Chile, recorded a 12.6 m recession between 2004 and 2016, which was caused by a slight coastal change (Martínez *et al.*, 2018). In the case of Hobo River and Zapata, the river mouths show a very high vulnerability; the ecosystems of said river mouths have already been found to be vulnerable to the sea level rise (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2001).

The geomorphological composition of the region, as described by Correa and Vernet (2004), indicates that Volcán de Lodo, Hobo River, and Zapata are part of an “open coast” system and that their morphology is dominated by emerged marine terraces. On the contrary, Punta Las Vacas is part of a “semi-protected” coast sector, which is dominated by low marine terraces that are interrupted by beaches, beach strands, and spits.

Registros históricos en Volcán de Lodo relatan problemas erosivos desde la década de 1960, con la desaparición cercana de la península punta Rey, desencadenando una secuencia de procesos erosivos que alcanzaron tasas de erosión desde 7 a 40 m/año y retrocesos de la línea de costa del orden de los 50 a 100 m (Correa y Vernet, 2004). La erosión en este sector está influenciada por dos factores principalmente. El primero es el efecto de los vientos alisios, que llegan a la región en la época seca, provocando un fuerte oleaje que erosiona la zona y se evidencia en la formación de cárcavas y bahías; Toro *et al.* (2019) sugieren que la dirección e intensidad del viento en diferentes épocas climáticas del año modulan la circulación en las zonas estudiadas, siendo más significativas las variaciones de la circulación a nivel espacial, y establecen que las condiciones del oleaje se deben analizar en tres zonas dentro del golfo de Urabá: norte, centro y sur, debido a las particulares de cada una.

El otro proceso erosivo corresponde a la acción de las aguas de escorrentía y aguas subterráneas, generando un lavado del material sedimentario y en ocasiones hundimiento del terreno y deslizamientos de masa por reptación; particularmente en verano, al estar compuesto principalmente por arcillas expansivas, los terrenos se contraen por el calor intenso, abriendo grietas por la evaporación del agua, mientras que en invierno se expanden precisamente por las lluvias se infiltran por las grietas a la vez que empeoran el terreno, ocasionando una pérdida considerable de sedimentos (Serna, 2020). Estos retrocesos han ocasionado pérdidas de viviendas, cultivos y sectores turísticos, impactando la economía de los pobladores. La actual preocupación y más urgente es la del Volcán de Lodo, el cual se encuentra en un talud con altos procesos erosivos por acción del oleaje y escorrentía, el DAPARD ha tomado acciones en 2020 con la construcción de tres tómbolos, con los cuales se pretende mitigar el impacto erosivo en este sector y fortalecer su actividad turística.

Por su parte, en punta Las Vacas, su estado de vulnerabilidad se corresponde con ser el lugar que registra mayor erosión costera. Las velocidades de erosión desde 1940 se relacionan directamente con el desarrollo al norte de la espiga del delta del río Turbo, cuya desembocadura al interior de la bahía de Turbo fue desviada artificialmente en 1954. Este proceso erosivo se intensificó gradualmente hasta afectar a la totalidad de las playas y generar retrocesos de la línea de costa estimados en alrededor de 70 m en algunos sectores (Correa y Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2005), mientras se producía una intensa aggradación en el nuevo lóbulo de desembocadura del delta (Alcántara-Carrió *et al.*, 2019).

Historical records of Volcán de Lodo report erosive problems since the 1960s, with the near disappearance of the Punta Rey peninsula, thus unfolding a sequence of erosive processes that reached erosion rates from 7 to 40 m/year and coastline recessions in the order of 50-100 m (Correa and Vernet, 2004). Erosion in this sector is influenced by two main factors. The first is the effect of the trade winds arriving to the region during the dry season, thus causing strong waves that erode the area, which are evidenced by the formation of gullies and bays. Toro *et al.* (2019) suggest that the direction and intensity of the wind in different climate epochs of the year modulate circulation in the studied areas, where variations in circulation at a spatial level are more significant. The authors state that the wave conditions should be analyzed in three zones within the Gulf of Urabá: north, center, and south (in light of the particularities of each one).

The other erosive process corresponds to the action of runoff and underground waters, which generate a sediment material wash and, at times, land subsidence and creeping mass slides. This happens particularly during the summer; as they are mainly composed of expansive clays, the soils contract due to intense heat, causing cracks due to water evaporation. On the other hand, during winter, they expand precisely because of the rains infiltrating the cracks as they worsen the terrain, which generates a considerable loss of sediments (Serna, 2020). These recessions have caused the loss of households, crops, and touristic sectors, thus affecting the inhabitants' economy. The current and most dire concern is that of Volcán de Lodo, which is within a slope with high erosive processes due to wave and runoff activity. The DAPARD took action in 2020 with the construction of three sandbanks, with which it intends to mitigate the erosive impact in this sector as well as to strengthen its touristic activity.

In turn, the vulnerability status of Punta Las Vacas corresponds to the fact that it is the place that reports the highest coastal erosion. Since 1940, its erosion rates are directly related to the development of the spike of the Turbo river delta in the north, whose river mouth within the Turbo bay was artificially diverted in 1954. This erosive process gradually intensified until it affected the entirety of the beaches and generated coastline recessions estimated to be around 70 m in some sectors (Correa and Vernet, 2004; Correa *et al.*, 2005) while an intense aggrading at the new lobe of the delta outlet took place (Alcántara-Carrió *et al.*, 2019).

Debido a la presencia de deltas en los sitios estudiados, se recomienda que para el análisis de la variable pendiente se realicen mediciones en diferentes épocas, en vista de que estos pueden influir significativamente en el cálculo del estado de la vulnerabilidad. Por último, el golfo de Urabá tiene un régimen micromareal y de tipo semidiurno (Restrepo y Correa, 1994). Los rangos de marea grandes, de forma contraria, disipan la energía del oleaje, limitando la erosión activa a los periodos de marea alta (Gornitz *et al.*, 1994). Por otro lado, Ramos *et al.* (2016), en su estudio de las costas mexicanas de régimen micromareal, considera que esta variable no es influyente dentro del IVC y en cierto modo podría ser omitida o reemplazada por otra.

CONCLUSIONES

Las variables físicas oleaje, ascenso del nivel del mar y rango mareal, tienen poca variabilidad debido a la corta longitud de los tramos de línea de costa estudiados. La variable que incide en menor medida en el índice de vulnerabilidad costera es el oleaje, mientras que el rango mareal y el ascenso del nivel del mar fueron más significativas.

De acuerdo con el IVC, las áreas que presentan una mayor vulnerabilidad son consistentes con las altas tasas de cambio de la línea de costa y desembocaduras de ríos. El 85 % de las líneas de costa incluidas en este estudio tienen vulnerabilidades entre muy altas y altas. Las áreas costeras con niveles de vulnerabilidad media se asocian a obras de protección costera.

La vulnerabilidad del suroccidente del Caribe colombiano ante el incremento del nivel del mar es evidente. Los mapas mostrados en este documento indican dónde se están presentando los cambios físicos en la línea de costa a medida que el nivel del mar continúa aumentando. A futuro, la adaptación de esta metodología con información más continua proporcionará datos más precisos de los impactos proyectados y será la base para entender las modificaciones del litoral y de esa manera planificar estrategias y tomar decisiones en el mediano y largo plazo.

Por tanto, los resultados de vulnerabilidad generados sólo evalúan la “susceptibilidad” ante el aumento del nivel del mar y no la magnitud, ni la probabilidad de ocurrencia del mismo, ni en modo alguno intentan cuantificar daños o costos. Se sugiere continuar con estudios más detallados en esta área para una evaluación de los riesgos e impactos asociados al aumento del nivel del mar.

Given the presence of deltas at the studied sites, it is recommended that measurements be made at different times in order to analyze the slope variable, as they can significantly influence the calculations regarding the vulnerability status. Finally, the Gulf of Urabá has a microtidal, semidiurnal regime (Restrepo and Correa, 1994). On the contrary, major tidal ranges dissipate the wave energy, thus limiting active erosion to high-tide periods (Gornitz *et al.*, 1994). On the other hand, in their study on Mexican coasts with microtidal regimes, Ramos *et al.* (2016) believe that this variable has no influence on the CVI and that it could somehow be omitted or replaced by another one.

CONCLUSIONS

The physical wave activity, sea level rise, and tidal range variables show little variability due to the shortness of the studied coastline sectors. The variable with the least incidence on the coastal vulnerability index is wave activity, whereas the tidal range and the sea level rise were the most significant.

According to the CVI, the areas of higher vulnerability are consistent with the high coastline change rates and the river mouths. 85 % of the coastlines included in this study have high to very high vulnerabilities. The coastal areas with medium vulnerability levels are associated with coastal protection works.

The vulnerability of the southwestern Colombian Caribbean to the sea level rise is evident. The maps shown in this document indicate where the physical changes within the coastline are taking place as the sea level continues to rise. In the future, adapting this methodology with more continuous information shall provide more accurate data on predicted impacts, and it will be the basis for understanding the littoral modifications, so that strategies can be planned and decisions can be made in the medium and long term.

Therefore, the results obtained regarding the vulnerability of these sites only evaluate their “susceptibility” to the sea level rise, not its magnitude or likelihood, and they do not attempt to quantify damages or costs in any way. We suggest proceeding with more detailed studies in this area for an evaluation of the risks and impacts associated with the sea level rise.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia” coordinado por la Universidad de Antioquia y la Gobernación de Antioquia.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is a contribution to the project Research for the reversal of the erosion process in the coasts of the Antioquia Sea, coordinated by Universidad de Antioquia and the Governorship of Antioquia.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Abuodha, P. A. and C. D. Woodroffe. 2010. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. *J. Coast. Cons.*, 14: 189-205. <https://doi.org/10.1007/s11852-009-0042-2>.
- Alcántara-Carrió, J., A. Caicedo, J. C. Hernández, A. Jaramillo-Vélez and R. P. Manzolli. 2019. Sediment bypassing from the new human-induced lobe to the ancient lobe of the Turbo Delta (Gulf of Urabá, Southern Caribbean Sea). *J. Coast. Res.*, 35:196-209. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00221.1>
- Allen, J.C. and P.D. Komar. 2006. Climate controls on US west coast erosion processes. *J. Coast Res.*, 22: 51 –529. <https://doi.org/10.2112/03-0108.1>.
- Aristizábal, O. C., M. J. Betancur y C. I. Vásquez. 1990. Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necocli-Golfo de Urabá (Antioquia-Colombia). Tesis Geología, Univ Eafit, Medellín. 119 p.
- Blanco Libreros, J. F. 2016. Cambios globales en los manglares del golfo de Urabá (Colombia): entre la cambiante línea costera y la frontera agropecuaria en expansión. *Actual. Biol.*, 38 (104): 57-70. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.acbi.v38n104a06>.
- Boruff, B.J., C. Emrich and S.L. Cutter. 2005. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *J. Coast Res.*, 932–942.
- Corpourabá. 2019. Variación de nivel del mar en el golfo de Urabá. Inf. técnico, Apartadó (Ant.). 38 p.
- Corpourabá - Universidad EAFIT. 2015. Informe final de actuaciones experimentales en los sectores de zapata y capitanía del puerto. Inf. final, Corpourabá – Univ. EAFIT, Medellín 190 p.
- Corpourabá - Universidad Nacional de Colombia. 1998. Evaluación de zonas de erosión críticas en el litoral Caribe antioqueño. Inf. final, Posgrado Aprovechamiento Recursos Hidráulicos, Medellín, 199 p.
- Correa I.D. and J.P. Paniagua-Arroyave. 2016. The Arboletes-Punta Rey Littoral, Southern Caribbean coast: 55-63. In *Landscapes and Landforms of Colombia*. Springer.
- Correa, I.D. y G. Vernet. 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa Caribe colombiana. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 33:7-28. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2004.33.0.245>.
- Correa, I.D., J. Alcántara-Carrió and D.A. González. 2005. Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean coast. *J. Coast. Res.*, 52-57. www.jstor.org/stable/25737404
- Correa, I.D., S. Acosta y G. Bedoya. 2007. Análisis de las causas y monitoreo de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba. Corp. Autón. Valles del Sinú y San Jorge (CVS) – Univ. EAFIT, Medellín. 33-128.
- Diez, P.G., G.M.E. Perillo and C.M. Piccolo. 2007. Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province. *J. Coast. Res.*, 23:119–126. <https://doi.org/10.2112/04-0205.1>
- Dolan, R., B.P. Hayden, P. May and S.K. May. 1980. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48: 22–29.
- Doukakis, E. 2005. Coastal vulnerability and risk parameters. *Eur Water*, 11: 3–7.
- Escobar, S. 2011. Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 40: 327-346.
- Fernández, J.M., G.R. Bértola y A.M. Campo. 2018. Aplicación del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) a los barrios costeros del partido de Mar Chiquita, Buenos Aires, Argentina. *Geoacta*, 42 :13-23.
- Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia. 2018. Informe del componente topobatimétrico. Volcán de Lodos, municipio de Arboletes. Inf. final, Univ. Antioquia, Turbo. 27 p.
- Gornitz, V. 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 89:379 – 398. doi:10.1016/0031-0182(91)90173-O.
- Gornitz, V. and P. Kanciruk. 1989a. Assessment of global coastal hazards from sea level rise Coastal Zone 89, Proc. 6th Symp. Coast. Ocean Manag. /ASCE, 1345-1359.
- Gornitz, V. and P. Kanciruk. 1989b. Assessment of global coastal hazards from sea-level rise. Proceedings of the 6th Symp. Coast. Ocean Manag. Charleston, South Carolina, 1345-1359.
- Gornitz, V. M., R. C. Daniels, T. W. White and K. R. Birdwell. 1994. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the US southeast. *J. Coast. Res.*, 327-338. <http://www.jstor.org/stable/25735608>.



- Gutiérrez, B. T., S. J. Williams and E. R. Thieler. 2009. Basic approach for shoreline change projections. Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: A Focus on the MidAtlantic Region. Report US Climate Change Sci. Progr. Subcom. Global Change Res.. US Environ. Protect. Ag., Washington DC, 239-242.
- Hernández Santana, J. R., M. A. Ortiz Pérez, A. P. Méndez Linares, y L. Gama Campillo. 2008. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Invest. Geogr.*, 65: 7-21.
- Higuaita, M. y R.A. Quintana. 2020. Modulación de las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá a partir de la onda de marea. Tesis Oceanogr. Ing Oceanografía, Univ. Antioquia, Turbo. 55 p.
- Invenmar. 2003. Programa holandés de asistencia para estudios en cambio climático: Colombia. definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe, insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. resumen ejecutivo. Rep. Técn., Invenmar, Santa Marta. 103 p.
- IPCC. 2014. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ., Cambridge and New York. 16 p.
- IPCC. 2019. Technical Summary. Spec. Rep. Oc. Cryosph. Changing Climate. 38 p.
- Koroglu, A., R. Ranasinghe, J. A. Jiménez and A. Dastgheib. 2019. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province. *Oc. Coast. Manag.*, 178 p.
- Londoño, G. y E. Murillo. 2018. Variabilidad espacio-temporal del nivel del mar en la costa del Caribe colombiano. Tesis Ing Oceanogr., Univ. Antioquia, Turbo. 41 p.
- López Royo, M., R. Ranasinghe and J. A. Jiménez. 2016. A rapid, low-cost approach to coastal vulnerability assessment at a national level. *J. Coast. Res.*, 32: 932-945.
- Martínez, C., M. Contreras-López, P. Winckler, H. Hidalgo, E. Godoy and R. Agredano. 2018. Coastal erosion in central Chile: A new hazard?. *Oc. Coast. Manag.*, 156: 141 – 155: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011>
- Montoya, L. J. y M. Toro. 2006. Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el golfo de Urabá, Colombia. *Avan. Rec. Hidrául.*, 13: 37-54.
- Nageswara Rao K., P. Subraelu, T. Venkateswara Rao, B. Hema Malini, R. Ratheesh, S. Bhattacharya, A.S. Rajawat and Ajai. 2008. Sea-level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast India through remote sensing and GIS. *J. Coast. Conserv.*, 12:195–207. <https://doi.org/10.1007/s11852-009-0042-2>.
- Nerem, R. S., B. D. Beckley, J. T. Fasullo, B. D. Hamlington, D. Masters and G. T. Mitchum. 2018. Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 115: 2022-2025.
- Ojeda, J., J. I. Álvarez, D. Martín y P. Fraile. 2009. El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *GeoFocus. Rev. Internal. Cienc. Tecnol. Inf. Geogr.*, 9: 83-100.
- Özyurt, G. and A. Ergin. 2010. Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers. *J. Coast. Res.*, 26: 265-273.
- Paniagua Arroyave, J. F. 2013. Migración histórica actualizada y predicción de la posición de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral antioqueño, considerando escenarios de ascenso del nivel del mar. Tesis Doctoral, Depart. Geol., Univ. EAFIT, Medellín, 88 p.
- PDM (Plan de Desarrollo Municipal). 2008-2011. Alcaldía de Arboletes (Antioquia). Porque el desarrollo es tarea de todos. Informe final, Arboletes. 282 p.
- PDM (Plan de Desarrollo Municipal). 2012-2015. Alcaldía de Arboletes (Antioquia). Unidos por el futuro que queremos. Informe final, Arboletes. 181 p.
- PDM (Plan de Desarrollo Municipal). 2016-2019. Alcaldía de Arboletes (Antioquia). Pensando en grandes acciones para consolidar la paz. Informe final, Arboletes. 205 p.
- Posada, B. y W. Henao. 2008. Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. Invenmar. Serie Publicaciones Especiales No. 13. Santa Marta. 200 p.
- Prussmann, J. 2011. Nuevos elementos para el manejo integrado de la región de Urabá, costa Caribe colombiana. Base de datos espacial geomorfológica de la franja litoral de los departamentos de Antioquia y Chocó. Tesis maestría, Ciencias Tierra, Dep. Geología Univ. Eafit, Medellín. 91 p.
- Ramos Reyes, R., L. M. Gama Campillo, J. C. Núñez Gómez, R. Sánchez Hernández, H. Hernández Trejo, y O. Ruíz Álvarez. 2016. Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático. *Rev. Mex. Cienc. Agr.*, 7: 2551-2563.
- Rangel-Buitrago, N. G. and G. Anfuso. 2009. Assessment of coastal vulnerability in la Guajira Peninsula, Colombian Caribbean Sea. *J. Coast Res.*, 792-796.
- Rangel-Buitrago, N.G. y B. O. Posada-Posada. 2013. Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio en la línea de costa. *Intrópica*, 8: 29-42.
- Rangel-Buitrago, N. G., G. Anfuso and A. T. Williams. 2015. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: magnitudes, causes and management. *Oc. Coast. Manag.*, 129-144.

- Restrepo, J. e I.D Correa. 1994. Aspectos generales sobre el estado actual de conocimiento de la franja costera del Pacífico colombiano. Mem. Taller Expertos Estado Conocimiento Lineamientos Estrategia Nacional Biodiversidad Ecosistemas Marinos Costeros, Minca-Magdalena. CCO/ENB/COLCIENCIAS, Santafé de Bogotá, 311 p.
- Serna Urrea, G. 2020. Erosión costera, memorias ilustradas. Save, Arboletes. 140 p.
- Shaw, J., R.B. Taylor, D.L. Forbes, M.H. Ruz and S. Solomon. 1998. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. *Geol. Surv. Can.*, 505: 1–79.
- Thieler, E.R. and E.S. Hammar-Klose. 1999. National assessment of coastal vulnerability to sea level rise: preliminary results for the U.S. USGS Open File Rep., 99–593.
- Thieler, E. R., Williams, S. J. and R. Beavers. 2002. Vulnerability of U. S. National Parks to Sea – Level Rise and Coastal Change. U. S. Geological Survey, Woods Hole, MA, 2.
- Thieler, E.R., E.A. Himmelstoss, J.L. Zichichi and T.L. Miller. 2005. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0. In: US Geological Survey (Ed.), An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. USGS, Woods Hole, 33-56.
- Toro, V. G., W. Mosquera, N. Barrientos e Y. Bedoya. 2019. Circulación oceánica del Golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Bol. Cient. CIOH*, 38(2), 26-35.
- Torres, R. R. and M. N. Tsimplis. 2013. Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.: Oc.*, 118: 2934-2947.
- Torres-Parra, R. R., L. J. O. Díaz, F. A. Franco y L. M. Rocha. 2008. Comportamiento del nivel del mar en el litoral Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 26: 8-21.
- Vafeidis, A., R.J. Nicholls, L. McFadden, R. Tol, J. Hinkel, T. Spencer, P. S. Grashoff, G. Boot and R. Klein. 2008. A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea- level rise. *J. Coast. Res.*, 4: 917-924.
- Vallejo Toro, P.P., L.F.V. Bedoya, I.D. Correa, R.B.F. Gladys, J. Alcántara-Carrió and J.A. Palacio Baena. 2016. Impact of terrestrial mining and intensive agriculture in pollution of estuarine surface sediments: spatial distribution of trace metals in the Gulf of Urabá, Colombia. *Mar. Poll. Bull.*, 111: 311-320.
- Vernette, G., A. Mauffret, C. Bobier, L. Briceno and J. Gayet. 1992. Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian margin. *Tectonophysics*, 202: 335-349.
- Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey, 2011. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 315-334. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (segunda edición). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, unam-icmyl, Universidad Autónoma de Campeche. 754 p.

RECIBIDO/RECEIVED: 22/10/2020

ACEPTADO/ACCEPTED: 16/02/2022