

FACTORES DETERMINANTES DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD POR EROSIÓN COSTERA EN COLOMBIA

DETERMINING FACTORS OF THE HAZARD AND VULNERABILITY BY COASTAL EROSION IN COLOMBIA

Sra. Constanza Ricaurte-Villota¹, Sr. Eduardo Santamaría-del-Ángel², Sr. Oswaldo Coca-Domínguez¹, Sr. David Fernando Morales-Giraldo¹ y Sr. Marco González-Arteaga¹

RESUMEN

La línea de costa a lo largo del mundo y de Colombia presenta una tendencia al retroceso, con impactos significativos sobre las comunidades y ecosistemas locales. Para abordar esta problemática se propuso incluirla en la gestión del riesgo de desastres, que parte del conocimiento para tomar medidas correctivas y prospectivas, siendo el análisis de amenaza y vulnerabilidad el insumo principal, y la evaluación de sus componentes relevante para la mitigación. Para este estudio se analizó la dominancia de cada componente de la evaluación de amenaza (Ocurrencia, Magnitud y Susceptibilidad) y vulnerabilidad (Elementos Expuestos, Fragilidad y Falta de Resiliencia) propuesta por Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota (2019), usando análisis de componentes principales. Los resultados muestran que el factor determinante de la amenaza por erosión en la región Pacífico y Caribe Insular es la ocurrencia, lo que puede estar condicionado por la tendencia generalizada al retroceso de la línea de costa en estas zonas, mientras que, en la región Caribe continental, es la susceptibilidad, lo que se explica por las características geológicas y geomorfológicas de esta costa. Por su parte, en la región Caribe continental e Insular la vulnerabilidad está determinada por la Falta de Resiliencia, explicada por la pérdida de conocimiento tradicional y ecosistemas, y en la región Pacífico está determinada por la fragilidad, principalmente social, económica e institucional.

Palabras clave: Geoamenazas costeras, Gestión del riesgo, resiliencia, conocimiento tradicional.

ABSTRACT

The coastline throughout the world and Colombia shows a retreat trend, with significant impacts on local communities and ecosystems. To address this problem, it was proposed to include it in disaster risk management, an approach to address disaster risk by processes, based on knowledge to take corrective and prospective measures, being the hazard and vulnerability analysis the main input, and the evaluation of its components relevant for the proposal of mitigation alternatives. For this study, the dominance of each component of the hazard assessment (Occurrence, Magnitude and Susceptibility) and vulnerability (Exposed Elements, Fragility and Lack of Resilience) proposed by Coca-Dominguez and Ricaurte-Villota (2019) was analyzed using principal component analysis. The results show that the determining factor of the erosion hazard in the Pacific and the Caribbean Insular region is the Occurrence, which may be conditioned by the generalized trend of coastline retreat in these zones, while in the continental Caribbean region, it is Susceptibility, which is explained by the geological and geomorphological characteristics of this coast. For its part, in the continental and insular Caribbean region, vulnerability is determined by the Lack of Resilience, explained by the loss of traditional knowledge and ecosystems, and in the Pacific region it is determined by Fragility, mainly social, economic and institutional.

Key words: Coastal geohazards, risk management, resilience, traditional knowledge.

¹ Programa de Geociencias Marinas y Costeras, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR, Santa Marta, Colombia

² Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada Baja California México.

INTRODUCCIÓN

La línea de costa a lo largo del mundo y de Colombia muestra una tendencia al retroceso (erosión) en las últimas tres décadas (Mentaschi et al. 2018; Gutierrez-Valderrama et al. 2017), la cual puede verse amplificada por la degradación de los ambientes costeros, lo que consecuentemente aumenta los efectos de las olas y de fenómenos extremos en las costas, y por la aceleración del aumento relativo del nivel del mar y la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos debido al calentamiento global (Mentaschi et al. 2018). Este proceso erosivo tiene impactos significativos sobre las comunidades y los ecosistemas de los que estas dependen (Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019b).

Para abordar esta problemática se ha propuesto incluir a la erosión costera, dentro de la gestión del riesgo de desastres, un enfoque para abordar el riesgo de desastres naturales por procesos, que combina, a través de una perspectiva de manejo, el concepto de prevención, mitigación y preparación con respuesta (Baas et al. 2009). La evaluación del riesgo por desastres naturales es una herramienta valiosa para la gestión costera, ya que permite la identificación de zonas susceptibles a un determinado problema medioambiental (Merlotto, Bértola y Piccolo 2016). La gestión del riesgo se basa en el conocimiento para tomar medidas prospectivas y correctivas frente a cada fenómeno, siendo el análisis de amenaza y vulnerabilidad el insumo principal (Ricaurte-Villota et al. 2018).

El análisis de amenaza por erosión costera ha sido abordado en diferentes estudios a lo largo del mundo, en especial los de evaluación del riesgo por erosión costera (Aydin y Uysal 2014; Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019b; Barillá et al. 2021; Merlotto, Bértola y Piccolo 2016; Ricaurte-Villota et al. 2018). La mayoría de estos estudios plantea la evaluación de amenaza a través de índices que incluyen factores representativos que afectan el proceso de erosión costera (Barillá et al. 2021; Merlotto, Bértola y Piccolo 2016; Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019b), aunque no existe actualmente una metodología estandarizada que tenga en cuenta todos los factores que influyen en la dinámica costera (Barillá et al. 2021).

Por su parte, la evaluación de la vulnerabilidad a la erosión de una zona costera, ha sido abordada más ampliamente, en especial se ha utilizado el índice de vulnerabilidad costera (CVI, por sus siglas en inglés) (Gornitz et al. 1994; McLaughlin, McKenna y Cooper 2002), usado y adaptado por muchos otros autores (Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019b; Koroglu et al. 2019; Narra, Coelho y Sancho 2019; Rangel-Buitrago, Neal y de Jonge 2020), implementando diferentes grupos de criterios, que incluyen, entre otros, la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación de las costas. El CVI es una herramienta que contribuye a la toma de decisiones, la planificación y ordenamiento y la gestión costera integrada (Alexandrakis y Poulos 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, la evaluación de los componentes de la amenaza y la vulnerabilidad es relevante para la descripción de la dinámica de cada zona y el planteamiento de alternativas de solución, por lo que el presente estudio tiene como objetivo definir qué factor es determinante para la amenaza y cuál para la vulnerabilidad por erosión costera en cada una de las regiones costeras de Colombia. Para esto se analizó la dominancia de cada uno de los componentes de la evaluación de amenaza (Ocurrencia, Magnitud y Susceptibilidad) y vulnerabilidad (Elementos Expuestos, Fragilidad y Falta de Resiliencia) propuestos por Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota (2019b), basados en una aproximación de Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés). El uso de esta aproximación permite conocer patrones de asociación, así como tendencias, estructura y covariabilidad de los datos y ha sido usado ampliamente en las geociencias (Kain et al. 2015; Santamaría-del-Ángel et al. 2019; 2021).

En la amenaza, la Ocurrencia atiende a la frecuencia con la que sucede la erosión costera; la Magnitud está dada por el nivel de energía de los distintos fenómenos que inciden en la zona costera, y la Susceptibilidad se define como la tendencia o predisposición a una determinada amenaza. Por su parte en la vulnerabilidad, los Elementos Expuestos corresponden al nivel de exposición que tienen los elementos en la costa; la Fragilidad se debe a la debilidad intrínseca de cada elemento expuesto y está conformada por seis dimensiones: física, social, económica, ecológica, cultural e institucional, y la Falta de Resiliencia se puede

definir como el nivel de asimilación y adaptabilidad o la capacidad de absorción, preparación y recuperación que puedan tener un individuo, grupo o sistema frente al impacto de un peligro (Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019b).

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO.

Colombia está ubicada en el extremo Noroeste de América del Sur, posee territorio en las costas del Océano Pacífico y el Mar Caribe (Figura 1). La longitud total de las dos costas del país es de 6.962 km, de los cuales 2.253 km se encuentran en el Caribe y 4.708 km en el Pacífico (INVEMAR 2021). Además, dentro de su área insular se encuentra el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, localizado en el Mar Caribe. Se caracteriza por tener un sistema tipo meso a macromareal en la costa del Pacífico y una precipitación promedio anual acumulada de 7.609 mm (Ricaurte-Villota et al. 2018). Por su parte en el Caribe tiene un sistema micromareal, y la precipitación varía entre menos de 500 en La Guajira y 3500 mm en el Urabá, con un gradiente de incremento en dirección Norte – Sur ((Pabón-Caicedo, Eslava-Ramírez y Gómez-Torres 2001).

La geomorfología costera del Pacífico presenta costas abruptas con rocas cohesivas, ubicadas mayoritariamente al norte de Cabo Corrientes, mientras que las costas bajas se presentan en un 76% de toda la línea costera y están representadas por deltas, islas barreras, costas fangosas, bocas, esteros y playas, ubicándose principalmente desde Cabo Corrientes hasta la frontera sur con Ecuador (Posada, Henao-Pineda y Guzmán-Ospitia 2009). Por su parte, la región Caribe se caracteriza por presentar acantilados en el 25,4% de sus costas, formados por rocas metamórficas - cohesivas (Sierra Nevada de Santa Marta), rocas ígneas (en el Chocó) y rocas sedimentarias de origen calcáreo y terrígeno (Posada y Henao Pineda 2008). También existen depósitos recientes aluviales, coluviales, eólicos, fluviomarinos, lacustres y marinos (Posada y Henao-Pineda 2008). Dentro de las costas bajas existen sistemas deltaicos (Sinú, Atrato, río Magdalena y otros de menor tamaño), costas fangosas (bahía de Cispatá) y playas (Posada y Henao-Pineda 2008; Ricaurte-Villota et al. 2018).

En cuanto a los territorios insulares en el Caribe, estos se asocian a formaciones coralinas sobre rocas de origen volcánico, presentando así costas altas, caracterizadas por acantilados de rocas volcánicas y volcano-sedimentarias (Providencia y Santa Catalina) y rocas calcáreas (San Andrés) (Posada, Henao-Pineda y Morales 2011).

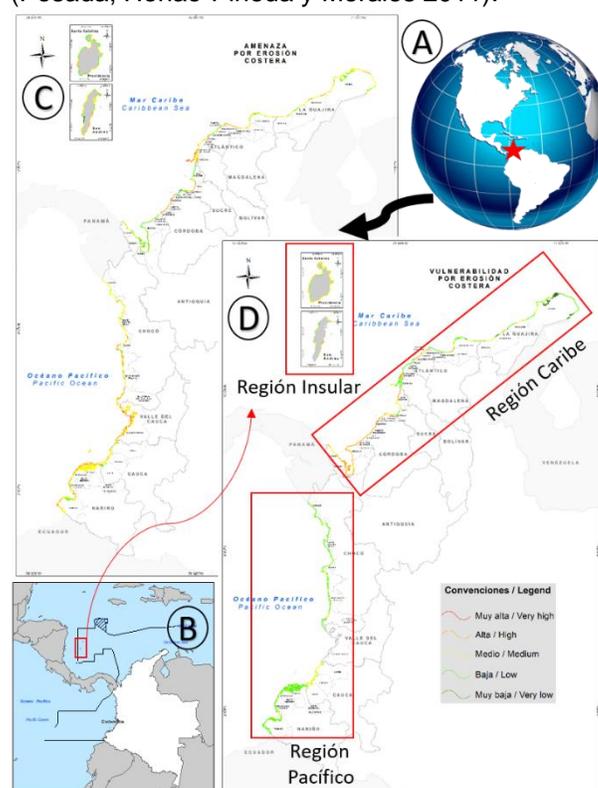


Figura 1: Área de estudio. a) muestra la ubicación de Colombia en el mundo; b) Colombia con su territorio continental, costero y oceánico, en el océano Pacífico y el Mar Caribe; el recuadro rojo muestra la localización del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; c) Mapa de amenaza por erosión costera para las dos costas y la zona insular (Ricaurte-Villota et al. 2018); d) Mapa de vulnerabilidad por erosión costera (Ricaurte-Villota et al. 2018), los recuadros rojos muestran en detalle a la región Caribe, Insular y Pacífico.

Un menor porcentaje de línea de costa presenta morfologías bajas en zonas de playas y áreas pantanosas con vegetación de manglar (Ricaurte-Villota et al. 2018). Aunque en el Pacífico colombiano también existe zona insular, que corresponde a Gorgona - Gorgonilla y la isla Malpelo, este estudio no contempla análisis para estas zonas ya que no se pudo obtener información completa de ellas. Adicionalmente, estas islas no

tienen asentamientos humanos, con excepción de los relacionados con la infraestructura de parques, lo que dificulta que su análisis de vulnerabilidad pueda ser comparado con el resto de las zonas costeras del país.

MÉTODOS

Con el fin de evaluar cuáles son los factores que determinan de mayor manera la amenaza y la vulnerabilidad por erosión para las zonas litorales de Colombia, se evaluó la contribución de cada uno de los componentes propuestos por Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota (2019b), para la evaluación de amenaza (Ocurrencia, Magnitud y Susceptibilidad), y de vulnerabilidad (Elementos Expuestos, Fragilidad y Falta de Resiliencia). El análisis fue realizado separando la zona costera por regiones (Pacífico, Caribe continental e Insular), teniendo en cuenta que éstas presentan diferencias geológicas, climáticas y socio-económicas. Se usaron los valores encontrados para cada estación (unidades homogéneas de análisis) del estudio realizado por Ricaurte-Villota et al. (2018).

Las estaciones corresponden a la segmentación de las unidades homogéneas, que son segmentos lineales de la costa divididos a partir de variables específicas que representan atributos físicos y socioeconómicos esenciales del sistema costero. Dichas variables fueron implementadas en (Bejarano-Espinosa, Ricaurte-Villota y Coca-Domínguez En Prensa) y tuvieron cuatro variables para la amenaza y cuatro para la vulnerabilidad.

Dependiendo del valor del índice de Amenaza y el de Vulnerabilidad, cada estación fue clasificada en 5 grupos de acuerdo con los criterios de la tabla 1. Posteriormente, se aplicó para cada región un Análisis Lineal de Discriminantes (LDA, por sus siglas en inglés) (Mitteroecker y Bookstein 2011) con el fin de trabajar solo con las estaciones que estuvieran bien clasificadas en los grupos de análisis. Lo que quiere decir, que se discriminen o separen lo máximo posible los grupos, asegurando que las combinaciones lineales de las p variables maximicen la varianza entre los grupos y minimicen la varianza dentro de ellos. Para este análisis se utilizaron las variables VR_O (Ocurrencia), VR_M

(Magnitud) y VR-S (Susceptibilidad), como variables descriptivas para la clasificación de amenaza. Mientras que para vulnerabilidad se usaron VR-E (Elementos Expuestos), VR_F (Fragilidad) y VR_R (Falta de Resiliencia).

Con las estaciones que quedaron bien clasificadas en cada región, se calculó para cada uno de los componentes de la clasificación las anomalías

Tabla 1: Escala utilizada para evaluar la amenaza y la vulnerabilidad por erosión costera. Elaboración propia.

ESCALA		Grupo
Muy Bajo	0 - 39	1
Bajo	40 - 79	2
Medio	80 - 119	3
Alto	120 - 159	4
Muy Alto	160 - 200	5

espaciales estandarizadas, según lo descrito en Santamaría-del-Ángel et al. (2019), usando una transformación Z (ecuación 1).

$$Z_{comp} = \frac{X - \bar{X}}{SD} \quad (1)$$

Para ver las co-variabilidades y asociaciones de las variables que definen la amenaza y la vulnerabilidad en cada región, a los datos de anomalías espaciales estandarizadas, se les aplicó un PCA en su resolución numérica, siguiendo los criterios de Santamaría-del-Ángel et al. (2011 y 2021), donde se utilizó la regla de Kaiser, seleccionando solo los componentes con eigenvalores mayores o iguales a 1 (Kaiser 1958; Yeomans y Golder 1982; Ferré 1995; Kanyongo 2005; Schreiber 2021).

Con base en el eigenanálisis de cada PCA por región se determinó la significancia global de la aproximación, tomando solo la variabilidad explicada acumulada por los componentes con eigenvalores mayores o iguales a 1.

Así mismo, para conocer el peso de la variable de clasificación se tomó la decisión de usar el máximo coeficiente de correlación de Pearson presentado por la variable de clasificación y los Componentes

Principales (PC, por sus siglas en inglés) significativos.

RESULTADOS

AMENAZA.

El análisis LDA para la amenaza (tabla 2) mostró que, del total de estaciones para las regiones Pacífico y Caribe Continental, solo estuvieron bien clasificadas el 71 y 79%, respectivamente. Por su parte, el 88% de las estaciones de la región Caribe Insular estuvieron bien clasificadas. Además, se encontró que tanto para el Pacífico como para el Caribe Continental no se encontraron estaciones en la categoría Muy Baja, mientras que para la zona Caribe Insular se presentó un comportamiento contrario, no se observó la categoría Muy Alta, estando presente la categoría Muy Baja, aunque corresponde solo a 2 estaciones.

Tabla 2: Resultados del Análisis Lineal de Discriminantes (LDA) para la amenaza en cada una de las regiones. Elaboración propia.

Pacífico				
	Grupo verdadero			
	Alta	Baja	Media	Muy Alta
Alta	451	0	466	5
Baja	4	339	76	0
Media	562	0	3373	19
Muy Alta	256	0	330	18
Total N	1273	339	4245	42
N correctos	451	339	3373	18
Proporción	0,354	1,000	0,795	0,429
<i>N = 5899 N correct, = 4181 Prop, correct = 0,709</i>				
Caribe Continental				
	Grupo verdadero			
	Alta	Baja	Media	Muy Alta
Alta	1388	36	352	0
Baja	105	2503	293	0
Media	145	200	975	0
Muy Alta	217	0	0	214
Total N	1855	2739	1620	214
N correctos	1388	2503	975	214
Proporción	0,748	0,914	0,602	1,000
<i>N = 6428 N Correct = 5080 Prop, Correct = 0,790</i>				
Caribe Insular				

	Grupo verdadero			
	Alta	Baja	Media	Muy Baja
Alta	20	0	11	0
Baja	0	90	7	0
Media	1	0	57	0
Muy Baja	0	4	0	2
Total N	21	94	75	2
N correctos	20	90	57	2
Proporción	0,952	0,957	0,760	1,000
<i>N = 192 N Correct = 169 Propor, Correct = 0,880</i>				

El eigenanálisis para la amenaza (tabla 3) mostró que sólo el primero de los tres componentes fue significativo (eigenvalores iguales o mayores a 1) en las tres regiones, contando para el 75,6, 59,1 y 63,6% de la variación total en la región Pacífico, Caribe Continental e Insular, respectivamente.

La resolución numérica del PCA (tabla 4), para los componentes de amenaza, muestra que en la región Pacífico y Caribe Insular la Ocurrencia (ZVR_O) tiene la más alta carga en las variables clasificatorias pero una relación inversa, mientras que en el Caribe Continental la Susceptibilidad (ZVR-S) tiene la más alta carga y co-varía con la Magnitud (ZVR_M).

Tabla 4: Resolución Numérica del análisis de componentes principales (PCA) para los componentes de la amenaza en cada una de las regiones. Elaboración propia.

Variables Clasificadoras	PC1	PC2	PC3
Región Pacífico			
ZVR_S	0,762	0,015	0,633
ZVR_M	-0,891	-0,381	-0,526
ZVR_O	-0,906	-0,905	-0,869
Región Caribe Continental			
ZVR_S	0,868	-0,072	0,492
ZVR_M	0,758	-0,542	-0,363
ZVR_O	0,667	0,710	-0,227
Región Caribe Insular			
ZVR_S	-0,342	0,828	0,169
ZVR_M	0,901	0,362	-0,575
ZVR_O	-0,976	-0,360	0,936

Los resultados muestran que el componente que determina la amenaza por erosión costera en el

Pacífico y la zona Caribe Insular es la Ocurrencia, definida como la frecuencia con la que sucede la erosión costera (Ricaurte-Villota et al. 2018; Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019b), aunque en relación inversa con la Susceptibilidad. Mientras que en el Caribe Continental la variable que determina en mayor medida la amenaza por erosión costera es la Susceptibilidad, definida por

los mismos autores como la tendencia o predisposición a una determinada amenaza, en función de sus características geológicas y geomorfológicas.

Tabla 3: Resultados del EigenAnálisis para evaluación de componentes principales (PCA) de la amenaza. Elaboración propia.

	Región Pacífico			Región Caribe Continental			Región Caribe Insular		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
EigenValor	2,267	0,566	0,167	1,773	0,802	0,425	1,909	0,917	0,174
Proporción	0,756	0,189	0,056	0,591	0,267	0,142	0,636	0,306	0,058
Proporción Acumulativa	0,756	0,944	1,000	0,591	0,858	1,000	0,636	0,942	1,000

Tabla 5: Resultados del Análisis Lineal de Discriminantes (LDA) para la vulnerabilidad en cada una de las regiones. Elaboración propia.

Pacífico					
Grupo verdadero					
	Alta	Baja	Media		
Alta	43	0	27		
Baja	0	223	73		
Media	0	5	839		
Total N	43	228	939		
N correctos	43	223	839		
Proporción	1.000	0.978	0.894		
N = 1210 N correct. = 1105 Prop. correct = 0.913					
Caribe Continental					
Grupo verdadero					
	Alta	Baja	Media	Muy Alta	Muy Baja
Alta	3595	0	104	0	0
Baja	0	307	121	0	0
Media	486	2	554	0	0
Muy Alta	110	0	3	3	0
Muy Baja	0	21	0	0	17
Total N	4191	330	782	3	17
N correctos	3595	307	554	3	17
Proporción	0.858	0.930	0.708	1.000	1.000
N = 5323 N Correct = 4476 Prop. Correct = 0.841					
Caribe Insular					
Grupo verdadero					
	Baja	Media			
Baja	18	6			

Media	2	78
Total N	20	84
N correctos	18	78
Proporción	0.900	0.929

N = 104 N Correct = 96 Propor. Correct = 0.923

VULNERABILIDAD.

El análisis LDA para la vulnerabilidad (tabla 5) mostró una mayor proporción de estaciones bien clasificadas para todas las zonas. Para la región Pacífico y Caribe Insular fue de 91 y 92%, respectivamente, mientras que para la región Caribe Continental las estaciones bien clasificadas corresponden al 84%. Adicionalmente, la clasificación mostró ser homogénea para la zona Caribe Insular y Pacífico, presentándose solo 2 y 3 categorías, respectivamente. Para la región Caribe Continental se observó mayor heterogeneidad en la clasificación, observándose las 5 categorías, aunque pocas estaciones están en las categorías Muy Alta (3) y Muy Baja (17).

El eigenanálisis para la vulnerabilidad (tabla 6) mostró que sólo en la región Caribe Continental el primer componente principal es significativo (valores iguales o mayores a 1), contando para el 65,7 % de la variación total, mientras que en la región Pacífico y Caribe Insular los componentes 1 y 2 son significativos, contando para el 77,7 y 85,2% de la variación total, respectivamente.

La resolución numérica del PCA (tabla 7) señala que en la región Caribe Insular los componentes de Exposición (ZVR-E) y Fragilidad (ZVR-F) están en una dimensión (PC2), mientras que la Falta de Resiliencia (ZVR-R) está en el PC1 (otra dimensión). En la región Pacífico ocurre igual, ZVR-F y ZVR-R están en el PC1, pero ZVR-E se encuentra en el PC2, es decir en otra dimensión. En la región Caribe continental todas las variables

están en la misma dimensión (PC1), pero se observa una relación inversa con ZVR-R.

La vulnerabilidad en el Caribe Continental e Insular está determinada principalmente por la Falta de Resiliencia, teniendo en el Caribe Continental una relación inversa con los otros componentes. Por su parte, en el Pacífico está determinada por la Fragilidad, aunque los Elementos Expuestos tienen un alto peso en la vulnerabilidad, pero no tiene relación con los otros componentes.

Tabla 7: Resolución Numérica del análisis de componentes principales (PCA) para los componentes de la vulnerabilidad en cada una de las regiones. Elaboración propia.

Variables Clasificadoras	PC1	PC2	PC3
Región Pacífico			
ZVR-E	-0,283	0,955	-0,092
ZVR-F	0,807	0,092	-0,583
ZVR-R	0,786	0,249	0,566
Región Caribe Continental			
ZVR-E	0,768	0,596	-0,235
ZVR-F	-0,792	0,525	0,312
ZVR-R	-0,869	0,048	-0,492
Región Caribe Insular			
ZVR-E	-0,558	0,744	-0,369
ZVR-F	0,588	0,714	0,380
ZVR-R	0,870	-0,006	-0,493

Tabla 6: Resultados del EigenAnálisis para evaluación de componentes principales (PCA) para la vulnerabilidad. Elaboración propia.

Región Pacífico			Región Caribe Continental			Región Caribe Insular		
PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3

EigenValor	1,349	1,000	0,668	1,972	0,633	0,395	1,414	1,063	0,524
Proporción	0,450	0,327	0,223	0,657	0,211	0,132	0,471	0,354	0,175
Proporción Acumulativa	0,450	0,777	1,000	0,657	0,868	1,000	0,471	0,825	1,000

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Una de las ventajas del CVI, es el uso de la estadística para el análisis del riesgo y sus factores (amenaza y vulnerabilidad). De igual manera, la evaluación estadística permite realizar análisis al interior de dichos factores, como lo realizado por Nguyen et al. (2021), quienes aplicaron PCA para la identificación de las variables usadas en la evaluación de la amenaza. El análisis realizado en este estudio aplica los principios estadísticos para adentrarse en los componentes de la amenaza (Magnitud, Ocurrencia y Susceptibilidad) y de la vulnerabilidad (Elementos Expuestos, Fragilidad y Falta de Resiliencia) de las tres grandes regiones costeras de Colombia.

A partir del LDA realizado para la amenaza se observó que la clasificación implementada en la metodología de Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota (2019b), funciona en un alto porcentaje de las estaciones (>70%), aunque hay otra porción de ellas que no se clasifica bien, siendo más evidente para la región Pacífico. Lo cual puede ser debido a que en el análisis de amenaza no se consideraron algunas variables que contribuyen con la probabilidad de ocurrencia de la erosión costera.

Una de las variables que podría ser considerada en el futuro, son los aportes de sedimentos por los ríos y sus cambios, tanto por factores naturales como antropogénicos. Varios autores han mostrado cómo las actividades humanas, como el represamiento de los ríos y la explotación minera de su cauce pueden alterar el balance de sedimentos que llegan a la costa, así como los cambios en la distribución de sedimentos debidos a obras de protección costera y las actividades de dragado (Aagaard et al. 2004; Hsu, Lin y Tseng 2007; Mentaschi et al. 2018).

Los resultados muestran que el principal componente que determina la amenaza por erosión en el Pacífico y la zona Caribe Insular es la

Ocurrencia. Esto se relaciona con las tasas de erosión, que es una de las dos variables que hacen parte de este componente (Ricaurte-Villota et al. 2018; Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019b). Además, la frecuencia con la que ocurre la erosión costera, determina una tendencia en el tiempo, la cual es variable de acuerdo con las características geológicas y geomorfológicas de la zona. En este sentido, la Ocurrencia se asocia con una mayor presencia de costas bajas (76%) en el Pacífico, representadas por deltas, islas barreras, costas lodosas, bocanas y playas (Posada, Henao Pineda y Guzmán Ospitia 2009). Para la zona Caribe Insular, las tasas de erosión costera y la frecuencia de la Ocurrencia, también predomina en las costas bajas, las cuales están directamente relacionadas con las playas de las islas.

En la región Caribe Insular, las costas están representadas en su mayoría por terrazas marinas y playas (Posada, Henao Pineda y Morales 2011). Las playas presentan una variabilidad estacional muy marcada, la cual se puede observar en los cambios de línea de costa, como lo presentado por Coca-Domínguez et al. (2019), específicamente en el caso de estudio de Johnny Cay.

Por su parte en el Caribe Continental, el principal componente que determina la amenaza por erosión es la Susceptibilidad, lo cual puede estar relacionado con la alta inestabilidad geomorfológica de gran parte del litoral (Correa y Alcántara-Carrió 2005), la baja topografía de la zona costera en gran parte de la región, (como lo observado para las playas de Bocagrande en Cartagena de Indias (Andrade et al. 2013; Orejarena-Rondón et al. 2019), que coincide con las características de un margen pasivo como lo es el Caribe colombiano), además de la orientación de la costa con respecto al oleaje dominante del Noreste (Orejarena-Rondón et al. 2019). Adicionalmente, las descargas de sedimentos provenientes de los aportes continentales de gran influencia como el río Magdalena, son depositados en mayor parte en el talud continental (Ercilla et al.

2002). Estas condiciones pueden tener un peso significativo en la evaluación de las costas bajas, derivando en un déficit de sedimentos en la línea de costa. A lo anterior se suma el efecto de obras costeras en la interrupción del transporte litoral.

La vulnerabilidad en el Caribe Continental e Insular está determinada principalmente por la Falta de Resiliencia, teniendo en el Caribe Continental una relación inversa con los otros componentes. En el Caribe, en general, las principales ciudades y pequeñas poblaciones costeras presentan una baja capacidad de respuesta a la presión de la erosión, en gran medida por la falta de ordenamiento territorial, la poca incorporación de planes de emergencia y la toma de decisiones sin sustento en el conocimiento del fenómeno.

Por su parte, en el Pacífico está determinada por la Fragilidad. Esto debido a que el Pacífico colombiano se caracteriza por diversos factores de Fragilidad, como el institucional, que está representado por el abandono del Estado, las condiciones de pobreza, los escasos medios de comunicación que dificultan la atención a desastres, entre otros factores. El peso del componente de Elementos Expuestos se deriva de las condiciones ancestrales de ocupación y de sus actividades económicas, es decir, debido a que el mar es fuente de alimento para las comunidades, sus poblaciones se localizan en zonas de alta exposición, frente al mar (Coca-Domínguez y Ricaurte-Villota 2019a).

Estos contrastes entre la región Caribe y Pacífico colombiana son derivados de las diferencias en desarrollo y ocupación, como por ejemplo la supervivencia de prácticas ancestrales en el Pacífico, en contraste con la pérdida de saberes en la zona Caribe, en especial la Continental. Dicha pérdida de saberes en esta región, está relacionada con el desarrollo, migraciones y asentamientos urbanos, que desplazaron las formas de vivir de los antiguos pobladores, donde el conocimiento ancestral les permitía una convivencia con el entorno, generando una mayor resiliencia hacia diferentes fenómenos naturales. Explicado bajo diferentes términos como la ecología cultural (Coca-Domínguez, Oswaldo y Ricaurte-Villota 2019a).

El análisis presentado en este estudio, pretende aportar a la gestión del riesgo por erosión costera. Identificar los componentes predominantes en la amenaza y la vulnerabilidad, permite enfocar los recursos de prevención hacia estos componentes, es decir que, para el análisis de vulnerabilidad en el Caribe Continental e Insular, se debe poner mayor atención en los sistemas de prevención y mitigación enfocados en tener comunidades más resilientes. Por su parte para el Pacífico, es indispensable fortalecer el sistema institucional, social y económico, ya que esto, sumado al conocimiento ancestral de las comunidades, puede fortalecer la prevención en la zona y disminuir los niveles de fragilidad de la región.

Si se adiciona a los componentes determinantes de la vulnerabilidad identificados los de la amenaza, que muestran cuáles son los factores que influyen en mayor medida en la erosión costera, se pueden definir acciones de manejo. Por ejemplo, como la Ocurrencia es un componente cuyas características asociadas a los procesos naturales se dificulta controlar, su valoración ayuda a seleccionar las áreas que requieren ser priorizadas para atención. Por otra parte, la Susceptibilidad puede ser controlada a través de obras o intervención con medidas de adaptación basadas en ecosistemas, aunque en casos irremediables, es posible proponer la reubicación o la construcción de obras civiles. El uso de esta información puede contribuir a la mejora de los procesos de gestión del riesgo, ordenamiento y planificación de las zonas costeras y la toma de decisiones. Lo que a su vez puede ser integrado a la gestión de las zonas litorales.

REFERENCIAS

- AAGAARD, T., NIELSEN, J., JENSEN, S.G. Y FRIDERICHSEN, J., "Longshore sediment transport and coastal erosion at Skallingen, Denmark". *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, vol. 104, no. 1, 2004 .pp. 5-14.
- ALEXANDRAKIS, G. Y Poulos, S.E. "An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment". *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, 2014 pp. 1-8. ISSN 2045-2322.
- ANDRADE, C.A., THOMAS, Y.F., LERMA, A.N., DURAND, P. Y ANSELME, B.,. "Coastal flooding

hazard related to swell events in Cartagena de Indias, Colombia". *Journal of Coastal Research*, vol. 29, no. 5, 2013pp. 1126-1136.

AYDIN, M. Y UYSAL, M., 2014. "Risk assessment of coastal erosion of Karasu coast in Black Sea". *Journal of Coastal Conservation*, vol. 18, no. 6, pp. 673-682..

BAAS, S., SELVARAJU, R., DEY DE PRYCK, J. y BATTISTA, F., 2009. Análisis de sistemas de gestión del riesgo de desastres, una guía, Stephan Baas, Selvaraju Ramasamy, Jennie Dey de Pryck, Federica Battista. Serie sobre el Medio Ambiente y la Gestión de los Recursos Naturales. 13.,

BARILLÁ, G., BARBARO, GI., FOTI, GI., MANCUSO, P., FIAMMA, V., MALESINSKA, A., PUNTORIERI, P. Y MANDALARI, M., 2021. COASTAL EROSION HAZARD AND VULNERABILITY: CASE STUDY OF PORTICELLO, SOUTH CALABRIA, ITALY. Sustainable Water Resources Management XI: Effective Approaches for River Basins and Urban Catchments, vol. 250, pp. 181.

BEJARANO-ESPINOSA, M., RICAURTE-VILLOTA, C. y COCA, O., [sin fecha]. Evaluación del riesgo por erosión costera basado en segmentación dinámica, en la costa norte del Caribe colombiano. ,

COCA-DOMÍNGUEZ, O. Y RICAURTE-VILLOTA, C., "Análisis de la evolución litoral y respuesta de las comunidades afro-descendientes asentadas en la zona costera: caso de estudio La Barra, Buenaventura, Pacífico Colombiano". *Entorno Geográfico*, no. 17, 2019a pp. 7-26.

COCA-DOMÍNGUEZ, O. Y RICAURTE-VILLOTA, C., "Validation of the hazard and vulnerability analysis of coastal erosion in the Caribbean and pacific coast of Colombia". *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 8. 2019b.

COCA-DOMÍNGUEZ, O., RICAURTE-VILLOTA, C., MORALES-GIRALDO, D. Y LUNA, K., 2019. Estado de las playas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (2015-2019). Santa Marta: Invemar.

CORREA, I.D. Y ALCÁNTARA-CARRIÓ, J., 2005. Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean coast. *Journal of Coastal Research*, p. 52-57.

ERCILLA, G., ALONSO, B., ESTRADA, F., CHIOCCI, F.L., BARAZA, J. Y LI FARRAN, M., "The Magdalena Turbidite System (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model". *Marine Geology*, vol. 185, no. 3-4, 2002. p. 303-318.

Ferré, L., "Selection of components in principal component analysis: a comparison of methods". *Computational Statistics & Data Analysis*, vol. 19, no. 6, 1995. p. 669-682.

GORNITZ, V.M., DANIELS, R.C., WHITE, T.W. Y BIRDWELL, K.R., 1994. The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research*, pp. 327-338.

GUTIERREZ-VALDERRAMA, J.E., CARVAJAL, A.F., PABÓN, J.D., RUIZ, F., CUSVA VERDUGO, A., NIETO, V., LECANDA, X., RODRÍGUEZ, J., MENDOZA, J., ÁLVAREZ, J.C., QUIMBAYO, G., DORADO, J., CAMACHO, A., BERNAL, I., ARMENTA, G., SIERRA-CORREA, P., ZAMORA, A., GELABERT, A., ÁLVAREZ, C., RUEDA, G., CAMPOS, M., NIETO, V., ALARCÓN, J., CELIS, V., CONCHA MERA, A.G., GRAJALES, F., RICAURTE-VILLOTA, C., BASTIDAS, M., ORDÓÑEZ, S.A., NAVIA, J., COCA-DOMÍNGUEZ, O., ANDRADE, C., TIGREROS, P., ROJAS, X., HERNÁNDEZ, D., HERNÁNDEZ, T., VEGA, A., ROMERO, D. Y PIZARRO, J., 2017. Tercera comunicación nacional de Colombia. En: N. UNIDAS, IDEAM y PNUD (eds.). Bogotá: IDEAM, pp. 122.

HSU, T.-W., LIN, T.-Y Y TSENG, I.-F., 2007. Human impact on coastal erosion in Taiwan. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, no. 4, pp. 961-973.

Invemar, 2021. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2020. Santa Marta: s.n. ISBN 1692 -5025.

KAIN, C.L., GOMEZ, C., HART, D.E., CHAGUÉ-GOFF, C. Y GOFF, J., Analysis of environmental controls on tsunami deposit texture. *Marine Geology* [en línea], vol. 368, 2015. p. 1-14.

KAISER, H.F, 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, vol. 23, no. 3, p. 187-200.

- KANYONGO, G.Y., "Determining the correct number of components to extract from a principal components analysis: A Monte Carlo study of the accuracy of the scree plot". *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, vol. 4, no. 1, 2005 p. 13.
- KOROGLU, A., RANASINGHE, R., JIMÉNEZ, J.A. Y DASTGHEIB, A.,. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province. *Ocean & coastal management*, vol. 178, 2019. p. 104799.
- MCLAUGHLIN, S., MCKENNA, J. Y COOPER, J.A.G., 2002. Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of coastal research*, no. 36 (10036), pp. 487-497.
- MENTASCHI, L., VOUSDOKAS, M.I., PEKEL, J.F., VOUKOUVALAS, E. Y FEYEN, L., "Global long-term observations of coastal erosion and accretion". *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, 2018. p. 1-11.
- MERLOTTO, A., BÉRTOLA, G.R. Y PICCOLO, M.C.,. "Hazard, vulnerability and coastal erosion risk assessment in Necochea Municipality, Buenos Aires Province, Argentina." *Journal of coastal conservation*, vol. 20, no. 5, 2016, pp. 351-362. ISSN 1874-7841.
- MITTEROECKER, P. Y BOOKSTEIN, F.,. "Linear discrimination, ordination, and the visualization of selection gradients in modern morphometrics". *Evolutionary Biology*, vol. 38, no. 1, 2011, p. 100-114. ISSN 1934-2845.
- NARRA, P., COELHO, C. Y SANCHO, F., 2019. Multicriteria GIS-based estimation of coastal erosion risk: Implementation to Aveiro sandy coast, Portugal. *Ocean & Coastal Management*, vol. 178, pp. 104845.
- NGUYEN, C.H., DANG, K.B., NGO, V.L., DANG, V.B., TRUONG, Q.H., NGUYEN, D.H., GIANG, T.L., PHAM, T.P.N., NGO, C.C. Y HOANG, T.T., "New Approach to Assess Multi-Scale Coastal Landscape Vulnerability to Erosion in Tropical Storms in Vietnam". *Sustainability*, vol. 13, no. 2, 2021., pp. 1004.
- OREJARENA-RONDÓN, A.F., SAYOL, J.M., MARCOS, M., OTERO, L., RESTREPO, J.C., HERNÁNDEZ-CARRASCO, I. Y ORFILA, A., 2019. Coastal Impacts Driven by Sea-Level Rise in Cartagena de Indias. *Frontiers in Marine Science*, vol. 6, no. October.
- PABÓN-CAICEDO, J.D., ESLAVA-RAMÍREZ, J.A. Y GÓMEZ-TORRES, R.E., "Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia". *Meteorología colombiana*, vol. 4, 2001. p. 47-59.
- POSADA, B.O. Y HENAO PINEDA, W., 2008. Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. Santa Marta: Invemar.
- POSADA, B.O., HENAO PINEDA, W. Y GUZMÁN OSPITIA, G., 2009. Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano. Santa Marta: Invemar.
- POSADA, B.O., HENAO PINEDA, W. Y MORALES, D.F., 2011. Diagnóstico de la erosión costera del territorio Insular colombiano. Santa Marta: s.n.
- RANGEL-BUITRAGO, N., NEAL, W.J. Y DE JONGE, V.N., "Risk assessment as tool for coastal erosion management". *Ocean & Coastal Management*, vol. 2020., 186, pp. 105099.
- RICAUURTE-VILLOTA, C., COCA-DOMÍNGUEZ, O., GONZÁLEZ, M., BEJARANO-ESPINOSA, M., MORALES, D.F., CORREA-ROJAS, C., BRICEÑO-ZULUAGA, F., LEGARDA, G. Y ARTEAGA, M., 2018. Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: Enfoque regional para la gestión del riesgo. Santa Marta: Invemar.
- SANTAMARÍA-DEL-ÁNGEL, E., CAÑÓN-PÁEZ, M.L., SEBASTIÁ-FRASQUET, M.T., GONZÁLEZ-SILVERA, A., GUTIERREZ, A.L., AGUILAR-MALDONADO, J.A., LÓPEZ-CALDERÓN, J., CAMACHO-IBAR, V., FRANCO-HERRERA, A. Y CASTILLO-RAMÍREZ, A., 2021. Interannual Climate Variability in the West Antarctic Peninsula under Austral Summer Conditions. *Remote Sens.* 2021, 13, 1122. 2021. S.I.: s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published
- SANTAMARÍA-DEL-ÁNGEL, E., GONZÁLEZ-SILVERA, A., MILLÁN-NÚÑEZ, R., CALLEJAS-JIMÉNEZ, M.E. Y CAJAL-MEDRANO, R., 2011. Determining dynamic biogeographic regions using remote sensing data. *Handbook of satellite remote*

sensing image interpretation: applications for marine living resources conservation and management, p. 273-293.

SANTAMARÍA-DEL-ÁNGEL, E., SEBASTIAFRASQUET, M.-T., GONZÁLEZ-SILVERA, A., AGUILAR-MALDONADO, J., MERCADO-SANTANA, A. Y HERRERA-CARMONA, J.C., 2019. Uso Potencial de las Anomalías Estandarizadas en la Interpretación de Fenómenos Oceanográficos Globales a Escalas Locales. Tópicos de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos; Rivera-Arriaga, E., Sánchez-Gil, P., Gutiérrez, J., Eds, p. 193-212.

SCHREIBER, J.B., Issues and recommendations for exploratory factor analysis and principal component analysis. *Research in Social and Administrative Pharmacy*, vol. 17, no. 5, 2021., pp. 1004-1011.

YEOMANS, K.A. Y GOLDBERGER, P.A., 1982. The Guttman-Kaiser criterion as a predictor of the number of common factors. *The Statistician*, pp. 221-229.