

La zona costera en Chile: adaptación y planificación para la resiliencia

EDITORES Carolina Martínez
Rodrigo Hidalgo
Cristián Henríquez
Federico Arenas
Nelson Rangel-Buitrago
Manuel Contreras-López

La elaboración y organización de este libro se desarrolla en el marco del PROYECTO FONDECYT N° 1151367, la Cátedra UNESCO-Cousteau "Formación de especialistas en Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sustentable de la Zona Costera", y el Centro para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastre, CIGIDEN (CONICYT/FONDAP/15110017).

Todos los capítulos de este libro fueron sometidos a arbitraje externo, en modalidad de doble par ciego.

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile
Fono: +56 223544716

Editor Serie GEOLibros: Rodrigo Hidalgo

SERIE GEOLibros N° 31

Comité Editorial Serie GEOLibros: José I. González Leiva (Pontificia Universidad Católica de Chile), Federico Arenas Vásquez (Pontificia Universidad Católica de Chile), Rafael Sagredo (Pontificia Universidad Católica de Chile), Axel Borsdorf (Universidad Innsbruck), Horacio Capel (Universidad de Barcelona), Sandra Lencioni (Universidad de Sao Paulo) y Carlos de Mattos (Pontificia Universidad Católica de Chile).

Editores Geolibro N° 31: Carolina Martínez (Pontificia Universidad Católica de Chile), Rodrigo Hidalgo (Pontificia Universidad Católica de Chile), Cristián Henríquez (Pontificia Universidad Católica de Chile), Federico Arenas (Pontificia Universidad Católica de Chile), Nelson Rangel-Buitrago (Universidad del Atlántico, Colombia) y Manuel Contreras-López (Universidad de Playa Ancha, Chile).

La serie GEOLibros es publicada por el Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile con el objetivo de difundir trabajos de carácter geográfico y obras vinculadas al conocimiento espacial y territorial. Todos los textos que ella publica son revisados por el Comité Editorial de la Serie GEOLibros, quién deriva los textos a pares evaluadores ciegos, cuyas observaciones son entregadas individualmente a los autores para su incorporación a los trabajos definitivos.

LA ZONA COSTERA EN CHILE: ADAPTACIÓN Y PLANIFICACIÓN PARA LA RESILIENCIA

Rodrigo Hidalgo, Carolina Martínez, Cristián Henríquez, Federico Arenas, Nelson Rangel-Buitrago y Manuel Contreras-López (editores)

Diseño y diagramación: Héctor Aguilera - Antonia Gómez

Revisión de textos: Carolina Martínez - Cristián Henríquez

Gestión editorial: Luis Muñoz Villarroel

Portada: "Azules", Gonzalo Bacigalupe. Concurso "Artifica la UC", 2019

Impresión: Gráfica LOM Santiago de Chile

Primera edición: septiembre de 2019

ISBN N° 978-956-14-2442-5

Caracterización del riesgo costero por eventos extremos de oleaje

Coastal risk assessment to extreme wave events

Nelson Guillermo Rangel-Buitrago¹, Jarbas Bonetti² y Carolina Martínez³

Resumen

Existe un consenso científico de que el clima global está afectando significativamente los eventos extremos de oleaje y el nivel del mar. Aunque existe una gran incertidumbre asociada a las magnitudes de estos cambios, los análisis de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo en los litorales son un primer paso orientado a sentar las bases para el desarrollo de cualquier tipo de plan de adaptación al cambio climático. Para este propósito, se seleccionó como área de estudio el litoral ubicado entre Bocas de Ceniza y el Río Piedras, el cual cuenta con una longitud aproximada de 194 km, en el departamento del Magdalena. En esta zona se llevó a cabo una evaluación detallada de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo asociado a eventos extremos de oleaje. Este análisis se efectuó mediante una aproximación semicuantitativa, aplicando índices relativos. Se encontró que el 27 % de la línea de costa se clasificó como de riesgo bajo, el 46 % con riesgo moderado y el 27% con riesgo alto. La adaptación debe ser una estrategia prioritaria a considerar, con alternativas de relocalización y protección sostenible, y estudios de detalle con el fin de establecer zonificaciones para asentamientos, usos y aprovechamientos futuros del litoral.

Palabras clave: amenaza, vulnerabilidad, riesgo, eventos extremos de oleaje, Colombia.

Abstract

There is a scientific consensus that global climate is significantly affecting extreme wave events and sea level. Hazard, vulnerability and risk analyses are a first step towards laying the base for the development of any climate change adaptation plan. In this sense, was selected as a study area a coastal sector of 194 km length located between Bocas de Ceniza and Río Piedras, in the department of Magdalena (Caribbean coast of Colombia). An assessment of the hazard, vulnerability, and risk to extreme wave events was developed along this area. This analysis is based on a semi-quantitative approach, applying relative indices. As a result, 27% of the coastline was found to be classified as low risk, 46% as moderate risk, and 27% as high risk. Adaptation should be a priority strategy to be considered, with alternatives for relocation and sustainable protection, and detailed studies to establish zoning for future settlements and uses of the coastline.

Keywords: hazard, vulnerability, risk, extreme wave events, Colombia.

1. Introducción

Las zonas costeras favorecen la concentración de la población debido a que el medio marino en el que se encuentran facilita el desarrollo de actividades económicas como la pesca, industria, turismo, transportes y comercio (Barragan y de Andres, 2015). Autores como Crowell y Buckley (1993) y el Instituto de Recursos Mundiales (2010), han indicado que cerca del 20% de la población total del mundo (1.409 millones de habitantes) vive a menos de 25 km de la costa y un 40% (2.818 millones de habitantes) vive a menos de 100 km, dentro de una franja costera que representa aproximadamente el 25% de toda la superficie total de la Tierra. Tal concentración de la población y sus actividades asociadas conduce a un aumento significativo en la susceptibilidad ante cualquier tipo de amenaza, y al consecuente aumento de la vulnerabilidad y el riesgo (Adger *et al.*, 2005).

En las últimas décadas, la ocupación costera ha aumentado de forma significativa gracias a actividades económicas como el turismo (Jones y Phillips, 2011). Como resultado de ello, a lo largo de las zonas costeras del mundo las actividades humanas e infraestructura asociada se han visto expuestas al impacto de procesos de erosión constantes, así como a eventos extremos de oleaje que han traído consigo pérdidas económicas importantes y decenas de muertes (Bacon y Carter, 1991; Komar y Allan, 2008; Rangel-Buitrago y Anfuso, 2015). Bajo este marco de referencia, cualquier impacto ambiental puede ser importante en los próximos años debido al imparable y frenético desarrollo costero (Brown y McLachlan, 2002; Hidalgo *et al.*, 2016) y los procesos de cambio climático previstos (IPCC, 2007; Jones y Phillips, 2011).

Con el fin de disminuir los impactos estructurales del cambio climático, es importante proporcionar análisis realistas de los procesos esperados bajo diferentes escenarios de cambio (IPCC, 2014). La investigación reciente sobre los efectos del cambio climático en las zonas costeras se ha enfocado, casi exclusivamente, a la determinación de los impactos asociados al aumento en el nivel del mar a causa del calentamiento global (Phillips y Crisp, 2010). Aspectos importantes que deben tenerse en cuenta, dentro de este contexto, son el conocimiento y determinación de las tendencias en el clima marítimo y la distribución y ocurrencia de los eventos extremos de oleaje (Komar y Allan, 2008; Soomere, 2008). Bajo un escenario de aumento en el nivel del mar y el aumento en la altura del oleaje, la zona costera sufrirá grandes impactos en términos de erosión e inundaciones, especialmente con respecto a regiones de baja altitud que pueden desaparecer de forma parcial o totalmente (Hanson y Larson, 2008).

Más del 70% de las costas de todo el mundo están sufriendo procesos de erosión (Maio *et al.*, 2012). Las zonas costeras de megaciudades como Nueva York, Nueva Deli, Shangai son altamente susceptibles a inundaciones costeras y eventos extremos de oleaje (Clark *et al.*, 1998; Kirshen *et al.*, 2007). Estos eventos han traído consigo daños y destrucción de estructuras hechas por el hombre, deterioro y/o desaparición completa de ecosistemas (Kirshen *et al.*, 2007) y la destrucción y sumersión de sitios arqueológicos sensibles y asociados a los recursos culturales (Shaw *et al.*, 1998).

Las evaluaciones de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo proporcionan una valiosa información sobre la presión a la que la zona costera está expuesta, así como su capacidad de adaptación

(Small y Nicholls, 2003). En estos tipos de evaluaciones, es determinante examinar la interacción existente entre los atributos físicos, características socioeconómicas y aspectos de conservación y patrimonio arqueológico y cultural. Dentro de este contexto, la “considerable” cantidad de información que debe ser integrada y procesada requiere una metodología de trabajo organizada a fin de mostrar espacialmente las relaciones existentes entre el fenómeno y los elementos en riesgo (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2015; Bonetti y Woodroffe, 2017).

Las evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo costero son un tema clave en el campo de las ciencias de la tierra y, dentro de esta, existe una enorme literatura que detalla las respuestas del sistema costero ante cualquier tipo de perturbación (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2015). Las metodologías utilizadas para evaluar los riesgos costeros se pueden clasificar de acuerdo con diferentes características, sin embargo, el establecimiento de una clasificación sucinta resulta muchas veces en una tarea difícil, donde los límites entre las clases no pueden ser definidos estrictamente (Di Paola *et al.*, 2011).

Estas evaluaciones normalmente se efectúan empleando diferentes tipos de información que incluyen: información física y ecológica, características de la ocupación humana, y tendencias evolutivas costeras, entre otras (Gornitz, 1991; Gornitz *et al.*, 1997; Cooper y McLaughlin, 1998; Anfuso y Martínez, 2009; McLaughlin *et al.*, 2002; McLaughlin y Cooper 2010; Bonetti *et al.*, 2013). Los primeros estudios realizados emplearon métodos individuales de aproximación (i.e. la regla de Bruun en 1962; la metodología de UNEP, Carter y Woodroffe, 1994), pero estos han evolucionado progresivamente y han sido sustituidos por técnicas más recientes debido a la mejora en el uso de factores físicos y no físicos, y a la disminución de las incertidumbres asociadas, dando lugar a métodos más consistentes y fiables (i.e. USGS-CVI, Gornitz *et al.*, 1994; Nicholls y De la Vega-Leinert, 2000; Benassai *et al.*, 2009). De esta forma, sus mapas de riesgo asociados se han obtenido para varios sectores costeros de todo el mundo (LOICZ, 1995; Cooper y McLaughlin, 1998; Kelly, 2000).

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, la evaluación fiable de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo costero se necesita con urgencia como una herramienta básica para reducir el impacto de la erosión y las inundaciones costeras. Esta herramienta es un instrumento importante para los gestores/ planificadores costeros, la protección y el desarrollo de la costa, ya que sus resultados proporcionan información de referencia y una base científica para cualquier tipo de medida prevista dentro de un plan de gestión y mitigación de riesgo costero enmarcado en un aspecto fundamental como lo es la sostenibilidad (Williams *et al.*, 1998).

Por ejemplo, en la costa de Chile se han desarrollado pocas investigaciones para caracterizar los impactos causados por eventos extremos de oleaje basados en el análisis espacial. Dado que estos eventos hasta antes de 2014 eran poco conocidos, no fueron considerados como fenómenos peligrosos sino hasta la destrucción provocada por 2 grandes eventos ocurridos en agosto de 2015, donde una parte importante de la costa de la Región de Valparaíso sufrió severos daños (Agredano *et al.*, 2015; Molina *et al.*, 2015). A partir de entonces, se han realizado algunas investigaciones orientadas a analizar sus condiciones de generación (Campos, 2016; Carvajal *et al.*, 2017; Esparza y Winckler, 2017; Winckler *et al.*, 2017), en especial su relación con ENOS, las respuestas morfológicas y la erosión costera (Becerra y Aguirre, 2017; Ibaceta *et al.*, 2017; Martínez *et al.*, 2018).

Teniendo esto en cuenta, y con el objetivo de contribuir al desarrollo de nuevas investigaciones de esta naturaleza, se presentará aquí un estudio de caso desarrollado en la Costa Caribe de Colombia. Se espera que, inspirándose en este ejemplo, se puedan realizar estudios similares a lo largo de la costa de América Latina, que permitan una primera evaluación integral de la heterogénea distribución de la vulnerabilidad en varios países, entre ellos Chile. Con ello, sería posible identificar zonas de riesgo acentuado, que puedan estar indicando la necesidad de planes de manejo específicos que busquen la protección de las poblaciones costeras locales.

Este capítulo presenta, en primer lugar, una revisión de los enfoques metodológicos existentes y una aproximación metodológica para la determinación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo costero asociados a eventos extremos de oleaje, mediante el uso de matrices relacionadas a parámetros físicos, actividades socioeconómicas y recursos ecológicos e históricos. El enfoque aplicado en este estudio de caso está fundamentado en la selección y evaluación de tres tipos de variables: i) las variables forzadoras del fenómeno erosivo asociado a eventos extremos de oleaje, ii) las variables dinámicas que determinan la resiliencia a la erosión (susceptibilidad) y iii) los objetos vulnerables, que son agrupados en tres contextos (socioeconómico, ecológico y de patrimonio). Estas variables son combinadas en dos índices separados, el índice de amenaza (que combina las variables forzadoras y la susceptibilidad) y el índice de vulnerabilidad. Ambos índices constituyen el índice de riesgo a eventos extremos de oleaje, el cual es una medida numérica del riesgo de un área determinada.

La metodología propuesta ha sido probada a lo largo del sector Bocas de Ceniza-Río Piedras ubicado en aguas del Mar Caribe colombiano y perteneciente al departamento del Magdalena, Colombia. Esta zona es de vital interés económico, ya que a lo largo de ella se desarrollan actividades económicas importantes como la pesca, transporte, comercio y turismo. Esta última actividad cobra vital importancia, dado que a lo largo del área se mueve un importante flujo de turistas, asociado al “mercado de sol, mar y arena”, que representa un recurso económico significativo y de constante crecimiento para la zona y todo el mundo (Rangel-Buitrago *et al.*, 2013 y 2015; Williams *et al.*, 2016; Rangel-Buitrago *et al.*, 2017).

2. Enfoques metodológicos y técnicas de análisis espacial

El desarrollo de los estudios basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha ido ganando una aceptación progresiva y, actualmente, el uso de esta tecnología para la determinación del riesgo en zonas costeras es habitual en las diferentes etapas de su gestión. El uso de los SIG va desde la sencilla georreferenciación de puntos de muestreo para el análisis integrado de variables, hasta la compleja utilización de redes neuronales artificiales o generación de algoritmos (Smith *et al.*, 2007).

Es así como en los últimos años se han propuesto varias metodologías que utilizan diferentes marcos de referencia para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo costero. Por lo general, estas metodologías consideran datos representativos de atributos biofísicos y sociales de las costas, así como su interacción mutua, para una posterior integración y transformación dentro de las políticas pertinentes para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático (Nguyen *et al.*, 2016).

Muchos de los marcos de referencia propuestos para evaluar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de las zonas costeras ante los efectos del cambio climático fueron descritos en detalle por Abuodha y Woodroffe (2010a y 2010b), Rangel-Buitrago y Anfuso (2015), Nguyen *et al.*, (2016) y; Bonetti y Woodroffe (2017). Estos marcos de referencia, así como sus metodologías más importantes, se presentan a continuación teniendo en cuenta la escala espacial en que han sido empleadas.

- i) Regional: basada en polígonos (unidades administrativas) y conjuntos de datos predefinidos.
- ii) Local: que tiene como insumo básico datos obtenidos a partir de información colectada a nivel comunitario o estudios de campo de detalle.
- iii) Multiescala: la cual emplea procedimientos de segmentación por medio de líneas.

2.1 Regional

Este marco de referencia incluye ámbitos globales-generalistas mediante el uso de conjuntos de datos predefinidos. Muchas de las metodologías pertenecientes a este marco de referencia se derivaron de la denominada *Common Methodology*, propuesta originalmente por el IPCC CZMS (1992), la cual fue diseñada para delinear las zonas vulnerables ante la subida del nivel del mar.

Este enfoque tiene como fin único el proporcionar un marco para la evaluación de varios componentes de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo mediante la identificación de sectores prioritarios a escala global, nacional y regional. Modelos informáticos de exploración globales y herramientas concebidas para apoyar las decisiones de gestión de riesgo en el ámbito regional, fueron descritos por Zanuttigh *et al.* (2014). Algunos ejemplos son: VA (*Global Vulnerability Analysis*), FUND (*Climate Framework of Uncertainty, Negotiation and Distribution*), DESYCO (*Decision Support System for Coastal Climate Change*), RegIS (*Regional Impact Simulator*) y THESEUS DSS (*Innovative Technologies for Safer European Coasts in a Changing Climate*).

Por medio de este enfoque y sus derivaciones se han desarrollado numerosos estudios y se han obtenido grandes cantidades de datos. Sin embargo, su uso ha sido fuertemente criticado debido a su alto grado de simplificación y generalización (Abuodha y Woodroffe, 2010a y 2010b). Romieu *et al.* (2010) enfatizó en que el enfoque regional se basa en muchos supuestos que limitan su relevancia únicamente a escalas amplias y, por lo tanto, inhiben su aplicabilidad para los ajustes locales o regionales que exigen un mayor detalle.

2.2 Local

Quizás el primer enfoque metodológico a escala local fue adoptado por el Centro de Servicios Costeros de la NOAA, quien desarrolló el denominado "*The Community Vulnerability Assessment Tool*" - CVAT (Flax *et al.*, 2002). La herramienta CVAT tiene en cuenta factores socioeconómicos y, a su vez, permite la creación de mapas de riesgo combinados, utilizando un sistema de puntuación que da los valores más grandes a las zonas más vulnerables. En términos generales, el CVAT consiste en un procedimiento de superposición de mapas que permite un análisis de vulnerabilidad y riesgo

relativo de las comunidades costeras a una serie de amenazas existentes. De manera similar, el CVAT propone la realización de una serie de pasos graduales, que se pueden adaptar para satisfacer las necesidades de los usuarios y ser implementado mediante un SIG o mapas estáticos.

Un enfoque diferente, basado en el uso de geoindicadores, fue propuesto por Bush *et al.* (1999) como una herramienta de gestión para una rápida evaluación del potencial de riesgo ante fenómenos costeros. Esta aproximación metodológica se basa en la descripción de características, tales como la elevación sobre el nivel del mar, la altura de la duna, la exposición al oleaje, la presencia de vegetación en la playa trasera, y la estabilidad del litoral, entre otras. Este enfoque puede adoptar hasta 30 variables, que se pueden seleccionar sobre una base de caso por caso o como indicadores principales de los peligros que amenazan una propiedad determinada sobre la costa. En esta metodología las variables seleccionadas se identifican en el campo, puntuándose y tabulándose los niveles de amenaza y vulnerabilidad, lo que resulta en un índice que expresa el riesgo natural local. La idea básica detrás de los geoindicadores es que un conjunto seleccionado de variables puede expresar la dinámica ambiental a corto plazo y, por lo tanto, ser utilizado como señal de la multiplicidad de factores que actúan sobre las costas (Bonetti *et al.*, 2017).

Un aspecto positivo del enfoque metodológico local es su representatividad espacial, ya que se observan y miden las variables (estas no se extraen de un conjunto de datos genéricos). Por otra parte, el enfoque local facilita la actualización permanente a través del seguimiento a largo plazo, en contraste con la imagen más estática proporcionada por otras metodologías. Así mismo, algunos de los geoindicadores propuestos son transitorios y no necesariamente representan una tendencia o un estado promedio del sistema.

2.3 Multiescala

Los enfoques metodológicos multiescalares tienden a ser flexibles en términos de representatividad estadística, ya que la auto-similitud de las líneas de costa, a pesar de sus cambios, permite una representación precisa a través de diferentes alcances y etapas de tiempo (Kappraff, 1986).

La línea de costa es a menudo el accidente geográfico más visible en los mapas costeros debido a que una línea (vector) puede ser usada perfectamente para representar toda la zona costera (Monmonier, 2008). Los procedimientos de segmentación empleados para dividir linealmente la costa fueron iniciados por Bartlett *et al.* (1997), y han sido ampliamente adoptados desde entonces. Sin embargo, la manera en que se ha utilizado para representar potenciales amenazas, vulnerabilidades y riesgo de la costa diverge entre diferentes investigadores. Con respecto a este procedimiento, Sherin (1999) describió sistemas de referencia lineales, así como técnicas de segmentación dinámica de los SIG con una amplia aplicación dentro de estudios costeros y marinos.

Abuodha y Woodroffe (2006) resumieron la diversidad de enfoques basados en técnicas de segmentación y definieron que las secciones de la línea de costa se clasifican con mayor o menor propensión a ser afectados por los peligros costeros, basándose en el análisis espacial de datos multivariados.

La lógica subyacente en la selección de un modelo de datos lineal para hacer referencia a la información costera y tres métodos utilizados para la aplicación de estos modelos con el uso de los SIG se describen a continuación.

2.3.1 Índice de Vulnerabilidad Costera (Coastal Vulnerability Index -CVI)

Un primer intento de desarrollar un índice de vulnerabilidad costera (CVI) fue realizado por Gornitz y Kanciruk (1989) y Gornitz (1991), considerando la susceptibilidad a la erosión de la costa de los Estados Unidos. Una forma modificada de esta metodología fue adoptada por el U.S. Geological Survey (USGS), en 2001, y se ha utilizado para llevar a cabo evaluaciones científicas de vulnerabilidad de las costas ante el cambio en el nivel del mar (Pendleton *et al.*, 2010).

El CVI proporciona una base numérica simple para la clasificación de una sección de costa determinada mediante la estimación de su potencial para el cambio, aplicándose para la identificación de lugares específicos donde los riesgos pueden ser relativamente altos. Las variables se eligen teniendo en cuenta su representatividad para así sintetizar las características físicas que tiene cada línea de costa. Dentro del CVI se propusieron originalmente los siguientes descriptores clave, debido a que denotan los procesos más importantes que influyen en la evolución costera y la vulnerabilidad: geomorfología, tasa de cambio histórico de la costa, pendiente, tasa de variación relativa del nivel del mar, altura de ola máxima y la amplitud de la marea.

Después de la espacialización de los datos, cada factor recibe un valor para la clasificación de la vulnerabilidad en función de una escala de 1-5 (vulnerabilidad muy baja a muy alta). Se obtiene, entonces, la vulnerabilidad general a través de la integración analítica de estas capas mediante la realización de álgebra de mapas, que permite calcular un valor de índice final único para cada segmento costero asignado.

Este enfoque ha sido ampliamente utilizado y modificado por diversos autores, que han incorporado o suprimido variables debido a la necesidad de adaptación a una escala local o como consecuencia de la disponibilidad de datos para sitios específicos. Muchos de estos estudios se enumeran exhaustivamente y han sido sintetizados por Abuodha y Woodroffe (2010a y 2010b), Bonetti *et al.* (2013), Rangel-Buitrago y Anfuso (2015) y Nguyen *et al.* (2016).

Es importante aclarar que la formulación original del CVI considera exclusivamente la vulnerabilidad relacionada con factores físicos y no se ocupa de los aspectos socioeconómicos (como la pérdida económica, el número de personas afectadas, la infraestructura potencialmente dañada, etc.). Para un uso mucho más práctico es esencial incluir factores humanos, teniendo en cuenta que el daño patrimonial se producirá únicamente ante la presencia de activos económicos.

20 Autores como Pereira y Coelho (2013), Rangel-Buitrago y Anfuso (2015) y Nguyen y Woodroffe (2015) consideraron factores sociales en el desarrollo de este tipo de índices. Por otra parte, estos mismos autores aplicaron un método de ponderación, determinado aritméticamente, o mediante el proceso analítico ordenado (Saaty, 1980) para proponer una jerarquía de las variables que contribu-

yen a evaluar los impactos potenciales dentro de la zona costera. Por otra parte, Nguyen y Woodroffe (2015) incorporaron una serie de variables dentro del modelo para expresar específicamente la capacidad de adaptación.

2.3.2 Modelos de evaluación de la vulnerabilidad dinámicos-interactivos (*Dynamic Interactive Vulnerability Assessment model - DINAS-DIVA*)

A pesar de una aparente abundancia de datos, que se originan principalmente de los numerosos sistemas de observación que orbitan alrededor de la Tierra, hay una falta de bases de datos característicos de la costa a escalas regionales y globales. A escala mundial, la base de datos *DINAS-Coast Database* (Evaluación dinámica e interactiva de la vulnerabilidad al cambio climático y al aumento del nivel del mar de las zonas costeras a escala nacional, regional y global) y la herramienta *DIVA* (Evaluación de la vulnerabilidad dinámica e interactiva), proporcionan una metodología comparativa que se puede utilizar para evaluar la susceptibilidad aparente de segmentos predefinidos de costa (Vafeidis *et al.*, 2008). Esta herramienta incluye una base de datos global, un modelo integrado y una interfaz gráfica que permite a los usuarios producir información cuantitativa acerca de una serie de indicadores climáticos y socioeconómicos de vulnerabilidad costera, para seleccionar escenarios y estrategias de adaptación (Hinkel y Klein, 2006 y 2009).

Estos modelos permiten la evaluación de los costes y beneficios relacionados con los impactos analizados, así como las estrategias de adaptación predefinidos. El modelo fue diseñado y desarrollado para ayudar a los responsables de políticas y decisiones en la interpretación de evaluación de la vulnerabilidad costera, y para hacer frente a las medidas relacionadas específicamente (Vafeidis *et al.*, 2008).

Aunque vinculado a una base de datos global, *DIVA* ha sido diseñado para proporcionar salidas gráficas en un rango de escalas espaciales dirigidas a las unidades administrativas. El modelo *DIVA*, cuyo segmento costero promedio es de aproximadamente 70 km de longitud, es una herramienta eficaz para el análisis a escala regional, pero puede no ser útil para la planificación costera a escala local.

2.3.3 Captura de datos geográficos mediante líneas segmentadas (SMARTLINE)

SMARTLINE es esencialmente un método que captura de manera eficiente las descripciones de la variabilidad del relieve costero en un formato SIG, mediante líneas segmentadas. Estos segmentos se pueden consultar fácilmente y se utilizan para muchos fines de investigación y de gestión costera, que hasta la fecha han incluido la identificación de la variabilidad en la sensibilidad a los derrames de petróleo y la susceptibilidad inherente a la erosión a lo largo de la costa.

El método *SMARTLINE* identifica una serie de segmentos de línea de costa con base a la forma del litoral, utilizando una clasificación geomorfológica de trasplaya, zona intermareal y lecho de roca, así como la pendiente (Sharples *et al.*, 2009). Para este método, la línea de costa está segmentada, generando múltiples piezas de información que se encuentra adjunta a los vectores que representan la costa. Esto permite una clasificación por consulta SIG en categorías generales, que co-

rresponden a diferentes grados y estilos de susceptibilidad a los efectos de la subida del nivel del mar. Este método propone un enfoque pragmático destinado a la cartografía indicativa, que pretende ser el primer paso de una secuencia jerárquica de evaluaciones, que permite identificar los accidentes geográficos del litoral potencialmente vulnerables al aumento del nivel del mar.

La metodología SMARTLINE ha sido objeto de varias mejoras y se ha adaptado para su aplicación a lo largo de toda la costa de la parte continental de Australia, como parte de una evaluación de la vulnerabilidad costera a nivel nacional.

3. Estudio de caso

Dentro de las metodologías anteriormente descritas, se eligió el Índice de Vulnerabilidad Costera para su aplicación en un estudio de caso específico, donde el marco original propuesto por Gornitz y Kanciruk (1989) y Gornitz (1991) ha sido modificado y adaptado por la implementación de subíndices, que representan diferentes aspectos de los impactos generados por el oleaje extremo. Es importante destacar que la técnica adoptada para la integración de la variable y el tipo de producto numérico obtenido es similar a la propuesta por los autores previamente mencionados.

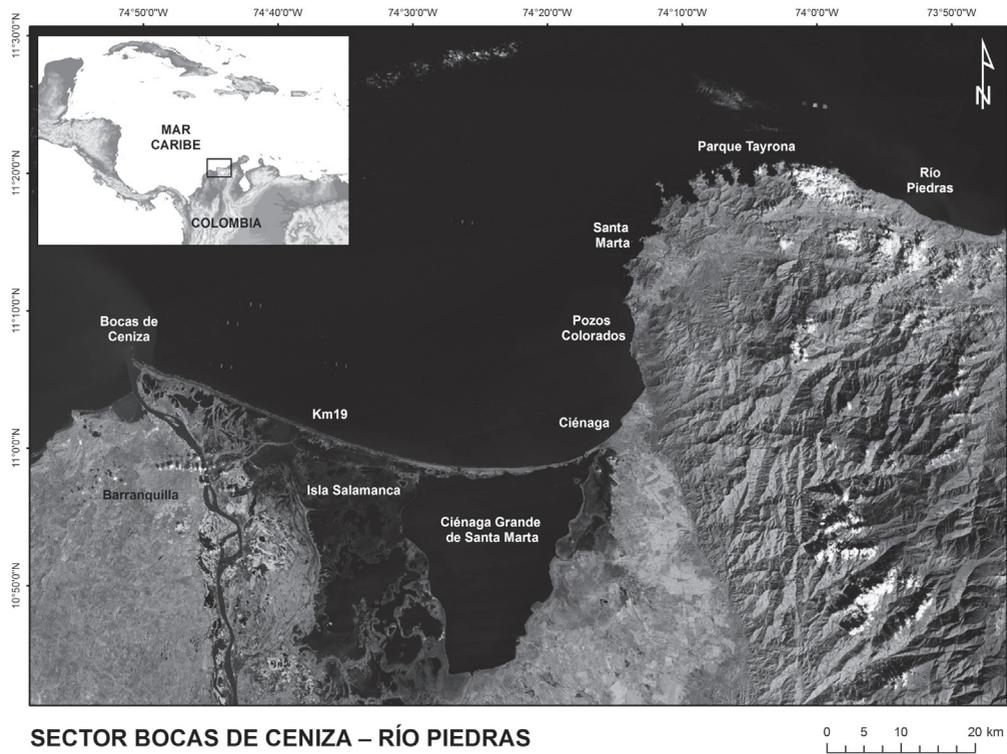
La línea de costa del sector Bocas de Ceniza-Río Piedras tiene una longitud aproximada de 194 km, pertenece en su totalidad al Departamento del Magdalena, Colombia, y se encuentra localizada entre las coordenadas 11°06'N-74°51'W y 11°17'N-73°53'W (Figura N°1).

Las condiciones climáticas dentro del área de estudio están condicionadas por la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical, la cual controla las precipitaciones en todo el Caribe colombiano. Estas precipitaciones están distribuidas estacionalmente y se presentan en tres periodos de tiempo denominados: i) época seca (noviembre-marzo), ii) época de transición (abril-agosto), y iii) época de lluvias (agosto-noviembre).

El área de estudio presenta un régimen micromareal, con rangos máximos de cambio en el orden de los 50 cm (promedio 30 cm) e intervalos de tiempo entre mareas altas de 10 a 15 horas. En lo que concierne al oleaje, predominan olas provenientes del cuarto cuadrante con promedios de altura que oscilan entre 0,5-2 m y periodos de 2-29 segundos, con promedio de 9 segundos.

La mayor parte del año (noviembre a julio), el clima de oleaje está dominado por la presencia de frentes de oleaje provenientes del NE; el resto del tiempo, se producen oleajes desde el NW, SW e incluso SW. De acuerdo a INVEMAR (2006) y Restrepo *et al.* (2012), la variación estacional de la dirección de aproximación del oleaje se refleja en una disminución de la altura significativa del oleaje, con valores más bajos (≤ 1.5 m) registrados entre agosto y octubre, y condiciones más energéticas ($> 2,5$ m) observadas a partir de noviembre a julio.

Figura N° 1
Localización del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El transporte de sedimentos tiene un componente dominante hacia el sudoeste; con una menor importancia se presentan reversiones hacia el noreste que ocurren durante los períodos de lluvia (de abril a junio y septiembre a noviembre), cuando los vientos del sur se convierten en dominantes en algunos sectores.

La interacción de procesos tectónicos, climáticos y oceanográficos ha dado como resultado una zona litoral que puede ser dividida desde el punto de vista geomorfológico en: i) Playas compuestas por arenas de origen terrígeno, ii) Zonas acantiladas y montañosas formadas por rocas ígneas y metamórficas con edades que datan de más de 160 millones de años, iii) Llanuras costeras asociadas con procesos sedimentarios marino-fluviales, iv) Lagunas costeras, campos de dunas, salares y pantanos de manglar (Figura N° 2).

La ocupación costera ha crecido debido al desarrollo de actividades económicas importantes vinculadas a recursos naturales y humanos. Así mismo, la fisiografía del área junto a las excelentes condiciones climáticas hace que la realización de actividades económicas sea contante durante todo el año. Esto ha convertido al área de estudio en un destino emergente y en constante crecimiento a lo largo del litoral del Caribe de Colombia.

Figura N° 2

Características geomorfológicas más importantes observadas en el sector Bocas de Ceniza-Río Piedras:
a) playas en el km 19, b) playas en el sector de Costa Verde, c) playas en la ciudad de Santa Marta, d) tómbolo en el Cabo San Juan, e) playa de bolsillo en Taganga, f) acantilados y stacks en Bahía Concha, g) llanura costera correspondiente al sector Pozos Colorados, h) manglares, dunas, lagunas costeras en la vía Ciénaga-Barranquilla



Fuente: Elaboración propia

Las excelentes condiciones climáticas y su paisaje convierten al sector Bocas de Ceniza-Río Piedras en un destino popular para muchos turistas nacionales e internacionales, que lo visitan durante todo el año. En la actualidad, esta área y en general todo el Caribe colombiano, han desarrollado una industria turística de sol y playa que se encuentra en “vías de desarrollo”. Esta industria genera una considerable atención debido a que se está convirtiendo en una importante fuente de ganancias. El afán de generar dinero asociado a un “turismo de masas” está trayendo consigo presiones extremas asociadas al desarrollo de actividades humanas perjudiciales como la urbanización excesiva. Esto invita a tomar medidas de control necesarias para evitar grandes intervenciones que traerán consigo incremento en la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, daños graves e irreparables a la calidad del paisaje escénico y en un futuro a las diversas actividades económicas que se desarrollan en el área.

3.1 Rol de las imágenes de satélite en el cálculo de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociado a eventos extremos de oleaje

En este trabajo se emplearon imágenes de satélite descargadas de la página web <http://earthexplorer.usgs.gov/> para producir una base cartográfica de alta resolución, que permitió el análisis y levantamiento de las variables involucradas en la determinación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo a eventos extremos de oleaje.

Específicamente, se utilizaron las imágenes de satélite listadas en el Cuadro N° 1 para la reconstrucción de la evolución de la línea de costa lo largo del sector Bocas de Ceniza-Río Piedras, durante los últimos 15 años, siguiendo la metodología propuesta por Crowell y Buckley (1993).

Cuadro N° 1
Imágenes de satélite empleadas para la realización de este trabajo

Fuente	Año	Escala
Landsat	2015	30 metros de resolución
Landsat	2013	30 metros de resolución
IKONOS	2010	5 metros de resolución
Landsat	2008	30 metros de resolución
Landsat	2005	30 metros de resolución
Landsat	2003	30 metros de resolución
Landsat	2000	30 metros de resolución

Fuente: Elaboración propia

Una cuestión clave en el estudio de zonas costeras es la selección de un rasgo (*proxy*) adecuado que sirva como indicador de la línea de costa. Este rasgo es de suma importancia, ya que debe reflejar adecuadamente posición real de la línea de costa y también debe servir para determinar su evolución reciente (Moore, 2000; Boak y Turner, 2005). Teniendo en cuenta que el área de estudio corresponde a un entorno micromareal, la línea de costa fue definida como la posición instantánea de la interface agua-tierra en el momento en que fue tomada la imagen (Pajak y Leatherman, 2002; Boak y Turner, 2005).

Para cada imagen empleada se generó un archivo vector (Shapefile) y, una vez disponibles todas las líneas de costa, se midieron las respectivas distancias entre ellas usando los programas DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) y RMAP 3.0 (*Regional Morphology Analysis Package*). Ambos programas calculan parámetros estadísticos que indican el estado y las tendencias evolutivas para periodos de tiempo específicos. Con el DSAS se define una línea base paralela a las costas digitalizadas y que permite trazar en forma semiautomática transectos perpendiculares que indican la distancia entre la línea base y las líneas de costa de las distintas fechas. Dentro de este trabajo se empleó el *End Point Rate* (EPR), que es la relación de la distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente, y el lapso años entre ambas líneas, como medida principal (Thieler *et al.*, 2005).

3.2 Eventos extremos de oleaje

Dentro del análisis de la evolución para los últimos 15 años, se efectuó la determinación de eventos extremos y una posterior propagación de su oleaje asociado. Para esto se empleó un set de datos obtenidos a partir del reanálisis de los datos de viento, disponible en la base de datos de América del Norte Reanálisis Regional (FTTP: //ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/NARR/monolevel, consultado en marzo de 2015) para un punto de predicción situado frente al área de estudio.

Cada evento extremo fue definido como un evento climático en que la altura de oleaje significativo (Hs) fue mayor o igual al percentil Hs 92 m, durante un periodo mínimo de 12 horas. El intervalo entre eventos seguidos fue definido en 24 horas, con el fin de crear un set de eventos desagrupados e independientes.

En un segundo paso, el evento extremo más alto se ha propagado por medio del programa SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), que es un modelo espectral de tercera generación, euleriano, no estacionario y promediado en la fase, desarrollado por la Universidad de DELF (Holanda) para la predicción de olas y viento bajo condiciones de limitación de *fetch* y profundidad bajo condiciones estacionarias. Este modelo permite describir la evolución del espectro de energía del oleaje teniendo en cuenta las condiciones de viento, oleaje, corrientes y las características batimetrías, calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales.

3.3 Descripción general y cálculo de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociado a eventos extremos de oleaje.

En este trabajo, se propone un Índice de Riesgo a Eventos Extremos de Oleaje el cual se basa en la combinación de los siguientes tres componentes o subíndices que se trabajan dentro de un entorno SIG (Figura N°3):

- i) Índice de erosión asociada a eventos extremos de oleaje (Cuadro N° 2)
- ii) Índice de susceptibilidad, que describe la resiliencia y susceptibilidad de la costa a la erosión de acuerdo a sus características morfológicas específicas (Cuadros N° 3 y N° 4).
- iii) Índice de vulnerabilidad, que involucra los objetos vulnerables teniendo en cuenta aspectos socioeconómicos, ecológicos y de patrimonio (Cuadros N° 5, N° 6 y N° 7).

Gran parte de las variables empleadas para la determinación de los subíndices han sido elegidas de acuerdo a estudios previos centrados en el cálculo de las amenazas asociadas a fenómenos crónicos de erosión costera o aumento relativo del nivel del mar (Gornitz, 1991; Gornitz *et al.*, 1997; Cooper y McLaughlin, 1998; McLaughlin *et al.*, 2002; Coelho *et al.*, 2009; McLaughlin y Cooper, 2010; Özyurt y Ergin, 2009 y 2010; entre otros) y/o impactos de eventos extremos de oleaje (Burzel *et al.*, 2010; Ceia *et al.*, 2010; Carrasco *et al.*, 2012; Di Paola *et al.*, 2011; Li y Li, 2011; Maio *et al.*, 2012; Raji *et al.*, 2013).

La selección de las variables usadas en cada subíndice se efectuó teniendo en cuenta dos principios:

- i) Un número de variables representativas fueron seleccionadas para cada subíndice pero este número se mantiene lo suficiente bajo como para evitar problemas de redundancia.
- ii) Las variables seleccionadas deben estar disponibles y deben ser fáciles de obtener en cualquier área determinada sin necesidad de nuevos trabajos de investigación.

Figura N° 3
Esquema metodológico que ilustra las variables para la determinación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociado a eventos extremos de oleaje



Fuente: Elaboración propia

De esta forma, la metodología propuesta es práctica y fácil de aplicar en cualquier zona costera donde puedan ser colectados datos similares.

De acuerdo a los principios metodológicos previamente mencionados, en este trabajo se seleccionaron cuatro factores climáticos como variables para estimar el índice de erosión asociada a eventos extremos (Cuadro N°2). Con el único fin de tener valores objetivos de la altura significativa del oleaje y su distribución a lo largo del área de estudio, se efectuaron propagaciones de oleaje que permitieron calcular dichos parámetros en función de un porcentaje del valor inicial. La selección de las variables asociadas a este índice se efectuó a la luz de los estudios sobre erosión costera asociada a eventos extremos de oleaje realizados por Stockdon et al. (2006), Pye y Blott (2008), Almeida et al., (2011), Esteves et al. (2011) y Rangel-Buitrago y Anfuso (2013 y 2015).

Cuadro N° 2
VARIABLES CONSTITUYENTES DEL ÍNDICE DE EROSIÓN ASOCIADA A EVENTOS EXTREMOS DE OLAJE

Variable	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)
Altura de oleaje significativo en un punto específico de la costa (% de Hs Inicial)	Menos de 20%	20-40 %	40-60%	60-80%	80-100%
Inundación costera en un punto específico de la costa	Menos de 20%	20-40 %	40-60%	60-80%	80-100%
Grado de exposición al oleaje (García Mora <i>et al.</i> , 2001)	10-45° Oblicua	x	0-10° Sub-paralela	x	0° Paralela
Rango Marea (McLaughlin and Cooper 2010)	Macromareal	x	Mesomareal	x	Micromareal

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, el índice de susceptibilidad a la erosión asociada a eventos extremos de oleaje se estimó en función de las características intrínsecas de la costa, seleccionándose cinco y siete variables para costas arenosas y rocosas (Cuadros N° 3 y N° 4). La definición de las variables se efectuó de acuerdo con los resultados obtenidos por diversos autores que han estudiado la influencia de diferentes factores en la estabilidad de las costas arenosas y rocosas (García Mora *et al.*, 2001; Gracia *et al.*, 1999; Sunamura, 1992; Trenhaile, 2002; Muler y Bonetti, 2014, entre otros).

Cuadro N° 3
ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD PARA PLAYAS ARENOSAS

	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)
Altura de la duna (m) (Gracia <i>et al.</i> , 1999)	≥6	≥3	≥2	≥1	<1
Porcentaje de abanicos de desbordamiento (García Mora <i>et al.</i> , 2001)	0%	≤5%	≤25%	≤50%	≥50%
Límite de la playa seca como indicador de la ZCI (Anfuso <i>et al.</i> , 2013)	5 veces la ZCI	4 veces la ZCI	3 veces la ZCI	2 veces la ZCI	Igual a la ZCI
Pendiente de playa Estado morfodinámico (Anfuso <i>et al.</i> , 2013)	Disipativa (tan β ≤0.02)	x	Intermedia (0.02 < tan β < 0.08)	x	Reflectiva (tan β ≥0.08)
Índice K (Aybulatov and Artyukhin, 1993)	Extrema (K > 1)	Máxima (K=0.51÷1)	Promedio (K= 0.11÷0.5)	Mínimo (K= 0.0001÷0.1)	No Estructuras (K=0)

Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 4
Índice de susceptibilidad para costas rocosas

	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)
Tipo (Sunamura, 1992)	Acantilado con plataforma horizontal	x	Acantilado Inclinado	x	Acantilado Vertical
Litología (Sunamura, 1992)	Rocas graníticas y metamórficas	Arcillolitas	Rocas sedimentarias terciarias	Depósitos cuaternarios	Depósitos volcánicos
Estructuras (Bieniawski, 1989)	Ausencia virtual de discontinuidades y fallas	x	Alguna evidencia de discontinuidades y fallas	x	Alta densidad de discontinuidades y fallas
Pendiente (Anfuso <i>et al.</i> , 2013)	<30°	31°÷40°	41°÷50°	51°÷60°	>60°
Límite del acantilado como indicador de la ZCI (Anfuso <i>et al.</i> , 2013)	5 veces la ZCI	4 veces la ZCI	3 veces la ZCI	2 veces la ZCI	Igual a la ZCI
Meteorización (Bieniawski, 1989)	No meteorizado	Leve meteorización	Moderada meteorización	Altamente meteorizado	Descompuesto
Índice K (Aybulatov y Artyukhin, 1993)	Extrema (K>1)	Máxima (K=0.51÷1)	Promedio (K= 0.11÷0.5)	Mínimo (K= 0.0001÷0.1)	No Estructuras (K=0)

Fuente: Elaboración propia

El análisis de objetos potencialmente en riesgo tuvo en cuenta una serie de variables de vulnerabilidad asociadas a contextos socioeconómicos, ecológicos y de patrimonio (Cuadros 5, 6 y 7). Un total de siete variables (tres socioeconómicas, tres ecológicas y una de patrimonio) fueron seleccionadas para obtener los respectivos subíndices de vulnerabilidad.

Cuadro N° 5
Variables socioeconómicas asociadas con el índice de vulnerabilidad

	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)
Usos del suelo (CORINE)	Arbustos y matorrales	Pastos (capa densa de hierba) Pastos (hierba + cultivos) Pastos (hierba + árboles)	Pantanos, salares, lagunas costeras, bosques de galería	Cultivos	Estructuras recreativas, Aeropuertos, Área Industrial-Comercial, área de Minería, área urbana
Porcentaje de área urbanizada (Li y Li, 2011)	Menos de 20%	20÷40%	40÷60%	60÷80%	Mayor del 80%
Densidad de Población (Li y Li, 2011)	Más bajo que 10 habitantes por kilómetro cuadrado	11÷75	76÷300	301÷999	Mayor que 1.000 habitantes por kilómetro cuadrado

Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 6
Variables ecológicas asociadas con el índice de vulnerabilidad

	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)
Área Protegida (IUCN, 2008)	Reserva natural	x	Monumento natural	x	Área de manejo de habita- especies
Ecosistemas y área cubierta (Li y Li, 2011; McLaughlin y Cooper, 2010)	Área sin vegetación	x	Arbustos, rastrojos, praderas, rocas desnudas	x	Ecosistemas estratégicos: marisma, algas marinas, arrecifes de coral, lagunas
Nivel de intervención antropogénica (Özyurt y Ergin, 2009; Li y Li, 2011)	Muy alto (mayor del 80% del área)	Alto (80÷60%)	Medio (60÷40%)	Bajo (40÷20%)	Muy Bajo (menor del 20%)

Fuente: Elaboración propia

Cuadro Nº 7
Variables de patrimonio asociadas con el índice de vulnerabilidad

	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)
Patrimonio Cultural (McLaughlin and Cooper 2010)	Ausente	Interés local	Interés regional	Interés nacional	Interés internacional Patrimonio de la UNESCO

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo las metodologías de Gornitz (1991), Gornitz *et al.* (1997), Hammer-Klose y Thierler (2001), las variables empleadas fueron clasificadas en una escala de 1 a 5, donde 1 indica una baja contribución de la variable específica para el sector estudiado, mientras que 5 indica una alta contribución. Cada una de las clases fue establecida sobre una base numérica y se adoptó un enfoque de escala ordinal, en el caso de encontrar una variable semi-cuantitativa difícil de cuantificar (Cooper y McLaughlin, 1998).

Las variables propuestas en esta metodología fueron calculadas para un área segmentada en cuadrículas, cuyas dimensiones se definen en función de la disponibilidad de los datos y la uniformidad de la costa. En este sentido, la metodología utilizada se puede aplicar en escalas espaciales diferentes. En el caso del estudio presentado en este capítulo, el sector Bocas de Ceniza-Río Piedras presenta una longitud de 194 km y fue segmentado mediante cuadrículas con área de 1 km².

Las variables empleadas se combinaron en un SIG para el cálculo del índice de erosión asociada a eventos extremos, índice de susceptibilidad, la amenaza asociada a eventos extremos de oleaje y el índice de vulnerabilidad socioeconómica, ecológica y de patrimonio. Las puntuaciones de cada variable se han resumido en el ámbito de la obtención de un valor absoluto para cada subíndice, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Índice de Erosión} = \frac{\sum I f a n - n I f}{n I f * 4} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Índice de Susceptibilidad} = \frac{\sum S a n - n S}{n S * 4} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Amenaza} = \frac{(\text{Índice de Erosión} * n I f) + (\text{Índice de Susceptibilidad} * n S b)}{n I f + n S} \quad (3)$$

$$\text{Vulnerabilidad} = \frac{\sum V a n - n V}{n V * 4} * 100 \quad (4)$$

En donde *an* es cada una de las variables usadas en cada índice (índice de erosión: *I f*, índice de susceptibilidad: *S b* y Vulnerabilidad *V*) y *nv* el número de variables en cada índice.

Con el fin de obtener un índice más realista en cada contexto, el riesgo se ha calculado y expresado como un valor teórico de la amenaza y la vulnerabilidad. Dicho valor se normalizó de acuerdo con la técnica de índice sugerida por McLaughlin et al. (2002) y está dado por la fórmula:

$$\text{Riesgo} = \frac{[\text{Amenaza} * (\text{nlf} + \text{nS})] * [\text{Vulnerabilidad} * (\text{nV} * 4)]}{(\text{nlf} + \text{nS}) + (\text{nV} * 4)} \quad (5)$$

El Riesgo a los Eventos Extremos de Oleaje corresponde a un valor numérico obtenido mediante la media ponderada de todos los riesgos calculados (socioeconómico, ecológico y de patrimonio), de acuerdo con el número de variables incluidas en cada uno de ellos (esto con el fin de no sobrestimar los pesos individuales). Una vez fueron calculados los índices finales, estos fueron clasificados y divididos en cinco clases de riesgo que van desde muy bajo (1) a muy alto (5) por medio del cálculo de los límites naturales según la metodología de Jenks y Caspall (1971).

Con respecto a los subíndices de vulnerabilidad, estos se han construido mediante variables complejas que incluyen aspectos socioeconómicos, ecológicos y patrimoniales. Estos índices se dividieron en dos tipos de datos: i) los datos cuantitativos, que incluyen porcentajes de áreas específicas y/o densidades asociadas (por ejemplo, el porcentaje de área urbanizada, densidad de población) y ii) los datos cualitativos, que incluían variables específicas comunes previamente establecidas y clasificadas (por ejemplo, los usos del suelo, los ecosistemas y coberturas).

4. Distribución de índices

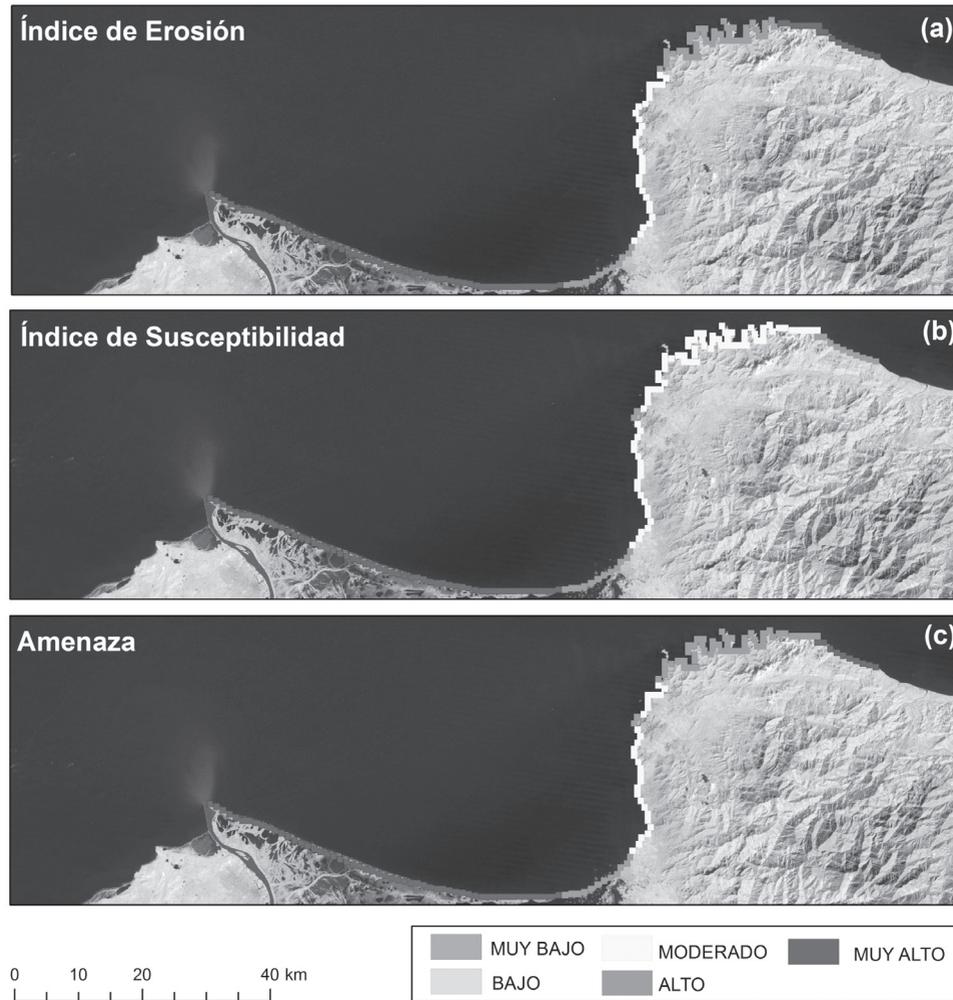
4.1 Índice de Erosión

El índice de erosión presentado en la Figura N° 4a y en el Cuadro N° 8 mostró un dominio de las categorías moderado, alto y muy alto.

A lo largo del sector Bocas de Ceniza-Río Piedras, el índice de erosión mostró valores altos a muy altos, respectivamente, para el 35% y el 46% del litoral. Tales valores se registraron en los sectores de Vía Parque Isla de Salamanca, Ciénaga y Parque Tayrona. El resto del área de estudio (19%) presentó valores moderados correspondientes al índice de erosión.

Los datos obtenidos sugieren el predominio de valores altos y muy altos del índice de erosión, y están relacionados con la conjunción de varios factores que determinan la forma en que se distribuye la energía del oleaje a lo largo del área de estudio: i) la ausencia de obstáculos frente a la costa; ii) el grado de exposición del litoral a las olas, y iii) las características batimétricas locales. En concreto, la orientación de la costa determina el nivel de exposición a la dirección de acercamiento de las olas y, por lo tanto, la prevalencia de un transporte sedimentario neto en dirección E que es determinante en la erosión de las playas y dunas. Así mismo, las condiciones batimétricas del área condicionan procesos de propagación, asomeramiento, reflexión y disipación del oleaje. La orientación rectilínea característica del área de estudio y las características homogéneas de la batimetría cercana a la costa permiten la llegada de oleaje con valores elevados durante los eventos extremos.

Figura N° 4
Índices de erosión, susceptibilidad y amenaza por eventos extremos de oleaje calculados para el sector Bocas de Ceniza-Río Piedras



Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 8
Distribución de los índices de erosión, susceptibilidad y amenaza

Clase	Porcentaje		
	Erosión	Susceptibilidad	Amenaza
Muy Bajo	-	-	-
Bajo	-	-	-
Moderado	19	50	18
Alto	35	15	40
Muy Alto	46	35	42

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, los valores más altos del índice de erosión están vinculados a una mayor exposición de esta costa; esta puede llegar a ser casi paralela a los frentes de oleaje entrantes que se aproximan predominantemente del NE (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2013). Contrariamente, se observaron valores bajos del índice de erosión en las áreas protegidas y playas de bolsillo ubicadas al NE del área de estudio.

4.2 Índice de Susceptibilidad

La distribución del índice de susceptibilidad es presentada en la Figura N° 4b y en el Cuadro N° 8. El sector Bocas de Ceniza-Río Piedras fue clasificado principalmente (50%) dentro de la categoría moderada de la susceptibilidad. Los resultados mostraron cómo este fue el caso de los sectores Santa Marta, Rodadero y Parque Tayrona correspondientes a una serie de playas urbanas y un parque natural con tasas altas de erosión. Susceptibilidad alta (15%) y muy alta (35%) se registró en los sectores de Vía Parque Isla de Salamanca, Ciénaga y la parte norte del área de estudio, donde los acantilados ígneos y metamórficos, altamente fracturados, están directamente expuestos a la acción del oleaje y experimentan significativas tasas de erosión.

El área de estudio cuenta con parámetros intrínsecos en que los gestores de zonas costeras pueden hacer poco o nada para disminuir la susceptibilidad. Por esto, se debe enfatizar en la evaluación de alternativas de mejora y modernización de aspectos específicos. En cuanto a las playas, con el fin de contrarrestar el retroceso de las costas y disminuir la susceptibilidad costera, las cadenas de dunas pueden fortalecerse mediante la implantación de vegetación, alimentación de arena hacia las dunas y el emplazamiento de cercos para favorecer la estabilización. Trabajos de regeneración para crear y aumentar el tamaño de las playas, constituyen también una forma de disminuir la susceptibilidad a lo largo del área de estudio. Estas obras de regeneración y las iniciativas de recuperación de dunas son amigables con el medio ambiente y, a su vez, permiten mejorar el hábitat natural y las características paisajísticas de la costa (Rangel-Buitrago *et al.*, 2013).

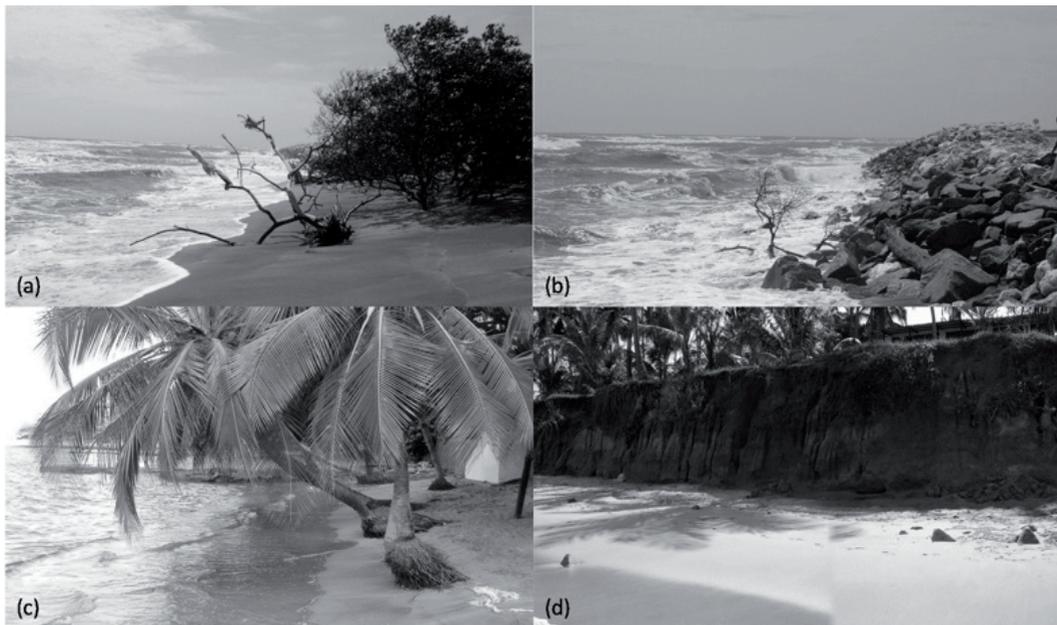
4.3 Índice de Amenaza

La amenaza está definida como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno dañino potencial (en este caso, un evento extremo de oleaje) dentro de un período específico de tiempo y dentro de un área determinada. El índice de amenaza calculado en este trabajo corresponde al cruce de índices de erosión y susceptibilidad, y muestra el potencial de los diferentes sectores de experimentar daños significativos asociados con el efecto de los eventos extremos de oleaje (Figura N°4c y Cuadro N°8).

A lo largo del área de estudio, el índice de amenaza presenta tres categorías. Los valores altos y muy altos son claramente dominantes, representando el 82 % de la costa. Los valores moderados representaron el 18% de la costa.

Las áreas con valores de amenazas altas y muy altas se caracterizan por presentar importantes tasas de erosión en las últimas décadas. Un elevado porcentaje de áreas con valores altos y muy altos de amenaza, presentan tasas de erosión que excedieron valores de retroceso en el orden de 1,5 m/año (Figura N° 5), como fue observado por Rangel-Buitrago *et al.* (2015). Lo anterior confirma la validez de la metodología aplicada, ya que cuanto mayor es el índice de amenaza mayor es la erosión registrada.

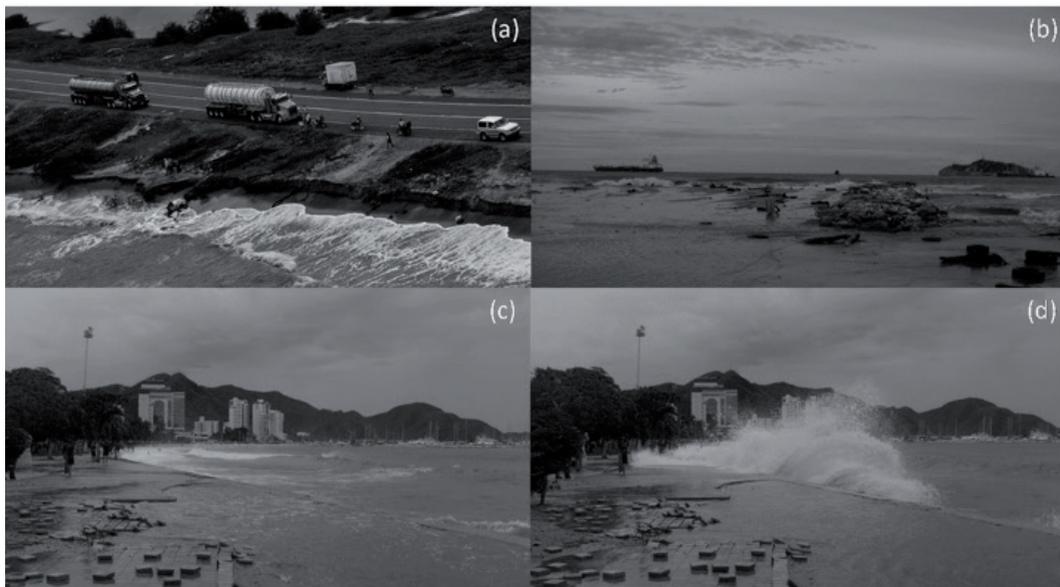
Figura N° 5
Ejemplos de erosión costera a lo largo del área de estudio. a y b) km 17 y 19 de la vía Ciénaga-Barranquilla, c) Villa Tanga, d) La Piscina, Parque Tayrona



Fuente: Elaboración propia

Las inundaciones costeras son otro proceso relacionado con valores muy altos y altos de amenaza asociada a eventos extremos de oleaje. A lo largo del área de estudio, los sectores más amenazados se ven altamente influenciados por valores elevados de sobre elevación del oleaje durante condiciones extremas (Figura N° 6). Ejemplos recientes de este fenómeno fueron observados en el mes de enero del año 2014, cuando la sobre elevación del oleaje alcanzó valores significativos, llegando a poner en peligro la carretera que comunica la ciudad de Barranquilla con el norte del país.

Figura N° 6
Ejemplos de inundación costera a lo largo del área de estudio. A) km 19 de la vía Ciénaga-Barranquilla (foto: El Herald de Barranquilla), b) Playa de los Cocos, Santa Marta, c) y d) Malecón de Santa Marta



Fuente: Elaboración propia

4.4 Índice de Vulnerabilidad

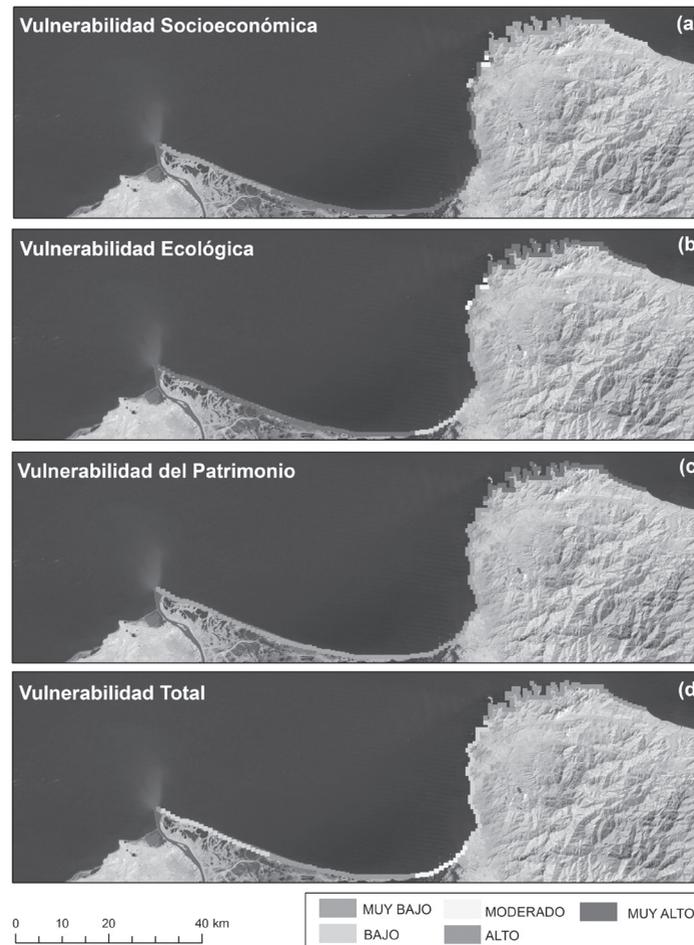
El índice de vulnerabilidad permite la evaluación de los posibles impactos de los eventos extremos de oleaje en marcos de referencia socioeconómicos, ecológicos y patrimoniales. Variaciones significativas en este índice fueron encontradas a lo largo del área de estudio. Los diferentes índices de vulnerabilidad se presentan en la Figura N° 7 y Cuadro N° 9.

4.4.1 Vulnerabilidad socioeconómica

Se observaron valores muy altos y altos de la Vulnerabilidad Socioeconómico en el 44% del área de estudio. Estos valores se asociaron con los sectores más densamente poblados, que presentan un alto porcentaje de área urbanizada (Figura N° 7a y Cuadro N° 9). Los valores muy bajos y bajos de vulnerabilidad socioeconómica se encontraron a lo largo de las zonas bajas de intervención humana, alcanzando valores de 54%. Los valores moderados de este índice (2%) se observaron sólo en áreas específicas ubicadas entre Santa Marta y el Rodadero (Figura N° 7a y Cuadro N° 9).

La distribución de la vulnerabilidad socioeconómica sugiere que variables como: los usos del suelo y la densidad de población determinan el grado de impacto asociados a eventos extremos de oleaje. Estas observaciones concuerdan con Del Río y Gracia (2009) y McLaughlin *et al.* (2002), quienes sugieren que la variabilidad del tipo de uso del suelo es la variable más eficaz en la discriminación de los niveles de impacto, en este caso, desde un punto de vista socioeconómico. Estos autores también indicaron que el número de personas que viven en un área específica puede llegar a ser un problema importante en el análisis de cualquier tipo de riesgo. Además, la densidad de población constituye un factor clave en el cálculo de la vulnerabilidad socioeconómica, debido a su carácter relativo que hace que sea, obviamente, más ampliamente aplicable que las características absolutas de población (Rygel *et al.*, 2006; Del Río y Gracia, 2009). Del mismo modo, la densidad de población tiene una doble implicación en la determinación de la vulnerabilidad socioeconómica: i) se asocia con la susceptibilidad, ya que está directamente afectada por los eventos extremos de oleaje y ii) puede llegar a contribuir a la erosión costera.

Figura N° 7
Índices de vulnerabilidad calculados para el sector Bocas de Ceniza-Río Piedras



Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 9
Distribución de la vulnerabilidad

Clase	Porcentaje			
	Socioeconómica	Ecológica	Patrimonio	Total
Muy Bajo	46	16	62	-
Bajo	8	8	-	34
Moderado	2	3	-	8
Alto	3	-	-	58
Muy Alto	41	73	38	-

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Vulnerabilidad Ecológica

La integración de las calificaciones ecológicas dentro de cualquier tipo de evaluación de la vulnerabilidad representa un gran desafío, ya que surgen problemas para decidir cómo clasificar sitios específicos (McLaughlin *et al.*, 2002). La “protección” de un sitio de conservación difícilmente puede incluir la protección de la acción de procesos de oleaje que se forma de manera natural.

En este trabajo, la vulnerabilidad ecológica se calculó teniendo en cuenta la presencia de áreas protegidas, la cobertura vegetal natural y el nivel de intervención humana (Figura N° 7b y Cuadro N° 9).

Los resultados mostraron valores muy altos de la vulnerabilidad ecológica, en el orden de 73% (Figura N° 7b y Cuadro N° 9). Los altos valores encontrados son debidos a que el área de estudio cuenta con un alto porcentaje de zonas con una cierta importancia ecológica y/o de protección (Vía Parque Isla de Salamanca y el Parque Tayrona).

Por otro lado, se observaron valores bajos y muy bajos de vulnerabilidad ecológica en un 24% del área, debido al alto grado de intervención humana. La clase moderada alcanzó valores de 3% (Figura N° 7b y Cuadro N° 9).

4.4.3 Vulnerabilidad del patrimonio

Lugares de asentamiento de minorías étnicas, así como monumentos arqueológicos e históricos, son muy importantes en términos sociales y económicos, debido a que son irremplazables y hacen parte de los recursos inmateriales y culturales de un país (McLaughlin *et al.*, 2002).

El interés nacional e internacional, vinculado a razones culturales y patrimoniales, conduce a valores muy altos y altos de la vulnerabilidad del patrimonio para el área de estudio, como se muestra en la Figura N° 7c y Cuadro N° 9. Las áreas de interés fueron representadas por las áreas patrimoniales que dan al mar y están protegidas por la normativa nacional e internacional. De especial interés

es el Parque Tayrona, que mostró valores altos de vulnerabilidad del patrimonio, ya que corresponde al área nativa y lugar de residencia de los indígenas Tayronas.

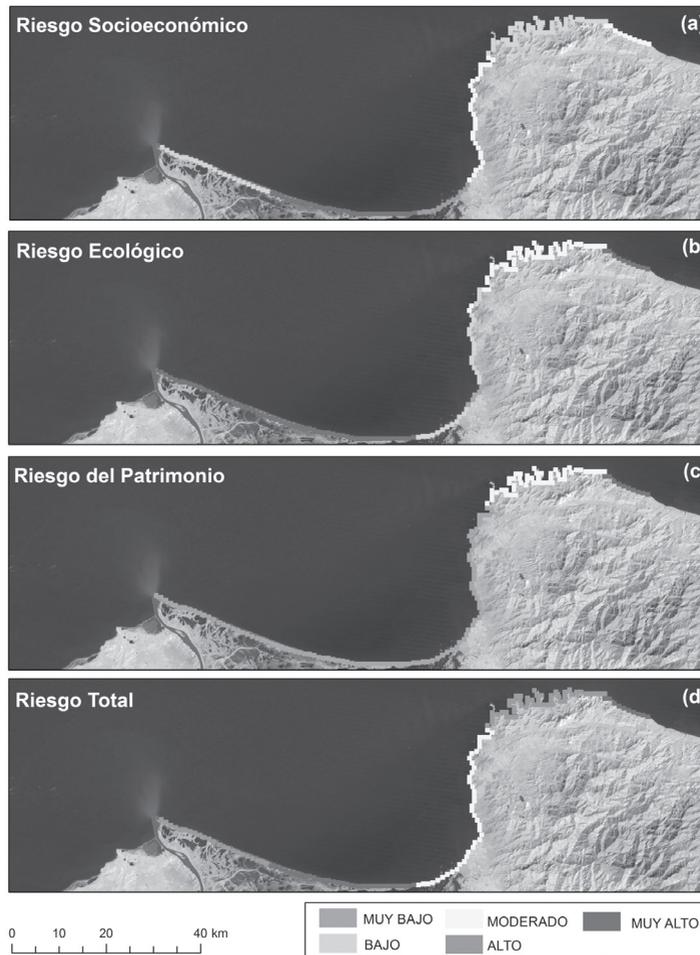
La combinación de todos los índices de vulnerabilidad dio una escena general de la vulnerabilidad total del área de estudio (Figura N° 7c y Cuadro N° 9). El índice de vulnerabilidad total para el área osciló entre valores bajos a altos. En concreto, los valores altos son claramente dominantes, lo que representa el 58% de la costa. Valores medios representaron el 8%, mientras que se observaron valores bajos a lo largo del 34%.

4.5 Índice de riesgo

De acuerdo con Birkmann (2007), cualquier tipo de evaluación del riesgo debe incluir los dos componentes separados que constituyen el riesgo, en este caso la amenaza y el impacto asociado expresado por medio de la vulnerabilidad. En este sentido, ambos índices se combinaron en el índice de riesgo, que es un valor numérico obtenido a través de una media ponderada de ambos índices según el número de variables (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2015).

El valor del riesgo se puede definir como la combinación de la probabilidad de un evento extremo de oleaje y sus consecuencias negativas en unos contextos socioeconómicos, ecológicos y patrimoniales (Figura N° 8 y Cuadro N° 10).

Figura N° 8
Índices de riesgo calculados para el sector Bocas de Ceniza-Río Piedras



Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 10
Distribución del riesgo

Clase	Porcentaje			
	Socioeconómico	Ecológico	Patrimonio	Total
Muy Bajo	-	3	62	-
Bajo	46	21	-	-
Moderado	26	35	32	27
Alto	8	-	-	46
Muy Alto	20	41	6	27

Fuente: Elaboración propia

Desde un punto de vista socioeconómico, la evaluación del riesgo mostró que las zonas más sensibles se encuentran a lo largo de las áreas urbanizadas (Figura N° 8a y Cuadro N° 10). Los datos previamente mencionados mostraron una fuerte relación entre la energía de las olas, la erosión costera, la vulnerabilidad asociada y las características de las intervenciones antropogénicas.

El riesgo ecológico representa la probabilidad de pérdida en las zonas con cierto nivel de importancia ecológica (por ejemplo, parques naturales). A lo largo de la zona de estudio, se observó un predominio de los valores de riesgo moderados y muy altos (Figura N° 8b y Cuadro N° 10). De igual forma, la evaluación de riesgo del patrimonio mostró cómo las zonas de alto riesgo coincidieron con el Parque Nacional Natural Tayrona (Figura N° 8c y Cuadro N° 10).

La combinación de cada uno de los índices previamente presentados permitió la determinación del panorama general asociado a eventos extremos de oleaje a lo largo del sector Bocas de Ceniza-Río Piedras (Figura N° 8d y Cuadro N° 10).

5. Consideraciones metodológicas

5.1 Manejo de Datos

El uso y la aplicación de diferentes tipos de información dentro de un proyecto SIG (datos de oleaje propagados, unidades geomorfológicas, entre otros) y la generación de nueva información por medio de análisis espaciales, permitieron la creación de una base de datos inicial que contiene la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo por eventos extremos de oleaje para el sector Bocas de Ceniza-Río Piedras, Magdalena, Colombia.

La información presentada en este capítulo puede ser utilizada fácilmente en su totalidad o parcialmente a diferentes niveles y escalas, y por parte del personal local de planificación u otro tipo de usuarios de acuerdo con sus objetivos específicos, por ejemplo, programas de medio ambiente, turismo y planes de manejo de zonas costeras, etc.

Según, Nunes *et al.* (2009), el uso de herramientas SIG permite la obtención de una gran cantidad de datos diferentes, siendo una de sus principales ventajas la posibilidad de actualizar constantemente la información inicial con nuevos conjuntos de datos. En este sentido, variables como la altura del oleaje, los usos del suelo, el porcentaje de área urbanizada, densidad de población, entre otras, pueden ser fácilmente integradas, analizadas espacialmente y actualizadas en un entorno SIG con el fin de proporcionar un plan de gestión integrada de las zonas costeras (Fisher y Arredondo, 1999; Anfuso y Gracia, 2005).

La metodología presentada en este capítulo proporciona una “foto instantánea”, correspondiente al análisis de riesgo asociado a eventos extremos de oleaje en un área determinada. Una de las grandes ventajas del método propuesto radica en que este se basa en los últimos efectos de la erosión costera en el proceso evolutivo de la zona de estudio. Así mismo, este método presenta una amplia flexibilidad y adaptabilidad a las características específicas de cada área a ser investigada. En este sentido, constituye una herramienta básica y adecuada para la evaluación previa a la elaboración de cualquier tipo de plan de gestión costera.

5.2 Validación de índices

Los nuevos enfoques metodológicos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo deben ser probados y validados antes de ser considerado adecuados para sus propósitos (Cooper y McLaughlin, 1998).

Los resultados obtenidos en este trabajo han demostrado que la totalidad del sector Bocas de Ceniza-Río Piedras es sometido a un moderado, alto y muy alto riesgo de erosión relacionada con eventos extremos de oleaje.

La metodología propuesta por McLaughlin (2002) fue empleada para comprobar los resultados obtenidos mediante la comparación del riesgo con la evolución registrada, a lo largo del área de estudio, en los últimos 15 años. Las tendencias de erosión/acreción son una variable que se ha tenido en cuenta en muchos estudios regionales y locales (Gornitz *et al.*, 1994; Abuodha y Woodroffe, 2006; Coelho *et al.*, 2009; McLaughlin y Cooper, 2010; Bonetti *et al.*, 2017), pero que, en este caso, no se ha tenido en cuenta, ya que se ha incluido parcialmente en el cálculo de los puntos relativos al ancho de la playa seca y el ancho del borde del acantilado, que son expresados en función de la zona de colapso inminente y, por lo tanto, corresponde con las tasas de erosión.

Para confirmar lo anteriormente explicado, se utilizó el método de regresión lineal múltiple para cada segmento de la línea de costa estudiado. De esta forma se evaluó la correlación existente entre el índice de riesgo calculado (R) y la evolución de la costa (EC), por medio de la siguiente expresión:

$$R = f(CE) \quad (6)$$

Con el fin de corroborar los procesos de validación, la evolución costera (CE) se expresa por medio de tres diferentes métodos: Movimiento Neto del Litoral (NSM), Tasa de Desplazamiento Final (EPR) y la Regresión Lineal (LRR).

Los resultados de esta validación son presentados en el Cuadro Nº 11 y muestran una bondad tolerable del modelo de regresión múltiple de acuerdo con el coeficiente de múltiple determinación R², ya que alrededor del 85% de la variación en la RI se explica por el modelo.

Cuadro Nº 11
Resultados del análisis de regresión lineal múltiple llevados a cabo con el fin de validar el índice de riesgo a eventos extremos de oleaje

	RI= f (NSM)	RI= f (EPR)	RI= f (LRR)
Múltiple R	0.75	Múltiple R	0.85
Múltiple R ²	0.72	Múltiple R ²	0.79
R ² Ajustado	0.7	R ² Ajustado	0.76
		Múltiple R	0.8
		Múltiple R ²	0.77
		R ² Ajustado	0.7

Fuente: Elaboración propia

Si el valor del índice de riesgo no es aceptable de acuerdo con los datos de evolución costera, otros factores importantes -que no se incluyen en el índice- pueden estar influyendo en la erosión del litoral (Del Río *et al.*, 2009). Este no fue el caso para el presente estudio, confirmándose, de esta manera, la validez del método utilizado y la ausencia de factores externos o locales que pueden afectar el retroceso de la costa a causa de los eventos extremos de oleaje.

5.3 Conclusiones

La amenaza, vulnerabilidad y riesgo por eventos extremos de oleaje del sector Bocas de Ceniza-Río Piedras en la costa Caribe colombiana, viene determinada por un gran número de factores que pueden ser divididos desde el punto de vista socioeconómico, ecológico y del patrimonio.

Como una aproximación preliminar, el uso del índice normalizado para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por eventos extremos proporciona una estimación semicuantitativa de las distintas variables que se encuentran implicadas en el fenómeno y facilita el análisis directo de este importante sector costero.

Los resultados obtenidos permiten determinar que, en cuanto al riesgo, se encontró que el 27 %, 46% y 27 % correspondieron a valores de riesgo moderado, alto y muy alto, respectivamente.

Bajo las condiciones de cambio climático, ascenso en el nivel del mar y desbalance sedimentario, a corto, mediano y largo plazo los fenómenos costeros detectados se intensificarán llevando a un retroceso acelerado de la línea de costa, por lo cual la adaptación debe ser una estrategia prioritaria a ser considerada.

La magnitud de este problema sugiere la necesidad de dar importancia de primer orden al estudio de las medidas de adaptación. En este contexto, se recomienda profundizar en alternativas como la relocalización y protección sostenible, teniendo en cuenta que hay sitios que podrían ser usados para la aplicación de estas estrategias. De igual forma, este estudio sugiere la necesidad de ahondar en detalle acerca de las posibles zonificaciones para asentamientos, usos y aprovechamientos a lo largo del litoral, considerando, además de los eventos extremos de oleaje analizados en esta investigación, otras amenazas (como las inundaciones, deslizamientos, sismicidad, entre otras), vulnerabilidades y riesgos, además de los usos actuales y futuros previstos.

Referencias bibliográficas

- ABUODHA, P., WOODROFFE, C. D. Assessing vulnerability of coasts to climate change: A review of approaches and their application to the Australian coast. En Woodroffe, C. D., Bruce, E., PUOTINEN, M., FURNESS, R. A. (eds.), *GIS for the Coastal Zone: A selection of Papers from CoastGIS 2006*. Wollongong, Australia: Australian National Centre for Ocean Resources and Security University of Wollongong, 2006.
- ABUODHA, P. A., WOODROFFE, C. D. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation Planning and Management*, 2010a, N° 14, p. 189-205.
- ABUODHA, P. A., WOODROFFE, C. D. Vulnerability assessment. En Green, D. R. (ed.) *Coastal Zone Management*. London, UK: Thomas Telford Ltd., 2010b, p. 262-290.
- AYBULATOV, N. A., ARTYUKHIN, Y. V. *Geo-ecology of the World Ocean's Shelf and Coasts*. Leningrad: Hydrometeo Publishing, 1993.
- ADGER, W. N., HUGHES, T. P., FOLKE, C., CARPENTER, S. R., ROCKSTRÖM, J. Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 2005, N° 309, p. 1036-1039.
- AGREDANO, R., CIENFUEGOS, R., CATALÁN, P., MIGNOT, E. *Descripción de la evolución mensual de la playa de Reñaca y el impacto de las marejadas de agosto 2015*. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Octubre 21-23, 2015.
- ALMEIDA, L. P., FERREIRA, O., VOUSDOSKAS, M. I., DODET, G. Historical variation and trends in storminess along the Portuguese South coast. *Natural Hazards Earth System Science*, 2011, N° 11, p. 2407-2417.
- ANFUSO, G., GRACIA, F. Morphodynamic characteristics and short term evolution of a coastal sector in SW Spain: implications for coastal erosion management. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(6), p.1139-1153.
- ANFUSO, G., MARTÍNEZ, J. Assessment of coastal vulnerability through the use of GIS tools in South Sicily (Italy). *Environmental Management*, 2009, N° 43, p. 533-545.
- ANFUSO, G., GRACIA, F. J., BATTOCLETTI, G. Determination of cliffed coastline sensitivity and associated risk for human structures: a methodological approach. *J Coastal Res.*, 2013, 29(6), p. 1292-1296.
- BACON, S., CARTER, D. Wave climate changes in the North Atlantic and the North Sea. *International Journal of Climatology*, 1991, N° 11, p. 545-558.
- BARRAGAN, J. M., DE ANDRÉS, M. Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean Coastal and Management*, 2015, N° 114, p. 11-20.
- BARTLETT, D., DEVOY, R., MCCALL, S., O'CONNOR, I. A dynamically-segmented linear data model of the coast. *Marine Geodesy*, 1997, N° 20, p. 137-151.
- BECERRA, D., AGUIRRE, C. *Caracterización de las Marejadas del Verano 2015-16 y su relación con el fenómeno "El Niño"*. XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Octubre 18-20, 2017.
- BENASSAI, G., CHIRICO, F., CORSINI, S. Una metodologia per la definizione del rischio da inondazione costiera. *Studi Costieri*, 2009, N° 16, p. 51-72.
- BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley, 1989.

BIRKMANN, J. Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards*, 2007, N° 7, p. 20-31.

BOAK, E., TURNER, I. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(4), p. 688-703.

BONETTI, J., WOODROFFE, C. D. Spatial Analysis on GIS for Coastal Vulnerability Assessment. En BARTLETT, D. y CELLIERS, L. (eds.) *Geoinformatics for Marine and Coastal Management*. Boca Raton: CRC Press, 2017, p. 367-396.

BONETTI, J., KLEIN, A. H. F., MULER, M., DE LUCA, C. B., SILVA, G. V., TOLDO JR., E. E., GONZÁLEZ, M. Spatial and numerical methodologies on coastal erosion and flooding risk assessment. En FINKL, C. (ed.) *Coastal Hazards*. Springer, Dordrecht: Coastal Research Library Series, 2013, p. 423-442.

BONETTI, J., RUDORFF, F. M., CAMPOS, A. V., SERAFIM, M. B. Geoindicator-based assessment of Santa Catarina (Brazil) sandy beaches susceptibility to erosion. *Coastal & Ocean Management, SI: Management Strategies for Coastal Erosion Problems*, 2018, N° 156, p. 198-208

BROWN, A. C., MCLACHLAN, A. Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation*, 2002, N° 29, p. 62-77.

BURZEL, A., DASSANAYAKE, D., NAULIN, M., KORTENHAUS, A., OUMERACI, H., WAHL, T., MUDERSBACH, C., JENSEN, J., GÖNNERT, G., SOSSIDI, K., UJEYL, G., PASCHE, E. *Integrated flood risk analysis for extreme storm surges (XTREMRISK)*. Shangai: COPRI, 2010.

BUSH, D. M., NEAL, W. J., YOUNG, R. S., PILKEY, O. H. Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. *Ocean Coastal and Management*, 1999, N° 42, p. 647-670.

CAMPOS-CABA, R. *Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico. Valparaíso, Chile: Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, 2016.

CARRASCO, A. R., FERREIRA, Ó., MATIAS, A., PACHECO, A. y FREIRE, P. Short-term sediment transport at a backbarrier beach. *Journal of Coastal Research*, 2012, N° 27(6), p. 1076-1084.

CARTER, R. W. G., WOODROFFE, C. D. *Coastal evolution. Late quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994.

CARVAJAL, M., CONTRERAS-LÓPEZ, M., WINCKLER, P., SEPÚLVEDA, I. Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America During an Intense Storm. *Pure Appl. Geophys*, 2017, DOI 10.1007/s00024-017-1584-0.

CEIA, F., PATRICIO, J., MÁRQUEZ, J., ALVEIRINHO DIAS, J. Coastal vulnerability in barrier islands: The high risk areas of the Ria Formosa (Portugal) system. *Ocean Coastal and Management*, 2010, N° 53, p. 478-486.

CLARK, G. E., MOSER, S. C., RATICK, S. J., DOW, K., MEYER, W. B., EMANI, S., JIN, W., KASPERSON, J. X., KASPERSON, R. E., SCHWARZ, H. E. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA., USA. *Mitigation Adaptation Strategies*, 1998, 3(1), p. 59-82.

COELHO, C. R., SILVA, F., VELOSO-GOMES, F., TAVEIRA-PINTO, F. A. Vulnerability analysis approach for the Portuguese west coast. En POPOV, V, BREBBIA, C. A. (eds.) *Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation*. Wessex: Institute of Technology, 2009.

- COOPER, J. A. G., MCLAUGHLIN, S. Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *Journal of Coastal Research*, 1998, Nº 14, p. 512-524.
- CROWELL, M., BUCKLEY, M. K. *Calculating erosion rates: using long-term data to increase data confidence. Coastal Zone'93*. New York: ASCE, 1993.
- DEL RIO, L., GRACIA, F. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology*, 2009, Nº 112, p. 82-95.
- DI PAOLA, G., IGLESIAS, J., RODRÍGUEZ, G., BENASSAI, G., AUCELLI, P., PAPPONE, G. Estimating coastal vulnerability in a meso-tidal beach by means of quantitative and semi-quantitative methodologies. *Journal of Coastal Research*, 2011, SI Nº 61, p. 303-308.
- ESTEVEZ, L. S., WILLIAMS, J. J., BROWN, J. M. Looking for evidence of climate change impacts in the eastern Irish Sea. *Natural Hazard Earth Systems*, 2011, Nº 11, p. 1641-1656.
- ESPARZA, C., WINCKLER, P. *Un análisis exhaustivo de las marejadas en la bahía de Valparaíso*. XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Octubre 18-20, 2017.
- FISCHER, D. W., ARREDONDO, M. C. Municipal Coastal Hazard Planning: Los Angeles and Orange County City Responses, California. *Journal of Coastal Research*, 1999, 15(4), p. 974-984.
- FLAX, L. K., JACKSON, R. W., STEIN, D. N. Community vulnerability assessment tool methodology. *Natural Hazards Review*, 2002, 3:4(163), p. 1527-6988.
- GARCÍA MORA, M. R., GALLEGO, J. B., WILLIAMS, A. T., GARCÍA NOVO, F. A. Coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 2001, 17(4), p. 802-811.
- GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 1991, Nº 89, p. 379-398.
- GORNITZ, V. M., DANIELS, R. C., WHITE, T. W., BIRDWELL, K. R. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research*, 1994, Nº12, p. 327-338.
- GORNITZ, V. M., BEATY, T. W., DANIELS, R. C. *A coastal hazards data base for the U.S. West coast*. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1997.
- GORNITZ, V. M., KANCIRUK, P. *Assessment of global coastal hazards from sea-level rise*. Proceedings of the 6th Symposium on Coastal and Ocean management, ASCE, July 11-14 1989, Charleston, USA, 1989, p. 1345-1359.
- GRACIA, F. J., RODRÍGUEZ-VIDAL, J., BENAVENTE, J., CÁCERES, L., LÓPEZ AGUAYO, F. Tectónica cuaternaria en la Bahía de Cádiz. En PALLÍ, L., ROQUÉ, C. (eds.) *Avances en el estudio del Cuaternario*. Girona: Univ. de Girona, 1999.
- HAMMER-KLOSE, E. S., THIELER, E. R. *Coastal vulnerability to sea-level rise, a preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts*. Charleston: U.S. Geological Survey, 2001.
- HANSON, H., LARSON, M. Implications of extreme waves and water levels in the southern Baltic Sea. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, 46(2), p. 292-302.
- HIDALGO, R., ARENAS, F., SANTANA, D. ¿Utópolis O Distópolis? Producción Inmobiliaria y Metropolización en el litoral central de Chile (1992-2012). *Revista EURE*, 2016, 42(126), p. 27-54.

HINKEL, J., KLEIN, R. J. T. Integrating knowledge for assessing coastal vulnerability to climate change. En MCFADDEN, L., NICHOLLS, R. J., PENNING-ROWSELL, E. C. (eds.) *Managing coastal vulnerability*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 2006, p. 61-78.

HINKEL, J., KLEIN, R. J. T. Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 2009, Nº 19, p. 384-395.

IBACETA, I., DÍAZ, H., WINCKLER, P., CATALÁN, P., AGREDANO, R., MOLTENI, F., CAMPOS-CABA, R. *Evolución morfológica de playas en la escala de tormentas*. Aplicación del modelo Xbeach en la Playa Reñaca. XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Octubre 18-20, 2017.

INSTITUTO DE RECURSOS MUNDIALES -WORLD RESOURCES INSTITUTE. *Decision Making in a Changing Climate*. Washington: United Nations Development Programme World Bank and World Resources Institute, 2010.

INVEMAR. *Climatologie de la vitesse et la direction des vents pour la mer territoriale sous juridiction colombienne 8° a 19° N - 69° a 84° W. Atlas ERS 1 et 2 et Quikscat, Colombie*. CNRS-UMRS 8591. Santa Marta: Laboratoire de Géographie Physique-Programa Geociencias, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, 2006.

IUCN. *Red list-State of the World's species*. Gland: IUCN, 2008.

IPCC CZMS. *Global climate change and the rising challenge of the sea. Report of the Coastal Zone Management Subgroup (CZMS), Response Strategies Working Group of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate General Rijkswaterstaat, Tidal Waters Division, The Netherlands, 1992.

IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2007.

IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

JENKS, G. F., CASPAL, F.C. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *An Association American Geographers*, 1971, 61(2), p. 217-244.

JONES, A., PHILLIPS, M. *Disappearing destinations*. London: CABI, 2011.

KAPPRAFF, J. The geometry of coastlines: a study in fractals. *Computers & Mathematics with Applications*, 1986, Nº12B(3/4), p. 655-671.

KELLY, J. *Mapping coastal hazards along a rocky coast with eroding bluffs and beaches*. Proceedings of the 3rd Symposium on the Iberian Atlantic Margin Faro, 2000.

KIRSHEN, P., WATSON, C., DOUGLAS, E., GONTZ, A., LEE, J., TIAN Y. Coastal flooding in the Northeastern United States due to climate change. *Mitig Adapt Strat Gl*, 2007, Nº 13, p. 437-451.

KOMAR, P.D., ALLAN, J. C. Increasing hurricane-generated wave heights along the U.S. East Coast and their climate controls. *Journal of Coastal Research*, 2008, Vol. 24, Nº 2, p. 479-488.

LI, K., LI, G. S. Vulnerability assessment of storm surges in the coastal area of Guangdong Province. *Natural Hazards Earth Systems Science*, 2011, Nº 11, p. 2003-2011.

LOICZ. *Coastal zone resources assessment guidelines*. Manila: LOICZ, 1995.

- MAIO, C. V., GONTZ, A. M., TENENBAUM, D. E., BERKLAND, E. P. Coastal Hazard Vulnerability Assessment of Sensitive Historical Sites on Rainsford Island, Boston Harbor, Massachusetts. *Journal of Coastal Research*, 2012, Nº28(1A), p. 20-33.
- MARTÍNEZ, C., CONTRERAS-LÓPEZ, M., WINCKLER, P., HIDALGO, H. GODOY, E., AGREDANO, R. Coastal erosion in central Chile: a new hazard? *Ocean and Coastal Management*, 2018, Nº 156, p. 141-155.
- MCLAUGHLIN, S., COOPER, J. A. G. A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, 2010, 9(3), p. 233-248.
- MCLAUGHLIN, S., MCKENNA, J., COOPER, J. A. G. Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, 2002, Nº 36, p. 487-497.
- MOLINA, M., CAMPOS, R., MANOSALVA, D., BECERRA, D., GÁLVEZ, B. Efecto de las marejadas del 6 y 8 de Agosto de 2015 en 3 playas de la Bahía de Valparaíso. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Octubre 21-23, 2015.
- MONMONIER, M. S. *Coast lines: how mapmakers frame the world and chart environmental change*. Chicago, USA: University of Chicago Press, 2008.
- MOORE, L. Shoreline Mapping Techniques. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(1), p. 111-124.
- MULER, M., BONETTI, J. An integrated approach to assess wave exposure in coastal areas for vulnerability analysis. *Marine Geodesy*, 2014, 37(2), p. 220-237.
- NGUYEN, T. T. X., WOODROFFE, C. D. Assessing relative vulnerability to sea-level rise in the western part of the Mekong River Delta in Vietnam. *Sustainability Science*, 2015, Nº 25, p. 1-15.
- NGUYEN, T. T. X., BONETTI, J., ROGERS, K., WOODROFFE C. D. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: a review of concepts, approaches and vulnerability indices. *Ocean Coastal and Coastal Management*, 2016, Nº123, p. 18-43.
- NICHOLLS, R. J., DE LA VEGA-LEINERT, A. Synthesis of sea-level rise impacts and adaptation costs for Europe. En DE LA VEGA-LEINERT, A., NICHOLLS, R. J., TOL, R. S. J. (eds.) *European vulnerability and adaptation to the impacts of accelerated sea level rise*. Enfield: Flood Hazard Research Center, 2000.
- NUNES, M. A., FERREIRA, O., SCHAEFER, M., CLIFTON, J., BAILY, B., MOURA, D., LOUREIRO, C. Hazard assessment in rock cliffs at Central Algarve (Portugal): A tool for coastal management. *Ocean Coastal and Management*, 2009, Nº 52, p. 506-515.
- ÖZYURT, G., ERGIN, A. Application of sea level rise vulnerability assessment model to selected coastal areas of Turkey. *Journal of Coastal Research*, 2009, Nº 51, p. 248-251.
- ÖZYURT, G., ERGIN A. Improving Coastal Vulnerability Assessments to Sea-Level Rise: A New Indicator-Based Methodology for Decision Makers. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(2), p. 265-273.
- PAJAK, M. J., LEATHERMAN, S. The high water line as shoreline indicator. *J Coast Res.*, 2002, 18(2), p. 329-337.
- PENDLETON, E. A., THIELER, E. R., WILLIAMS, S. J. Importance of coastal change variables in determining vulnerability to sea- and lake-level change. *Journal of Coastal Research*, 2010, Nº 26, p. 176-183.
- PEREIRA, C., COELHO, C. Mapas de risco das zonas costeiras por efeito da ação energética do mar. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 2013, 13(1), p. 27-43.

PHILLIPS, M., CRISP, S. Sea level trends and NAO influences: The Bristol Chanel/Seven Estuary. *Global Planet Change*, 2010, N° 73, p. 211-218.

PYE, K., BLOTT, S. J. Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates: An investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK. *Geomorphology*, 2008, N° 102, p. 652-666.

RAJI, O., NIAZI, S., SNOUSSI, M., DEZILEAU, L., KHOUAKHI, A. Vulnerability assessment of a lagoon to sea level rise and storm events: Nador lagoon (NE Morocco). *Journal of Coastal Research*, 2013, N° 65, p. 802-807.

RANGEL-BUITRAGO, N., ANFUSO, G. Winter wave climate, storms and regional cycles: the SW Spanish Atlantic coast. *Int J Climato.*, 2013, 33, p. 2142-2156.

RANGEL-BUITRAGO, N., ANFUSO, G., CORREA, I., ERGIN, A., WILLIAMS, A. T. Assessing and managing scenery of the Caribbean Coast of Colombia. *Tourism Management*, 2013, N° 35, p. 41-58.

RANGEL-BUITRAGO, N., ANFUSO, G. *Risk assessment of storms in coastal zones: Case studies from Cartagena (Colombia) and Cadiz (Spain)*. Springer, Dordrecht: The Netherlands, 2015.

RANGEL-BUITRAGO, N. G., ANFUSO, G., WILLIAMS, A., BONETTI, J., GRACIA, A., ORTIZ, J. C. Risk assessment to extreme wave events: Barranquilla-Ciénaga, Caribbean of Colombia Case Study. En BOTERO, C., CERVANTEZ, O. y FINK, C (eds.). *Beach Management Tools: Concepts, Methodologies and Case Studies*. Amsterdam: Springer International Publishing, 2017.

RESTREPO, J., OTERO, L., CASAS, A. C., HENAO, A., GUTIÉRREZ, J. Shoreline changes between 1954 and 2007 in the marine protected area of the Rosario Island Archipelago (Caribbean of Colombia). *Ocean Coastal and Management*, 2012, N° 69, p. 133-142.

ROMIEU, E., WELLE, T., SCHNEIDERBAUER, S., PELLING, M., VINCHON, C. Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications. *Sustainability Science*, 2010, N° 5, p. 159-170.

RYGEL, L., O'SULLIVAN, D., YARNAL, B. A method for constructing a social vulnerability index: an application to hurricane storm surges in a developed country. *Mitigation Adaptation Strategic Global Change*, 2006, N° 11, p. 741-764.

SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York, USA: McGraw-Hill, 1980.

SHARPLES, C.; MOUNT, R., PEDERSEN, T. *The Australian coastal smartline geomorphic and stability map. Version 1: Manual and Data Dictionary. V. 1.0. Report for Geoscience Australia and the Department of Climate Change, by School of Geography & Environmental Studies, University of Tasmania*. Australia: Hobart, 2009.

SHAW, J., TAYLOR, R. B., FORBES, D. L., RUZ, M. H., Solomon, S. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. *Bulletion Geological Survey Canada*, 1998, N° 505, p. 1-79.

SHERIN, A. G. Linear reference data models and dynamic segmentation: application to coastal and marine data. En WRIGHT, D. y BARTLETT, D. (eds.) *Marine and coastal geographic information systems*. London, UK: Taylor & Francis, 1999, p. 95-115.

SMALL, C., NICHOLLS, R. J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 2003, N° 19, p. 584-599.

SMITH, M. J., GOODCHILD M. F., LONGLEY, P. A. *Geospatial analysis. A comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. 2nd Edition. Leicester, UK: Matador, 2007.

SOOMERE, T. Extremes and decadal variations of the northern Baltic seawave conditions. En PELINOVSKY, E., KHARIF, C. (eds.) *Extreme Ocean Waves*. Springer-Verlag: Berlin, 2008.

STOCKDON, H. F., HOLMAN, R. A., HOWD, P. A., SALLENGER, A. H. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 2006, Nº 53, p. 573-588.

SUNAMURA, T. *Geomorphology of Rocky Coasts*. New York: John Wiley & Sons, 1992.

THIELER, E. R., HIMMELSTOSS, E. A., ZICHICHI J. L., MILLER, T. L. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0-An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. US Geological Survey, Woods Hole, 2005.

TRENHAILE, A. S. Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology*, 2002, Nº 48, p. 7-22.

VAFEIDIS, A. T., NICHOLLS, R. J., MCFADDEN, L., TOL, R. S. J., HINKEL, J., SPENCER, T., GRASHOFF, P. S., BOOT, G., KLEIN, R. J. T. A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24(4), p. 917-924.

WILLIAMS, A. T., DAVIES, P., ERGIN, A., BALAS, C. Coastal recession and the reliability of planned responses: Colhuw beach, The Glamorgan heritage coast, Wales, UK. *J Coast Res.*, 1998, Nº 26, p. 72-79.

WILLIAMS, A. T., RANGEL-BUITRAGO, N., ANFUSO, G., CERVANTES, O., BOTERO, C. Litter impacts on scenery and tourism on the Colombian north Caribbean coast. *Tourism Management*, 2016, Nº 55, p. 1-16.

WINCKLER, P. M., CONTRERAS, J., BEYÁ, J., MOLINA, M. El temporal del 8 de agosto de 2015 en la región de Valparaíso, Chile Central. Manuscript sent to *Latin American Journal of Aquatic Research*, 2017, 45(4), p. 622-648.

ZANUTTIGH., SIMCIC, D., BAGLI, S., BOZZEDA, F., PIETRANTONI, L., ZAGONARI, F., HOGGART, S., NICHOLLS, R. THESEUS decision support system for coastal risk management. *Coastal Engineering*, 2014, Nº 87, p. 218-239.

Notas

1. Departamentos de Física y Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Km 7 Antigua vía Puerto Colombia, Barranquilla, Atlántico, Colombia. E-mail: nelsonrangel@mail.uniatlantico.edu.co
2. Laboratorio de Oceanografía Costera, Universidad Federal de Santa Catarina, Servidão dos Coroas 503, Barra da Lagoa, Florianópolis, Brasil. E-mail: jarbas.bonetti@ufsc.br
3. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile. Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN). E-mail: camartinezr@uc.cl

El GEOLibro “La zona costera en Chile: adaptación y planificación para la resiliencia” es un esfuerzo académico del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Cátedra UNESCO-Cousteau “Formación de especialistas en Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sustentable de la Zona Costera” y el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres, CIGIDEN (CONICYT/FONDAP/15110017), cuyo propósito es apoyar el diagnóstico sobre el estado de conservación actual de la zona costera en Chile y motivar la discusión sobre la necesidad de una nueva gobernanza capaz de hacer frente a los desafíos de adaptación en contexto de Cambio Climático.

Este GEOLibro compila a través de 16 artículos, los resultados de investigación de destacados especialistas nacionales e internacionales sobre la zona costera, los cuales abordan desde una visión interdisciplinaria, las amenazas y riesgos costeros, los problemas de antropización de la costa y el rol de la planificación territorial en la gestión integrada de áreas litorales. Este conocimiento actualizado sobre la dinámica de la zona costera y los problemas territoriales que presenta, se espera sirva para relevar la importancia de proteger la diversidad de ambientes costeros y que actualmente se encuentran amenazados o degradados por diversas actividades antrópicas poco reguladas y de regulación poco efectiva.



INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
FACULTAD DE HISTORIA, GEOGRAFÍA
Y CIENCIA POLÍTICA



CIGIDEN



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Cátedra UNESCO-Cousteau / Chile
Formación en Especialistas en Ordenamiento y
Desarrollo Sustentable de la Zona Costera



OBSERVATORIO
DE LA COSTA

ISBN: 978-956-14-2442-5



9 789561 424425