



Geomorfología, ascenso del nivel del mar y evolución de la línea de costa: Análisis en el Golfo de Morrosquillo

Danna Lucia Anaya Causado

Universidad del Norte
Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias
Barranquilla, Colombia

2021

***Geomorfología, ascenso del nivel del mar y evolución de la línea de costa:
Análisis en el Golfo de Morrosquillo***

[Danna Lucia Anaya Causado](#)

Tesis o trabajo de investigación presentada (o) como requisito parcial para optar
al título de:

Geólogo

Director

PhD. Juan Camilo Restrepo López

Departamento de Física y Geociencias

Universidad del Norte

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias

Barranquilla, Colombia

2021

*Después de todo tú eres,
tu única muralla
si no te saltas, nunca darás un sólo paso...*

Luis Alberto Spinetta

Agradecimientos

A mi padre que ha dado todo por mí. A él le debo todo mi ser y es mi empuje principal para seguir adelante.

A mi director y profesor Juan Camilo Restrepo quien ha sido una gran influencia para mí en la carrera. Le agradezco principalmente la motivación constante que me permitió confiar en mi trabajo. Gracias a sus correcciones, su paciencia y sus consejos.

Finalmente, gracias a todos los profesores del departamento de física y geociencias y a mis compañeros quienes me han ayudado en mi crecimiento profesional y como ser humano.

Resumen

La susceptibilidad por amenazas y riesgos naturales en las zonas costeras son dadas fundamentalmente por la respuesta geomorfológica de los diferentes procesos generados, tales como la erosión y el ascenso del nivel del mar. Debido a que las geoformas son factores importantes que nos orienta sobre los tipos de procesos que se ocasionan en los litorales, la geomorfología costera se debe tener en cuenta para los estudios que busquen mitigar los efectos erosivos de la costa. A causa del incremento acelerado del nivel del mar y las amenazas que ocasionan a los litorales, uno de los métodos científicos actuales para disminuir las amenazas es cuantificar el retroceso costero debido a este incremento. La regla de Bruun es un método sencillo de utilizar que calcula este retroceso, por lo cual, se ha incorporado en muchos estudios alrededor del mundo. Sin embargo, en las últimas décadas, se ha cuestionado la fiabilidad de este método para la gestión de planificación costera, debido a que ignora muchos principios físicos, oceanográficos y geomorfológicos. Por lo tanto, en el presente trabajo se busca relacionar los factores geomorfológicos, con la evolución costera y verificar la validez de la regla de Bruun al realiza un estudio de la geomorfología de 1969 y de la actualidad en el Golfo de Morrosquillo. Además, se calcula la erosión costera de los últimos 50 años por medio de la implementación del modelo DSAS y se lleva a cabo un análisis de la susceptibilidad frente a la erosión costera dada principalmente por factores geomorfológicos y según las tasas de regresión de la línea de costa. Por otro lado, se realiza un estudio de la validez de la regla de Bruun, comparándola con el modelo de Edelman y la Regla de Robin dando como resultados una estimación de la variación de la recesión costera de acuerdo con el ascenso del nivel del mar y diferentes factores que afectan el perfil de playa del Golfo de Morrosquillo.

Palabras clave: Geomorfología, erosión costera, ascenso del nivel del mar, Regla de Bruun.

Abstract

The susceptibility in coastal areas to natural hazards and risks are fundamentally given by the geomorphological response of the different processes generated, such as erosion and sea level rise. For this reason, coastal geomorphology should be implemented into studies with the objective to mitigate the erosive effects of the coastlines. The accelerated sea level rise and the hazards that cause to the coastlines should be incorporated in studies of shorelines evolution, one of the current scientific methods is to quantify the coastal retreat due to this increase. Bruun's rule is an easy method that calculates this retreat; it has been used in many studies around the world. However, in recent decades, the reliability of this method for coastal planning management has been questioned, due to it ignoring many important parameters such as physical, oceanographic, and geomorphological principles. Therefore, the present work seeks to relate geomorphological factors with coastal evolution and try to verify the validity of Bruun's rule. It carried out a geomorphology study from 1969 and today in the Gulf of Morrosquillo. In addition, the coastal erosion of the last 50 years is calculated through the implementation of the DSAS model and it implementan analysis of the susceptibility to erosion, mainly due to geomorphological factors and according to the regression rates of the coastline. On the other hand, a study of the validity of Bruun's rule is carry outed, comparing it with the Edelman model and Robin's Rule, giving as results an estimate of the coastal recession according to the sea level rise and different factors that affect the profile of the Gulf of Morrosquillo beach.

Keywords: Geomorphology, coastal erosion, sea level rise, Bruun's rule.

Contenido

- 1. Introducción**
- 2. Planteamiento del problema**
- 3. Objetivos**
 - 3.1. Objetivos Generales
 - 3.2. Objetivos Específicos
- 4. Zona de estudio**
- 5. Datos y métodos**
 - 5.1. Análisis de imágenes satelitales y realización de mapas geomorfológicos
 - 5.2. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) y mapa de susceptibilidad
 - 5.3. Regla de Bruun
- 6. Resultados**
 - 6.1. Mapas Geomorfológicos
 - 6.2. Tasas de erosión de la línea costera del Golfo de Morrosquillo
 - 6.3. Mapa de Susceptibilidad frente a la erosión costera
 - 6.4. Regla de Bruun, Modelo de Edelman y Regla de Robin
- 7. Análisis de Resultados**
 - 7.1. Erosión y Geomorfología
 - 7.2. Influencia del nivel del mar
- 8. Conclusiones y recomendaciones**
 - 8.1. Conclusiones
 - 8.2. Recomendaciones
- 9. Referencias**

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio: A) Zona norte de Colombia y B) Litoral del Golfo de Morrosquillo, en donde se destaca la Ciénaga de La Caimanera y el PNR Boca de Guacamayas. -----	03
Figura 2. Mapa Geomorfológico 1:100.000 (SIG-OT, 2018). -----	07
Figura 3. A) Estructuras ubicadas en la zona sur del golfo con el objetivo de mitigar la erosión costera. B) Zona de Tolú en la cual se evidencia que las construcciones se encuentran muy cerca de la línea de costa. C) Partes de la ciénaga de la Caimanera en la cual el manglar está en contacto directo con el agua salada. -----	08
Figura 4. Serie de tiempo de la base de datos sobre el ascenso del nivel del mar en el Golfo de Morrosquillo (1992-2019). -----	13
Figura 5. Mapa geomorfológico actual de la Ciénaga de la Caimanera. Escala 1:12.000. -----	15
Figura 6. Mapa geomorfológico de 1969 de la Ciénaga de la Caimanera. Escala 1:30.000. -----	16
Figura 7. Mapa geomorfológico actual de PNR Boca de Guacamayas. Escala 1:12.000. -----	17
Figura 8. Mapa geomorfológico de 1969 de Boca de Guacamayas. Escala 1:30.000. -----	17
Figura 9. Mapa de las tasas de regresión lineal desde 1969 hasta el 2020. -----	20
Figura 10. Mapa del movimiento neto de la línea de costa teniendo en cuenta el año de 1969 y del 2020. -----	21
Figura 11. Mapa de susceptibilidad frente a la erosión costera en el Golfo de Morrosquillo. -----	22
Figura 12. Detalles entre las categorías de PNR Boca de Guacamayas (Izquierda) entre la Ciénaga de la Caimanera (Derecha) -----	23
Figura 13. Relación entre el mapa de susceptibilidad frente a la erosión costera (Izquierda) y el mapa geomorfológico (Derecha) en la zona central del Golfo de Morrosquillo. -----	28
Figura 14. Relación entre el mapa de susceptibilidad frente a la erosión costera (Izquierda) y el mapa geomorfológico (Derecha) en la zona norte del Parque regional natural Bocas de Guacamayas. -----	29

Lista de Tablas

Tabla 1. Información de las imágenes satelitales usadas para el trazo de las líneas de costa. -----	
-----	09
Tabla 2. Profundidad del perfil de playa asumidos de acuerdo con la época del año y a la intervención antropogénica. -----	12
Tabla 3. Promedio de pendientes asumidos para la ecuación de la regla de Robin. -----	12
Tabla 4. Datos del nivel medio del mar usados para los cálculos. -----	14
Tabla 5. Variación geomorfológica de la Ciénaga de la Caimanera y PNR Boca de Guacamayas desde 1969 hasta la actualidad. -----	18
Tabla 6. Longitud y porcentajes de las categorías de susceptibilidad frente a la erosión costera en el Golfo de Morrosquillo. -----	22
Tabla 7. Resultados del modelo de Edelman y la Regla de Bruun. -----	24
Tabla 8. Resultados de la regla de Robin (modelo RDA). -----	25
Tabla 9. Porcentajes de la variabilidad de los datos obtenidos en los diferentes escenarios y reglas--	25

1. Introducción

Actualmente una de las grandes preocupaciones científicas es la susceptibilidad frente a amenazas y riesgos naturales en las zonas costeras debido al incremento poblacional y al desarrollo no planificado. La dinámica originada en los litorales por factores como el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático, las estructuras antrópicas, los cambios geomorfológicos y la evolución de la línea de costa (regresión, transgresión), han sido abordados por diversos estudios en los últimos años (e.g. Lacambra et al., 2003; Robertson et al., 2003; Robertson et al., 1999; Rangel Buitrago, 2009; Correa, 2007; Posada et al., 2008). Los procesos generados por el ascenso del nivel del mar no son uniformes a nivel mundial. Estos cambios dependen de la dinámica océano-atmósfera, los movimientos verticales locales de la corteza, incluyendo las características texturales de los sedimentos, la extracción de aguas subterráneas y combustibles fósiles y los procesos tectónicos de escala local y regional, entre otros aspectos (Wuebbles et al. 2017). Así como el ascenso del nivel del mar afecta las zonas costeras, la geomorfología también presenta un valor fundamental en el análisis cuantitativo de la vulnerabilidad de estos ambientes. Las zonas litorales comprenden geoformas como acantilados, terrazas marinas, espigas y barras litorales, y planicies costeras que presentan una alta variabilidad por la acción de las olas, los movimientos tectónicos, los cambios en el nivel del mar, la erosión, la acreción y los procesos antropogénicos (Torresan et al., 2012).

En 1962 Per Bruun estableció una regla (i.e. Regla de Bruun) en la que indicaba que como consecuencia del ascenso del nivel del mar se produciría un desplazamiento hacia la tierra y hacia arriba del perfil del lecho marino. Esta regla tiene en cuenta la profundidad máxima de intercambio de material entre la costa y el mar, la distancia horizontal de la costa hasta la profundidad del perfil activo, el aumento del nivel del mar, la elevación estimada de dunas o bermas para el área erosionada y la extensión horizontal de la recesión costera (Bruun, 1962). Esta aproximación ha sido usada por científicos durante casi cinco décadas de manera rutinaria, ya que se considera como simple y fácil de realizar (Ranasinghe et al., 2012), puesto que solo requiere de registros a largo plazo, evidencia sedimentológica y geomorfológica, tasas del aumento del nivel del mar y la morfología de la costa, considerando que la pendiente cerca de la costa es constante en el tiempo (Rosen, 1978). No obstante, se ha llegado a considerar que la regla de Bruun es obsoleta. Ya que se asumen muchas suposiciones imprecisas al considerar por ejemplo un perfil de equilibrio con un balance cerrado y establecer que el ascenso del nivel del mar siempre va a provocar un retroceso continuo y progresivo en la línea de costa. Además, omite variables importantes como las corrientes y el viento y se basa en relaciones erróneas al no tener en cuenta que el cambio de pendientes genera variación en las tasas de retroceso de la costa (Cooper et al., 2004).

El litoral Caribe Colombiano presenta una línea costera de 1.818 km, con gran diversidad geomorfológica. Sus costas están caracterizadas por una alta concentración de población y gran

desarrollo turístico y portuario. Uno de los municipios con mayor impacto turístico es Santiago de Tolú, ubicado en el golfo de Morrosquillo (Sucre) (Robertson et al., 2003). Según el IDEAM (1997) el golfo de Morrosquillo presenta influencia de sedimentación marina con poco aporte de sedimentos continentales. Debido a la intervención antrópica con la interrupción de la deriva litoral de sedimentos, se ha generado un desequilibrio en la estabilidad de los cordones litorales y las terrazas marinas. Lo cual ha ocasionado que posiblemente, en conjunto con el ascenso del nivel del mar, se incrementen los procesos erosivos y la reactivación de antiguos sistemas lagunares. Además, Alarcón et al., (2001) estima que para el año 2060 haya un ascenso de hasta 40 cm en el litoral caribe (Robertson et al., 2003). Al generarse este proceso sobre la costa se estiman diferentes efectos físicos, siendo la erosión uno de los factores más importantes (Mimura, 1996). En concordancia con el incremento de las actividades turísticas en el Caribe Colombiano durante los últimos 30 años, la erosión se ha convertido en un problema de gran magnitud y de tendencia dominante (Rangel-Buitrago et al., 2015; Correa et al., 2007; Rangel-Buitrago & Anfuso, 2009; Correa & Morton, 2011; Rangel et al., 2013).

Debido a la carencia de estudios con información técnica existente limitada, o con un enfoque socioeconómico sobre los procesos geomorfológicos y de la evolución costera; se hace imprescindible emprender proyectos detallados orientados a la recuperación de los bosques de manglar y los cordones litorales de la Ciénaga de Caimaneras y el Parque Regional Natural Boca de Guacamayas ubicados en el Golfo de Morrosquillo (**Figura 1**). Es necesario estudiar cómo la zona costera responde a la interferencia humana actual, cómo respondió en el pasado y cómo podrá responder en el futuro a procesos naturales y antrópicos. Por lo cual, en este estudio se pretende analizar la dinámica costera del área que corresponde a la zona del Golfo de Morrosquillo, ubicado en el departamento de Sucre y Córdoba, en el sector meridional de la costa colombiana. Abarca las zonas desde Punta San Bernardo hasta Caño Lobo ubicados entre $9^{\circ}41'55.86''$ N a $9^{\circ}23'56.11''$ N y $75^{\circ}42'10.75''$ O hasta $75^{\circ}46'29.22''$ W (**Figura 1**). En este estudio se abordan factores como el ascenso del nivel del mar, la geomorfología y la variación de la línea de costa, en el contexto de los procesos antropogénicos ocasionados por el incremento turístico de la zona. Asimismo, se analiza la evolución de la línea de costa durante las últimas décadas considerando los procesos ya mencionados por medio de la regla propuesta por Bruun, para así, analizar la pertinencia y aplicabilidad de este método.

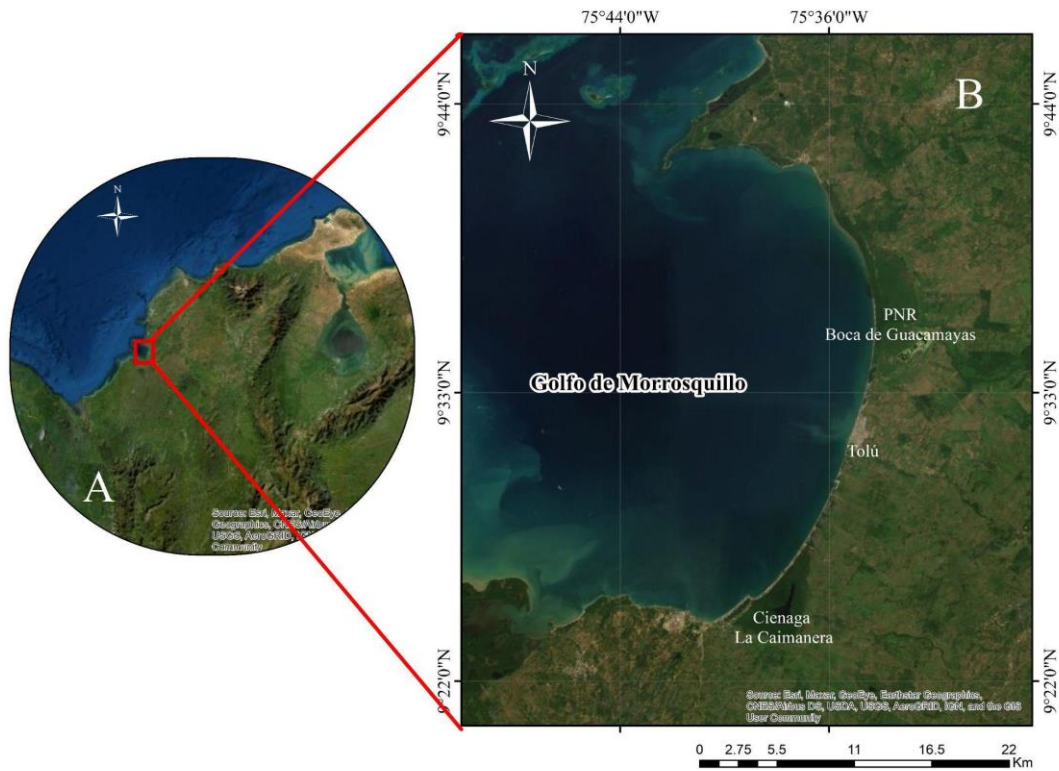


Figura 1. Localización del área de estudio: A) Zona norte de Colombia y B) Litoral del Golfo de Morrosquillo, en donde se destaca la Ciénaga de La Caimanera y el PNR Boca de Guacamayas.

2. Planteamiento del problema

La carencia de estudios detallados sobre la interacción de los procesos geológicos, geomorfológicos y oceanográficos en las zonas costeras del Golfo de Morrosquillo ha sido un obstáculo en la implementación de programas de preservación y restauración de ecosistemas estratégicos. El Golfo se caracteriza por actividades turísticas que han ocasionado un desequilibrio y deterioro en la dinámica de los ecosistemas (manglares, arrecifes, asociaciones vegetales) (Barreto et al., 1999). La protección que tiene el sistema litoral, gracias a los manglares y a la vegetación de la zona, experimenta un descenso debido a este deterioro, lo cual contribuye al incremento de la erosión costera (Correa, 2014). Se estima que 26,5 km de costa en el departamento de Sucre experimenta una alta tasa de erosión; particularmente, en la zona de Tolú. Además, se ha estimado una tasa de erosión de aproximadamente 3 m/año en los últimos 10 años para este sector (Rangel-Buitrago et al., 2015).

En general, la erosión está ligada a procesos oceanográficos como el oleaje y el ascenso del nivel del mar, geológicos/geomorfológicos como la pendiente de las playas y las propiedades de los sedimentos, y antropogénicos como construcciones y la extracción de arenas (Rijn, 2011); lo cual genera problemáticas a la comunidad en su ámbito socioeconómicos a largo plazo. Por consiguiente, se requieren investigaciones actualizadas sobre la dinámica de los procesos locales para ejecutar proyectos

de restauración de ambientes costeros, de mitigación de amenazas costeras, u orientados a disminuir las problemáticas ambientales que se experimentan.

El modelo propuesto por Bruun asume un perfil de equilibrio que se mantendrá sin cambios a medida que la costa se traslada hacia atrás y hacia arriba en respuesta al ascenso del nivel del mar. Ha sido la base para muchos modelos numéricos que intentan predecir la evolución de las playas (Cooper et al., 2004). Sin embargo, recientemente se han señalado imprecisiones de este modelo entre las cuales se encuentran los supuestos restrictivos. Se asume como un modelo bidimensional con un balance cerrado de materiales en el perfil, lo que indica que no hay ganancia ni pérdida de sedimentos (Zhang et al., 2004). Además, se establece que el ascenso del nivel relativo del mar siempre conduce a un retroceso en la línea de costa (Thom, 1983). Estos supuestos al ser limitativos no son aplicables para todas las zonas litorales a causa de que se están ignorando procesos naturales. Por otro lado, la regla omite variables importantes porque solo considera el movimiento del sedimento en la orilla por acción del oleaje, sin tener en cuenta las corrientes y el viento (Cooper et al., 2004). Asimismo, asume que el cambio de pendientes no altera las tasas de retroceso. Lo cual resulta ser impreciso, ya que a menor pendiente se genera un retroceso más acelerado de la línea de costa, en comparación con las pendientes mayores (Cattaneo and Steel, 2003). El modelo también contiene conceptos equivocados ya que describe la forma de la costa como un perfil en equilibrio, ocasionando que esta regla no sea aplicable universalmente en todos los litorales (Pilkey et al., 1993). Por otro lado, Crooks (2004) establece que la respuesta geomorfológica que se genera producto del ascenso del nivel del mar determina la evolución y resiliencia de los ecosistemas frente a procesos oceanográficos o de erosión, en consecuencia, la geomorfología de las zonas debe reconocerse e incorporarse en las estrategias de planificación. Sin embargo, la regla de Bruun omite el papel de los cambios geomorfológicos que se originan en la costa como consecuencia del ascenso del mar, originando que las proyecciones sean imprecisas, ya que la linealidad de la costa va a depender en gran medida de las geoformas. Por ejemplo, Ranasinghe et al. (2012) establece que la estimación sobre la recesión costera con respecto al ascenso del nivel del mar, como lo calcula la regla de Bruun, es inadecuado para los estudios destinados a gestión de riesgos, ya que se necesitan valores probabilísticos claros del retroceso de la línea de costa.

En síntesis, debido a que el modelo está ignorando principios importantes, oceanográficos y geológicos, se considera que no puede predecir con exactitud la evolución de la línea de costa con respecto al ascenso del nivel del mar (Ranasinghe et al., 2012). Por lo cual, este estudio busca estudiar la evolución costera y analizar los procesos que ha experimentado a través de los años, para así estimar un comportamiento a futuro que nos permita contrarrestar las problemáticas de la zona. Además, se desea validar la eficacia de un modelo tan utilizado como lo es la regla de Bruun a una escala local y compararlo con otros modelos más recientes. De este modo, se abordan las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo ha cambiado la línea de costa y las geoformas en la ciénaga de la caimanera y Guacamayas? Y ¿cuál ha sido su relación con respecto al ascenso del nivel del mar?
- ¿Existe un retroceso continuo y progresivo en la línea de costa, tal y como lo indica la regla de Bruun?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Establecer e interpretar los cambios en la línea de costa, considerando su relación con el ascenso del nivel del mar y la estructura geomorfológica.

3.2. Objetivos Específicos

- Estimar la tasa de erosión y la susceptibilidad frente a la erosión de la línea de costa y en el golfo de Morrosquillo.
- Analizar la aplicabilidad de la regla de Bruun, considerando las transiciones de la línea de costa, la configuración geomorfológica y el ascenso del nivel del mar durante los últimos 50 años.
- Establecer un modelo conceptual que ilustre las diferencias en la evolución geomorfológica generada por procesos naturales y por procesos antropogénicos.

4. Zona de estudio

El golfo de Morrosquillo se encuentra ubicado entre el departamento de Sucre y Córdoba en la Costa Caribe norte de Colombia (Figura 1). El golfo se describe como un área importante para el desarrollo socioeconómico de la costa Caribe. Esta zona alberga el terminal marítimo petrolero de Coveñas, el puerto industrial de Tolcemento y varios sistemas de ciénagas y manglares (Barreto et al., 1999). Entre los estudios más destacados de carácter geomorfológico, oceanográfico y de gestión ambiental realizados en la zona se encuentra el Diagnóstico ambiental del Golfo de Morrosquillo de Barreto et al. (1999), que estudia los procesos naturales y ecosistemas de la zona, así como la contaminación que se está experimentando en el golfo de Morrosquillo. Molina et al. (1994) analiza la geomorfología del golfo y la dinámica marina que se presenta teniendo en cuenta la sedimentología y la variación de la línea de costa, estableciendo que la velocidad y dirección del viento determina la circulación de las aguas y la distribución del material en suspensión; y Franco et al. (2007) que realiza una base

cartográfica del golfo con escala de 1:2000 en el cual se identificaron playas, zonas de alta mareas, áreas erosionadas, áreas afectadas por el nivel medio del mar y por rellenos antrópicos.

El golfo presenta un clima tropical con temperaturas mayores de 24 °C, con vientos de dirección Norte-Este. Las precipitaciones anuales ascienden aproximadamente a 850 mm, concentradas principalmente en la época húmeda comprendida entre los meses de Abril y Noviembre (Franco et al., 2007). Adicionalmente, el área tiene la particularidad de estar protegida de vientos y corrientes marinas fuertes debido a su morfología (i.e. forma de semicírculo) y su posición geográfica con cercanía al norte de las islas Barú y del Rosario, lo que ocasiona que disminuya la intensidad de los vientos Alisios que van en dirección Norte-Este (Franco et al., 2007). En cuanto a las condiciones oceanográficas el Caribe Colombiano se encuentra influenciado por la corriente del caribe, que va del Este hacia el Oeste, y la contracorriente de Panamá que se traslada hacia el norte y asciende con el contorno de la costa. Específicamente, en el golfo de Morrosquillo, durante la época seca, se genera una corriente perpendicular a la costa Este en el sur del golfo, en dirección Este en el centro y dirección Sur-Este en la parte norte (Barreto et al., 1999). En época húmeda la zona se encuentra afectada, en su mayoría, por la contracorriente de Panamá generando un flujo de corriente predominante Sur-Norte (Moreno 1997). Por otro lado, en general, el oleaje proviene del Norte. Con altura máxima de 1,50 m y mínima de 0,30 m y períodos que van de 3 s hasta 14 s. Sin embargo, en época seca su dirección predominante es Noroeste-Noreste, generando amenazas a las playas del golfo (Barreto et al., 1999).

El litoral del golfo está compuesto principalmente por sedimentos aluviales sin diferenciación, con una composición de arenas, gravas y guijarros con intercalación de arcillas y un espesor de 15 m aproximadamente de aluvión (Granados, 1988). Por otro lado, el transporte de sedimento del golfo es principalmente de arenas, teniendo como origen la punta de San Bernardo en la parte Norte del golfo hasta la boca del Francés y la Bahía de Cispatá hacia Tolú (Franco et al., 2007). En relación con las características geomorfológicas, el área entre Tolú y Coveñas está clasificada como una llanura costera constituida por una planicie aluvial plana a levemente inclinada. También presenta franjas de manglar y lagunas costeras, cordones litorales y antiguas barras litorales que cuentan con playas de máximo 10 m de ancho. Estas playas presentan procesos erosivos, con un déficit de sedimento en época de poco oleaje entre punta Bello y la boca de la Ciénaga de la Caimanera. La evolución histórica de esta línea de costa ha presentado un retroceso generalizado de aproximadamente 160 km entre el periodo de 1938-2005 (Correa et al., 2007). En consecuencia, esta zona se describe como un litoral principalmente transgresivo, en el cual las playas están desapareciendo rápidamente (Invemar, 2003; Correa & Vernet, 2004; Rangel & Posada, 2006, Correa et al., 2005; Correa & Morton, 2006, Correa et al., 2007). La parte sur del Golfo de Morrosquillo está caracterizada por intervenciones antrópicas, tales como edificaciones importantes y construcciones de carreteras, lo cual, ha contribuido a la erosión histórica, alcanzando una reducción neta de 30 m aproximadamente. Este retroceso costero ha sido mitigado parcialmente con estructuras como espolones simples, espolones en T y muros de contención

(Figura 3). Por otro lado, en la parte norte del Golfo, desde Tolú hasta Berrugas se ha producido un adelgazamiento de playas a velocidades estimadas entre 0.5 y 1 m/año (Correa et al., 2007). Para Correa (2014) hay cuatro factores principales que están contribuyendo a la erosión de la zona de estudio, siendo estos el deterioro de los ecosistemas de manglar, la falta de infraestructura adecuada para prevenir la erosión, el cambio del delta del río Sinú que contribuyó a la reducción del aporte de sedimentos y el aumento del nivel del mar. La zona entre punta Bello y punta la Caimanera se encuentra clasificada geomorfológicamente en terrazas marinas y fluviales, cordones litorales y playas angostas con grado medio de erosión. Adicionalmente, se localiza una zona de influencia actual y antigua del río Sinú y una planicie aluvial activa del mismo (Figura 2) (Barreto et al., 1999).

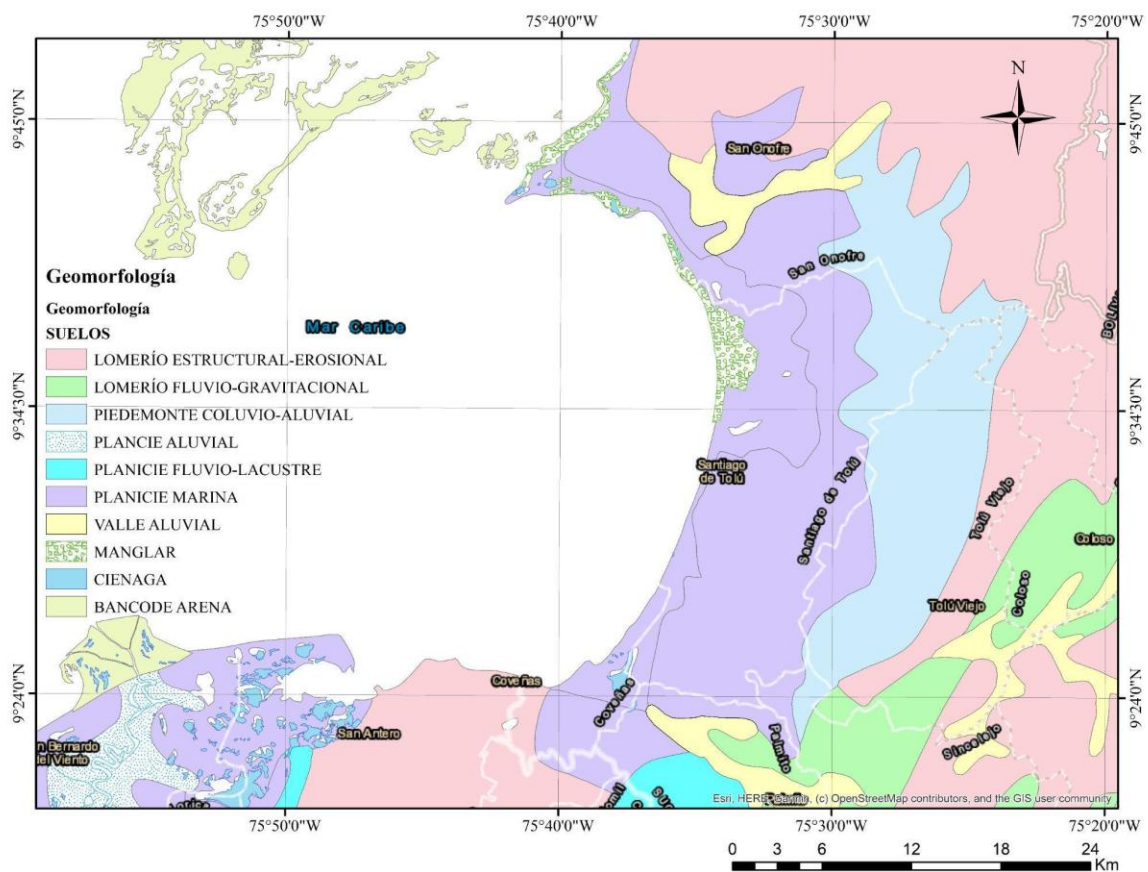


Figura 2. Mapa Geomorfológico 1:100.000 (SIG-OT, 2018).



Figura 3. A) Estructuras ubicadas en la zona sur del golfo con el objetivo de mitigar la erosión costera. B) Zona de Tolu en la cual se evidencia que las construcciones se encuentran muy cerca de la línea de costa. C) Partes de la ciénaga de la Caimanera en la cual el manglar está en contacto directo con el agua salada.

5. Datos y métodos

Para desarrollar esta investigación se realizó un análisis a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas con el fin de reconocer la geomorfología y los cambios en las líneas de costa de los últimos 50 años. Particularmente, emplear la herramienta de ArcGis, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) para calcular las tasas de retroceso de la línea de costa. También se realizó un mapa de susceptibilidad frente a la erosión costera y finalmente se analizó la aplicabilidad de la regla de Bruun por medio de la revisión de datos del ascenso del nivel del mar de la base de datos de NOAA (Caldwell et al., 2015).

5.1. Análisis de imágenes satelitales y realización de mapas geomorfológicos

Se realizó un análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas para analizar la evolución tanto de la línea de costa como la variabilidad a nivel geomorfológico del ecosistema en los últimos 50 años. Se trazaron líneas que representan la evolución costera del Golfo de Morrosquillo utilizando imágenes satelitales de Google Earth, que muestra la mejor resolución en la escala de detalle de 1:2000 y de

Landsat. Se utilizaron imágenes de 1969, 1991, 2000, 2009-2010, 2013-2014, 2017-2018 y 2020 de los meses de diciembre-febrero (época seca), determinando la línea costera como la interacción del suelo con el mar (**Tabla 1**). Para la realización de los mapas geomorfológicos, tanto actuales como de hace 50 años, se trazaron polígonos que representan las unidades geomorfológicas costeras del Golfo de Morrosquillo y se tuvo en cuenta la intervención antrópica determinando la urbanización y la implementación de espolones como estructuras importantes. Para analizar en detalle la evolución geomorfológica se observaron imágenes de 1969 y del 2020 de Google Earth. Además, se usaron imágenes de satélite Sentinel del 2021 y la combinación de bandas para tener mayor precisión en cuanto a límites tales como cuerpos de agua, vegetación y civilización. A partir de este procedimiento se obtuvieron cuatro mapas geomorfológicos. Dos mapas actuales de escala 1:12.000 y dos de 1969 de escala 1:30.000 de la parte norte del golfo hasta Tolú y desde Tolú hasta Coveñas.

Tabla 1. Información de las imágenes satelitales usadas para el trazo de las líneas de costa.

Tomadas de	Imágenes tipo	Periodo (años)	Mejor resolución de tierra (cm)
Google Earth	USGS	1969	274.32
Earth Explorer	Landsat 5	1991	3000 (6000-12000)
Earth Explorer	Landsat 7	2000	3000 (6000)
Google Earth	CNES/Airbus	2013-2014	150
Google Earth	Maxar Technologies	2009-2010, 2017-2018, 2020	50

5.2. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) y mapa de susceptibilidad

Para estimar las tasas de cambio de la línea de costa se implementó la extensión de ArcGis, DSAS. Esta herramienta se implementó considerando la digitalización de las líneas de costa realizadas a partir del análisis de las imágenes satelitales (Tabla 1). Inicialmente se realizó un Feature Class que combina las diferentes líneas de costa con la herramienta Merge, denominada Shoreline, y se generó una línea base. Luego, se generaron transectos con incertidumbre de 10 m, con un espaciado de 40 m entre transectos,

con una distancia máxima de 2500 m desde la línea base y un suavizado de 300 m. Para estimar la tasa de erosión se utilizan los cálculos de Linear Regression Rates (m/año) que tiene en cuenta la tasa de las líneas de costa de cada año trazadas desde 1969 hasta el 2020 y el Net Shoreline Movement (m) que solo tiene en cuenta la primera y la última línea de costa calculando todo el retroceso de los últimos 50 años.

Se realizó también un mapa de susceptibilidad frente a la erosión costera elaborando un análisis multicriterio en ArcGis. Se combinan las variables de aptitud de los datos arrojados por DSAS, teniendo en cuenta que este nos proporciona información sobre la distribución del sedimento de los últimos 50 años y la erosión o acreción costera. Además, se consideró la respuesta geomorfológica frente a los procesos erosivos. Los rangos de aptitud de DSAS fueron 1 para las zonas con acreción, 3 para las zonas en equilibrio morfológico y 5 para las zonas con erosión. Mientras que para la geomorfología costera se tomaron rangos de 1 a 5, donde 1 y 2 son zonas con mayor protección geomorfológica, como las zonas con mayor ancho de playa y presencia de ecosistemas de manglar, 3 son zonas con protección de manglar pero con playas frontales intervenidas antrópicamente sin ningún sistema de protección frente a la erosión y 4-5 son zonas que presenta menor protección geomorfológica como zonas donde no hay ecosistemas de manglar o este está en contacto con el agua de mar. Estos parámetros se convirtieron en formato raster, que luego se incorporaron en la herramienta de superposición ponderada en la cual se le dió un porcentaje de influencia del 60% para la estructura geomorfológica y del 40% a la clasificación proporcionada por el DSAS.

5.3. Regla de Bruun

Se realizó un estudio cuantitativo de la zona con base en la ecuación de Bruun y el respectivo análisis con respecto a otros modelos que consideren otras variables, como la respuesta de la línea de costa en consideración con el ascenso del nivel del mar, para así estimar la aplicabilidad de la regla. Para esta comparación se emplearán los modelos de Edelman (1969) y Robin (Davidson-Arnott et al., 2005). El modelo de Edelman se escogió debido a que tiene en cuenta la geomorfología de una playa al incorporar la altura de las dunas en el modelo. Edelman estableció que el ascenso del nivel del mar es proporcional a la disminución de la elevación de las dunas costeras (Kaplin, 1995). Por otro lado, la regla de Robin (RDA model) indica que se produce una transferencia neta hacia la tierra, en lugar de hacia el mar y establece que no hay pérdida de sedimentos (no hay erosión), sino que el sedimento de la playa y el *foredune* se conservan durante la transgresión (Davidson-Arnott et al., 2005). Además, este modelo considera un promedio de la pendiente de la playa en un intervalo de tiempo definido (**Tabla 2**). El modelo de Bruun cuenta con las siguientes variables:

$$R = S \frac{L}{B+h}$$

Ecuación 1

Donde:

R: Retroceso de la costa asociado (m)

S: Aumento del nivel del mar (m)

L: Dimensión horizontal del perfil activo (m)

h+B: Dimensión vertical del perfil activo (m)

El modelo de Edelman presenta la siguiente ecuación:

$$R = L \ln \left(\frac{hb + hd}{hb + hd - S} \right)$$

Ecuación 2

Donde:

R: Retroceso de la costa con respecto al ascenso del nivel del mar (m)

L: Longitud del perfil activo (m)

S: Ascenso del nivel del mar (m)

hb: Profundidad de la base del perfil activo (m)

hd: Altura de las dunas (m)

El Robin Rule's model se expresa de la siguiente forma:

$$R(T) = T \frac{1}{\tan\theta} \Delta S$$

Ecuación 3

Donde:

R(T): Retroceso de la costa (m)

T: Intervalo de tiempo (Años)

tano: Promedio de la pendiente del perfil

ΔS : Tasa anual del ascenso del nivel del mar relativo ($m a^{-1}$)

Para realizar el análisis cuantitativo de estos modelos se asumen diferentes escenarios considerando una variabilidad de la pendiente de la playa tanto para una época seca como para una época húmeda. En estos escenarios se asume un valor mayor en la profundidad del perfil en la época seca debido a que la interacción del oleaje y las corrientes superficiales con las playas del golfo es mayor durante este periodo (Barreto et al., 1999). Esta variabilidad de pendientes en diferentes épocas del año busca establecer si los modelos tienen en cuenta los procesos que se generan en un perfil de playa en el periodo de un año. Se asume además una diferencia entre la parte norte del golfo con la parte sur debido al grado de intervención antrópica que se experimenta en cada una de estas zonas. Se estima un valor de equilibrio en las playas de Boca de Guacamayas ya que no presentan una alta intervención. Mientras que en la zona sur se asumen dos pendientes diferentes, una pendiente menor que se encontraría en los bordes de las estructuras de espolones y pendientes mayores en el centro de estos. Este escenario se implementa con la intención de identificar si los modelos tienen en cuenta cómo la intervención antrópica puede modificar el retroceso de la línea costera con respecto al ascenso del nivel del mar. Para los valores de la pendiente del modelo de Robin se realizó un promedio de la pendiente de época seca y de época húmeda (**Tabla 3**).

Tabla 2. Promedio de pendientes asumidos para la ecuación de la regla de Robin.

Promedio de pendiente Asumido	Zonas
0.125	Guacamayas
0.145	Caimanera centro de espolón
0.135	Caimaneras bordes del espolón

Tabla 3. Profundidad del perfil de playa asumidos de acuerdo con la época del año y a la intervención antropogénica.

	Zona	Profundidad del perfil asumido (m)	Longitud del perfil asumido (m)
Época Seca	Guacamayas	1.5	10
	Caimanera centro de espolón	1.6	10
	Caimaneras bordes del espolón	1.4	10
Época Húmeda	Guacamayas	1.0	10
	Caimanera centro de espolón	1.3	10
	Caimaneras bordes del espolón	1.1	10

El ascenso del nivel del mar se estimó a partir de los datos de Caldwell et al. (2015). Esta base de datos cuenta con datos del nivel del mar cada 5 días, desde 1992 hasta el 2019, (**Figura 4.**), en el Golfo de Morrosquillo (9.58N, -75.75W). Se realizó un promedio del nivel del mar para ciertos períodos de tiempo (**Tabla 4**) lo que permitió analizar cómo el ascenso del nivel del mar influye en el retroceso de la línea de costa y evaluar la aplicabilidad de los distintos modelos y los diferentes escenarios de evolución morfológica que se presentan en la zona de estudio.

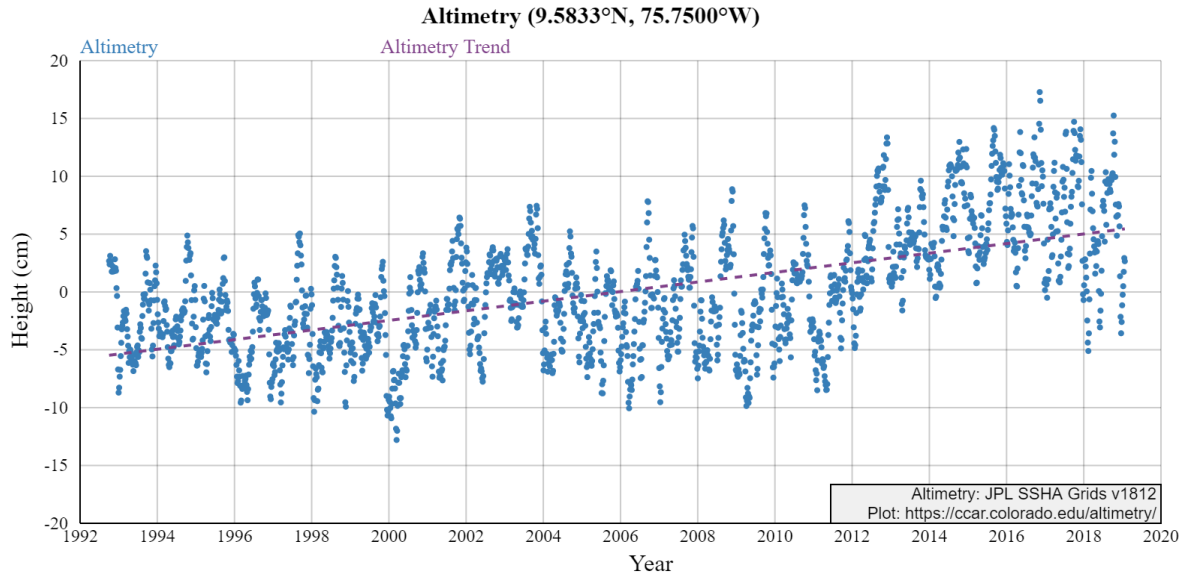


Figura 4. Serie de tiempo de la base de datos sobre el ascenso del nivel del mar en el Golfo de Morrosquillo (1992-2019).

Tabla 4. Datos del nivel medio del mar usados para los cálculos.

Regla de Bruun y Modelo de Edelman		Regla de Robin	
Año	Mean sea level (m)	Años	Tasa anual (delta S)
1992	0.00669	1992-1995	-0.0236
2000	-0.0452	1996-2000	-0.03955
2007	-0.01584	2001-2004	-0.0048
2015	0.07153	2005-2009	-0.02028
2018	0.0496	2010-2018	0.0438

6. Resultados

6.1. Mapas geomorfológicos

La geomorfología encontrada a lo largo del litoral del Golfo de Morrosquillo consiste principalmente en playas intervenidas antropicamente, playas no intervenidas, ecosistemas de manglares, ciénagas, cordones litorales, lagunas costeras, playones antiguos y desembocaduras de drenajes visibles. Además, se observó el proceso de formaciones de estructuras tipo tómbolo.

Los mapas geomorfológicos de la ciénaga de la Caimanera muestran la alta intervención antrópica que experimenta la zona, en donde se destacan los espolones y la urbanización tanto en el mapa actual como en el de 1969 (**Figura 5 y Figura 6**). En cuanto a las diferencias geomorfológicas que se observan en los mapas de los diferentes períodos de tiempo, se resalta una disminución de aproximadamente 30% en el cuerpo de agua de la ciénaga y en las lagunas costeras en los últimos años (**Tabla 5**). Además, se presenta un incremento en la construcción de espolones y asentamientos a lo largo del litoral de la parte sur del Golfo. En cuanto al mapa geomorfológico actual (**Figura 5 A y C.**) Se presentan ecosistemas de manglares rodeados de urbanizaciones con nulo o mínimo contacto con el agua de mar. Adicionalmente, en la Figura 5B. se perciben nuevas formaciones de estructuras tipo tómbolos que están haciendo contacto con los espolones. Asimismo, todas las playas de la parte sur del Golfo de Morrosquillo están intervenidas tanto por urbanizaciones como por construcciones de espolones.

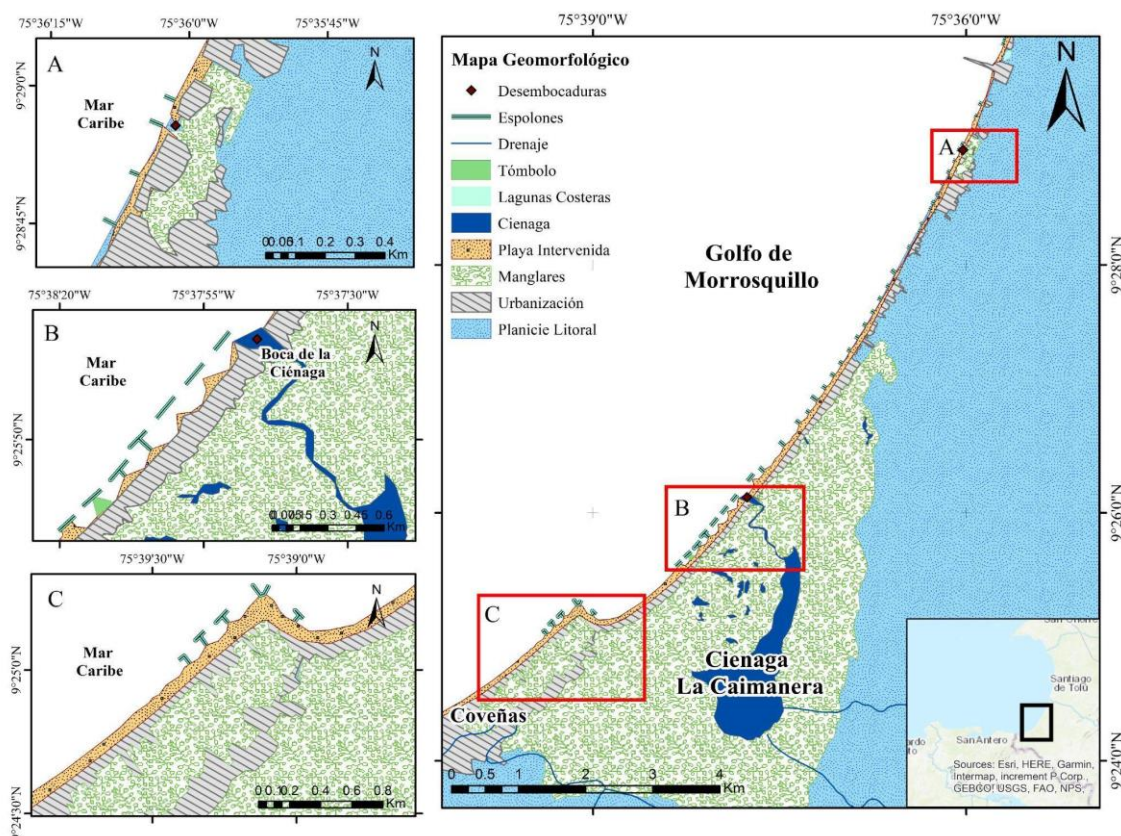


Figura 5. Mapa geomorfológico actual (2021) de la Ciénaga de la Caimanera. Escala 1:12.000.

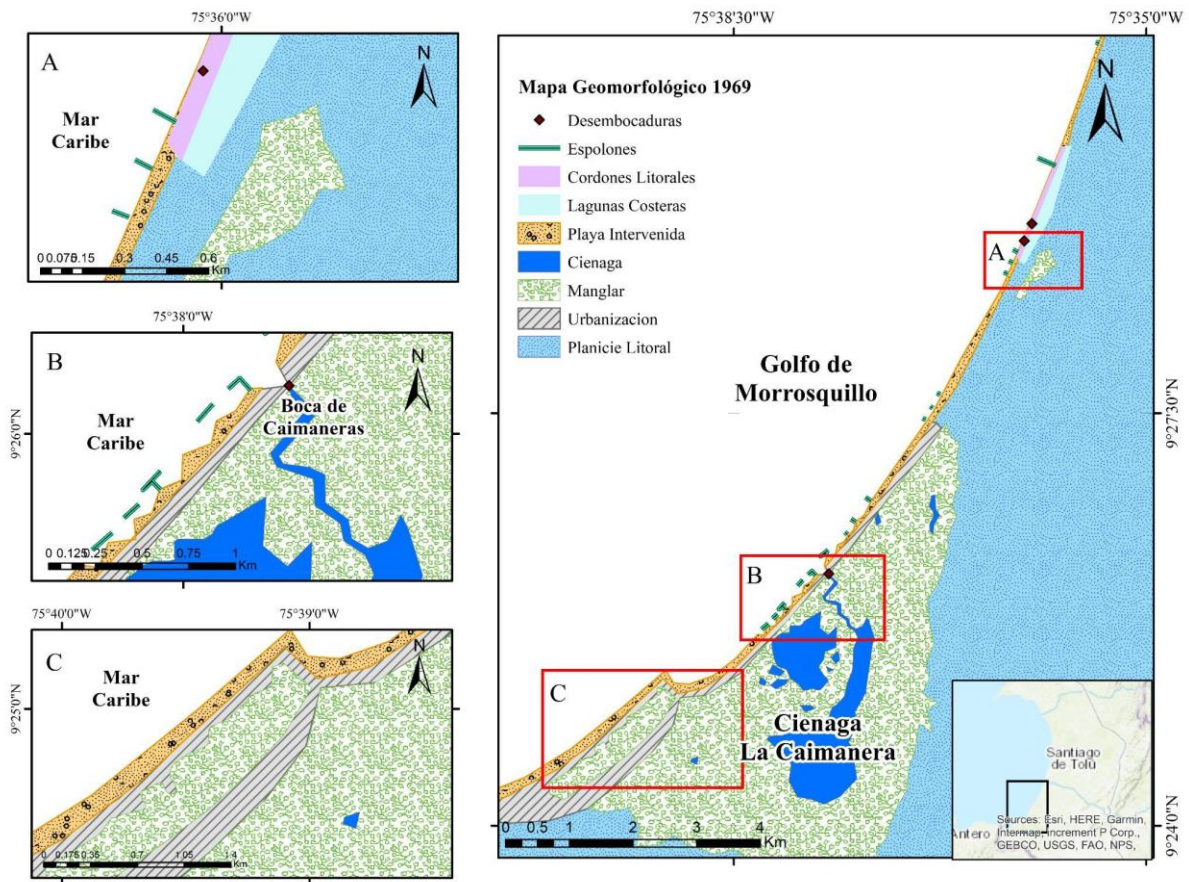


Figura 6. Mapa geomorfológico de 1969 de la Ciénaga de la Caimanera. Escala 1:30.000.

Los mapas geomorfológicos del Parque Regional Natural Boca de Guacamayas presentan zonas de playas no intervenidas antropicamente en la parte norte en ambos mapas. Además, se observa un incremento en los cordones litorales y las lagunas costeras en comparación con la zona sur del Golfo tanto en el mapa actual como en el de 1969 (Figura 5 y 7.). Adicionalmente, Boca de Guacamayas presenta mayor cantidad de drenajes que desembocan en el mar, mientras que la Ciénaga de la Caimanera solo presenta uno. Por otro lado, en esta zona se observan zonas de manglar sin playa frontal, exponiendo a estos ecosistemas a una interacción directa con el mar (Figura 7A). Las diferencias más significativas entre el mapa geomorfológico actual y el mapa de 1969 son el incremento de las zonas de manglar en contacto con el mar que se ha presentado donde anteriormente había playas no intervenidas (Figura 7A y 8A). Asimismo, se observa una disminución del manglar y un cambio espacial de las desembocaduras en el mapa actual en comparación con el mapa de 1969 (Tabla 5).

Geomorfología, ascenso del nivel del mar y evolución de la línea de costa: Análisis en el Golfo de Morrosquillo

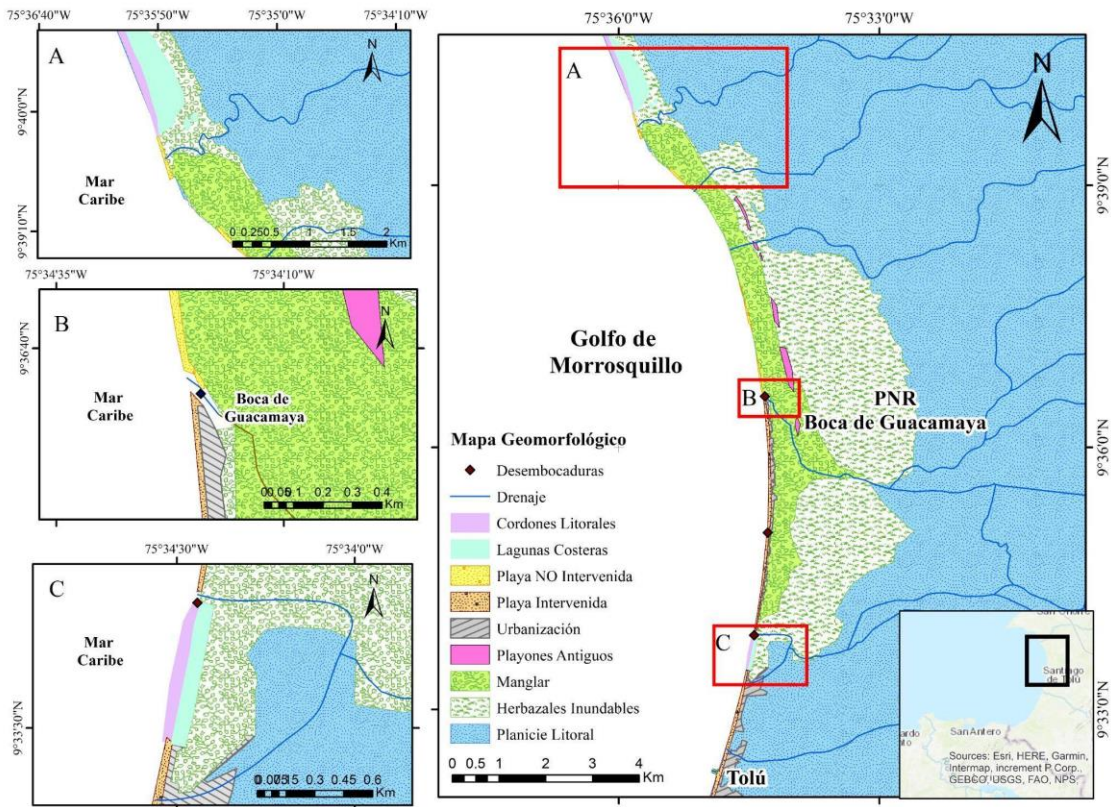


Figura 7. Mapa geomorfológico actual (2021) de PNR Boca de Guacamayas. Escala 1:12.000

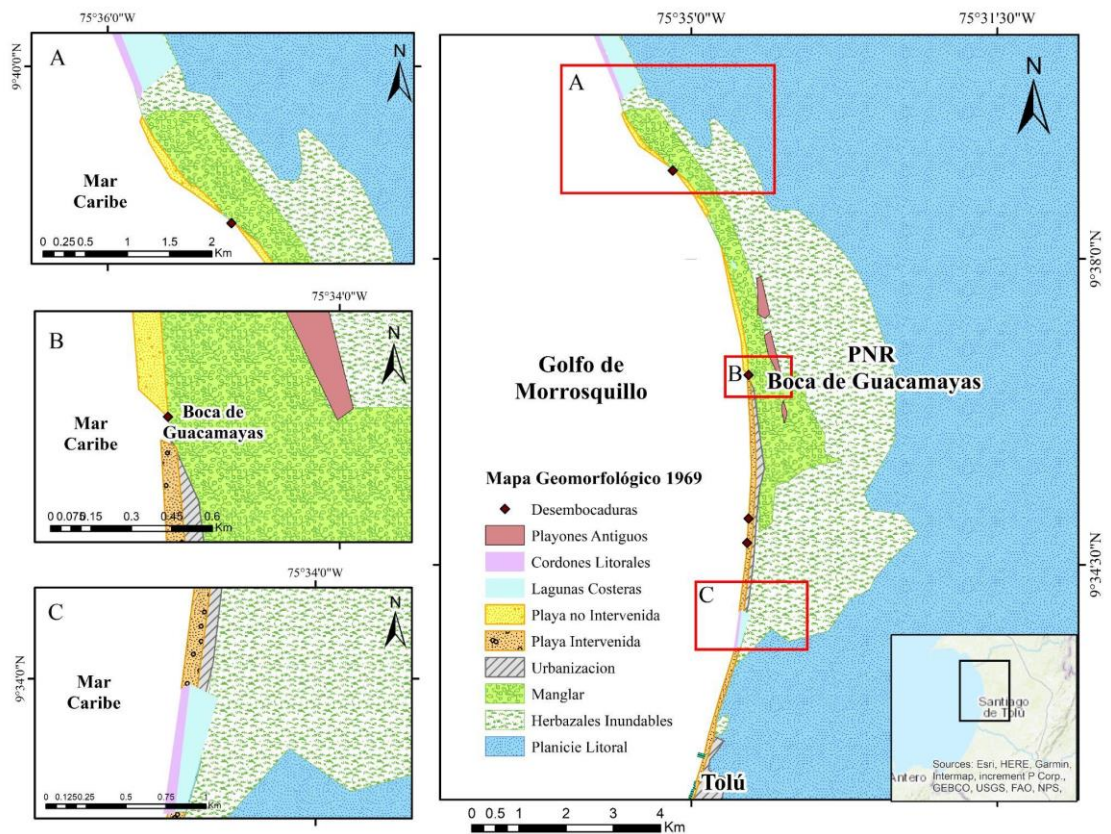


Figura 8. Mapa geomorfológico de 1969 de Boca de Guacamayas. Escala 1:30.000

Tabla 5. Variación geomorfológica de la Ciénaga de la Caimanera y PNR Boca de Guacamayas desde 1969 hasta la actualidad.

	Geomorfología	1969	ACTUAL (2021)
Ciénaga La Caimanera	Ciénaga	La ciénaga presenta dos cuerpos de agua con área significativa que suman 2.47 km ² . El principal es el que desemboca en el mar y se observa otro más hacia el Noroeste de la Caimanera.	En el periodo actual disminuye el área de los cuerpos de agua con respecto al mapa de 1969, siendo esta de 1.47 km ² .
	Manglares	El manglar cuenta con una extensión de 18.11 km ² . En este periodo ya cuenta con intervención alrededor de estas áreas.	El manglar actual presenta un área de 17.88 km ² . Esta disminución de 0.23 km ² está dada principalmente en la zona sur de la Ciénaga donde el manglar presenta urbanización alrededor (Figura 5C).
	Espolones	La implementación de espolones ya estaba presente en 1969, demostrando que los primeros espolones se construyeron a los lados de la desembocadura de la Ciénaga y en zonas más al norte de esta, presentando una longitud de 4.46 km.	Actualmente, la implementación de las estructuras de espolones se incrementó en toda el área del mapa geomorfológico (Figura 5), aumentando su longitud más del doble en 50 años (9.67 km de costa). Además, se construyeron estas estructuras entre espolones anteriormente construidos.
	Playa intervenida	Para esta época, toda la playa ya presentaba intervención antropogénica.	A pesar de que la playa ya estaba intervenida en 1969, se incrementa esta intervención no solo por el aumento de construcciones de espolones, sino también por el incremento de urbanización y hoteles.
Boca de Guacamayas	Manglares	La zona de manglar presenta un área de 8.81 km ² , se encuentra rodeada de urbanización y playas intervenidas y no intervenidas en el Oeste, hacia el Este el ecosistema se encuentra rodeado de herbazales.	En el mapa geomorfológico del 2020, el manglar presenta una disminución de 0.2 km ² , siendo reemplazados por ecosistemas de herbazales inundables.
	Cordones litorales	Los cordones litorales observados cuentan con una longitud de 2.89 km.	La extensión de cordones litorales es la misma que en 1969, se encuentran ubicados al inicio y al final de Boca de Guacamayas.

	Playa intervenida	La playa intervenida presenta una extensión de 4.74 km desde el inicio del PNR Boca de Guacamayas.	La longitud de playa intervenida se ha mantenido hasta la actualidad. Esta intervención antrópica está dada solo por asentamientos urbanos costeros, no hay implementación de estructuras de espolones.
	Playa no intervenida	Estas playas se encuentran ubicadas al norte de Boca de Guacamayas, presentan una longitud de 5.07 km.	La longitud de las playas no intervenidas disminuyó a 3.41 km, siendo estas actualmente zonas de manglar sin presencia de playa frontal.
	Zona de manglar sin playa frontal	En este periodo de tiempo las zonas de manglar expuestas presentaban una extensión de 1.36 km.	En la actualidad, hay un incremento de zonas de manglar expuestas de 3.24 km, aumentando más del doble en 50 años.

6.2. Tasas de erosión de la línea costera del Golfo de Morrosquillo

Los resultados obtenidos del LRR tiene en cuenta todas las líneas de costa trazadas en el tiempo desde 1969 hasta 2020. Este cálculo indica una tasa promedio de erosión de -0.3 m/año y un valor máximo de erosión de -15,26 m/año. Estos datos erosivos se encuentran principalmente en la parte norte del Golfo de Morrosquillo (9°41' N, - 75°42'W a 9°37'N, - 75°34'W) (**Figura 9A y B**) con tasas que van desde -0,5 m/año a -0,8 m/año. Mientras que en la parte sur (9°26' N, -75°37'W a 9°23'N, -75°47'W) (**Figura 9C**) se observan zonas de acumulación con tasas de 4,8 m/año a 0,5 m/año. Asimismo, en la parte central se obtienen valores de tasas en equilibrio. En los resultados obtenidos de los transectos generados, el 31,24% de estos presentan erosión y el 68,76% indican acreción. El valor máximo de erosión se encuentra en 9°42'N, -75°39'W con una tasa de -15,26 m/año, mientras que el valor máximo de progradación es de 4,8 m/año en 9°25'N, -75°44'W. El promedio obtenido de todas las tasas de erosión calculadas en el Golfo de Morrosquillo es de -0,6 m/año y el promedio de tasas de acumulación es de 0,75 m/año.

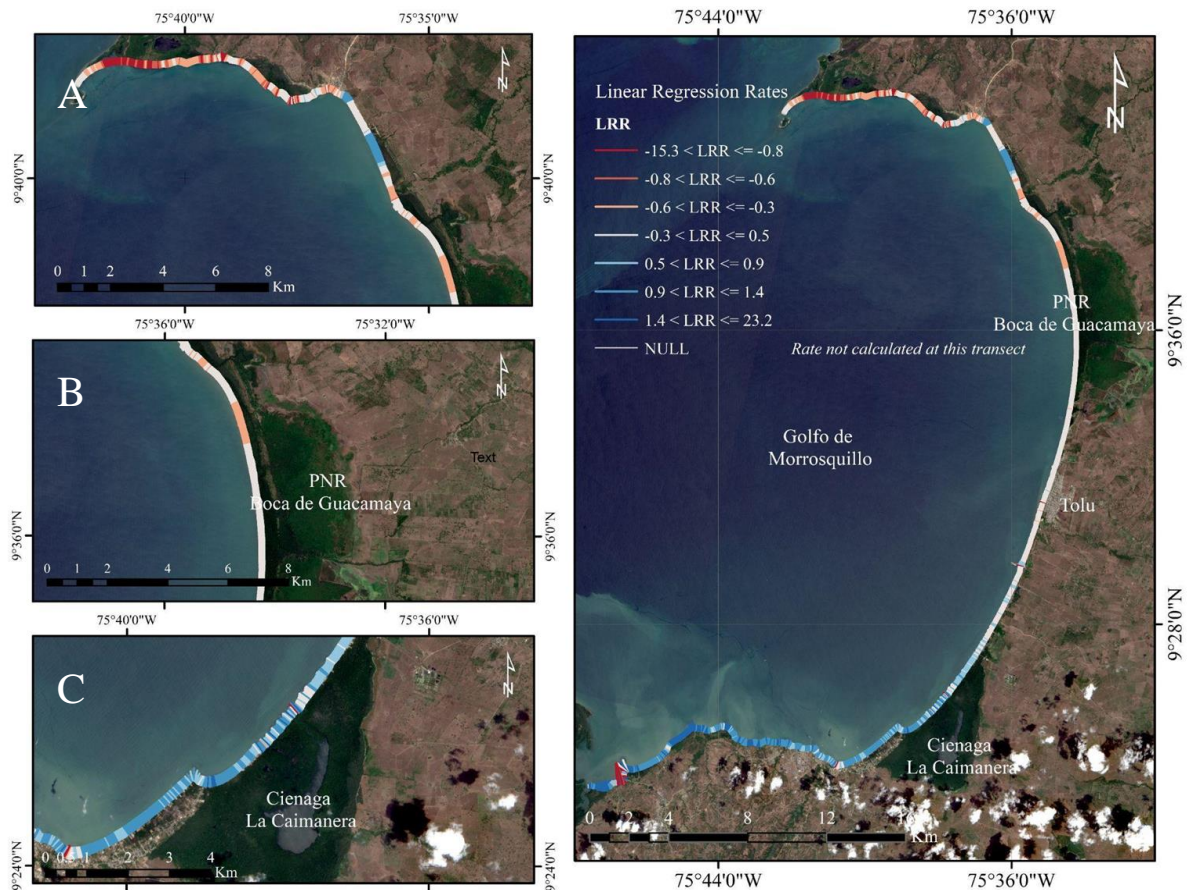


Figura 9. Mapa de las tasas de regresión lineal desde 1969 hasta el 2020.

En cuanto al movimiento neto de la línea de costa que arroja datos del movimiento entre el periodo de 1969 y 2020, se obtiene que, al igual que lo indican los cálculos de LRR, la regresión se ha producido en su mayoría en la parte norte del golfo, mientras que en la parte sur se ha originado acreción (**Figura 10**). En este caso, el porcentaje de los transectos que presentan una distancia negativa es del 35,56% y los que presentan distancias positivas tienen un promedio de 64,44%. El promedio calculado de todas las distancias negativas del movimiento neto de la línea de costa es de -33,9 m, en cuanto a las distancias positivas su promedio es de 43,38 m. La distancia máxima de erosión es de -892,07 m, ubicado en 9°41'N, -75°41'W a 9°42' N, - 75°39'W (**Figura 10A**), mientras que la distancia máxima de progradación es de 187,18 m (**Figura 10C**).

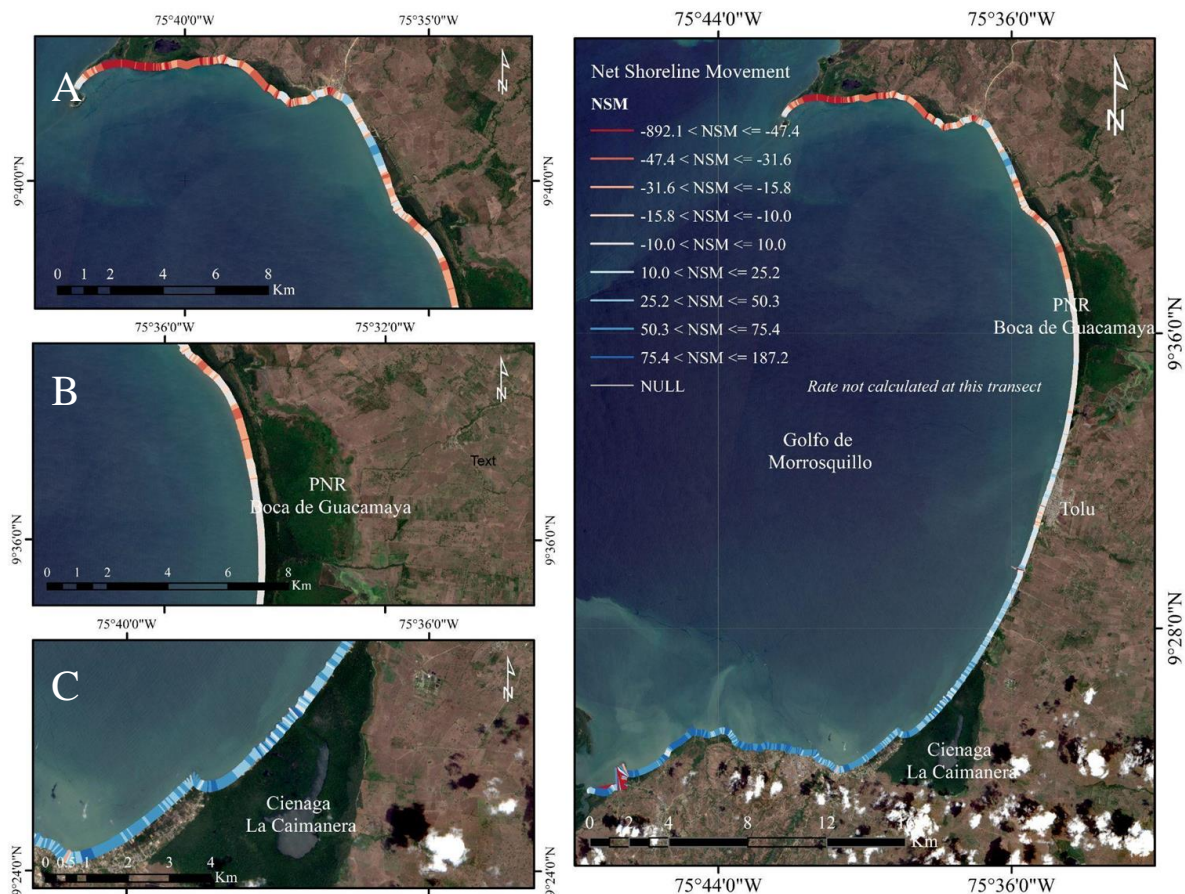


Figura 10. Mapa del movimiento neto de la línea de costa teniendo en cuenta el año de 1969 y del 2020.

6.3. Mapa de Susceptibilidad frente a la erosión costera

El análisis multicriterio que se realizó teniendo en cuenta la susceptibilidad frente a la erosión costera por medio de la geomorfología (con influencia del 60%) y de las tasas de regresión lineal de la línea de costa de los últimos 50 años (con influencia del 40%), arrojan que más del 31% de la zona de estudio presenta una susceptibilidad moderada, 25% de susceptibilidad baja a muy baja y un 43,4% de alta a muy alta susceptibilidad, por lo tanto, más del 70% de la costa del Golfo de Morrosquillo presenta susceptibilidad de moderada a alta (Tabla 6 y Figura 11). Asimismo, se observa 12,79 km continuos de alta susceptibilidad en la parte central del Golfo de Morrosquillo y 2,11 km de muy alta a alta susceptibilidad en la parte norte de PNR Boca de Guacamayas. La Ciénaga de la Caimanera presenta en su mayoría resultados de baja a muy baja susceptibilidad con 8,78 km de extensión de acuerdo con la geomorfología de la zona y a las tasas de erosión que denotan resultados de progradación. A diferencia del PNR Boca de Guacamayas que la susceptibilidad de esta zona es moderada a muy alta con 14,28 km de longitud casi continua (Figura 12). Estos resultados indican muy alta susceptibilidad a erosión en la parte norte del Parque Regional Natural Boca de Guacamayas ($9^{\circ} 38'N$, $-75^{\circ} 35' W$), mientras que en segmentos de la zona de la Ciénaga de la Caimanera hay muy baja susceptibilidad de erosión ($9^{\circ} 25'N$, $-75^{\circ}38'W$). La parte central presenta alta susceptibilidad ($9^{\circ} 31'N$, $-75^{\circ} 35'W$).

Moderada	11.39	31.16
Alta	14.64	40.05
Muy alta	1.26	3.44
Total	36.55	100

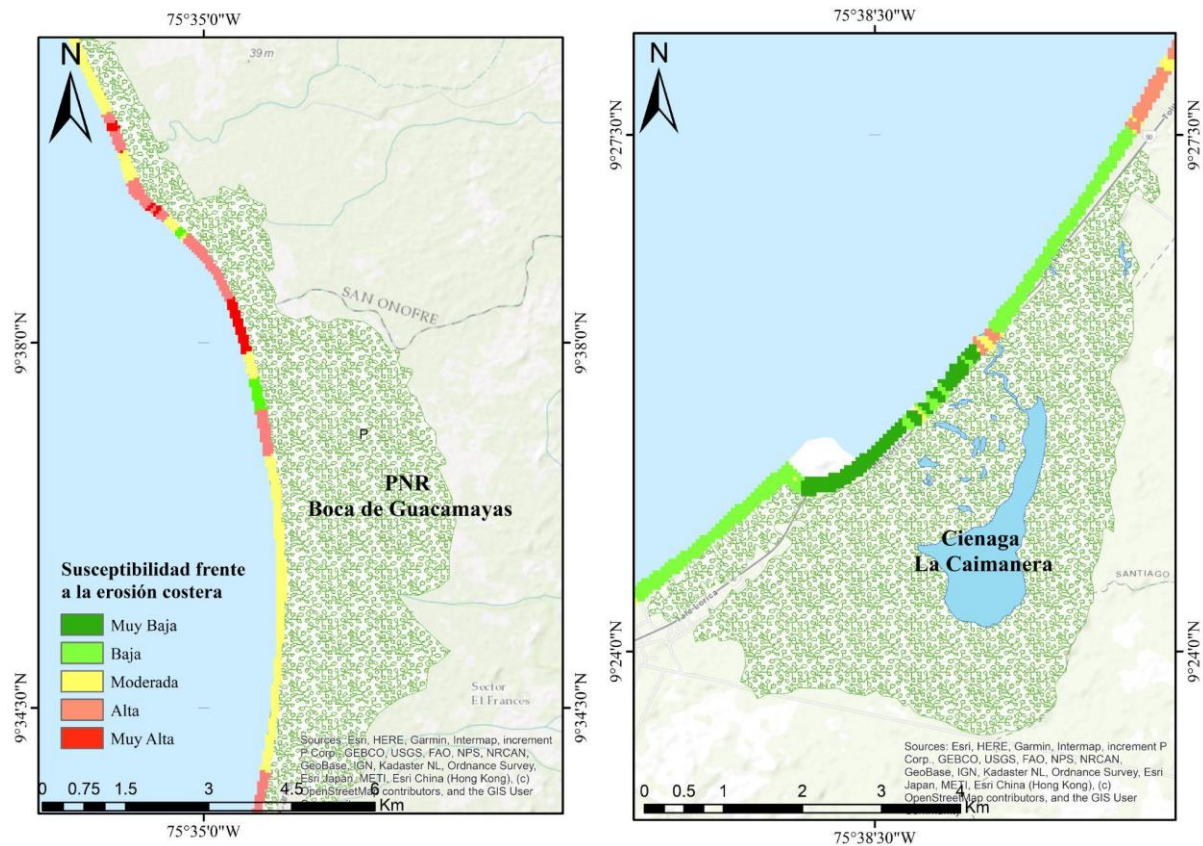


Figura 12. Detalles entre las categorías de PNR Boca de Guacamayas (Izquierda) entre la Ciénaga de la Caimanera (Derecha)

6.4. Regla de Bruun, Modelo de Edelman y Regla de Robin

El análisis cuantitativo realizado en estos 3 modelos arroja hasta 95% de similitud en los valores del retroceso de la línea de costa entre los modelos de Edelman y la regla de Bruun. Posiblemente, debido a la ausencia de dunas en la zona de estudio, ocasionando que ambos modelos tengan en cuenta solamente el perfil activo de playa y los valores de ascenso del nivel del mar en un mismo año (Tabla 7). En cuanto al modelo de Robin, al establecer una modificación en las variables ya que se considera un intervalo de tiempo de 4 años, un promedio de la pendiente y una tasa anual del ascenso del nivel

del mar, los valores varían con una diferencia de más del 100% en comparación con los modelos de Bruun y Edelman (**Tabla 9**). Estos modelos se aplicaron en la Ciénaga de La Caimanera presentando valores asumidos de dos pendientes diferentes, debido a la variación del perfil de playa a causa de las construcciones de espolones. Esto se realizó con el fin de establecer si los modelos están teniendo en cuenta la variabilidad del retroceso dada la intervención antrópica. Los valores arrojados en los tres modelos presentan una variabilidad de hasta 0,1 m de retroceso costero entre el centro y los bordes de los espolones en todos los modelos (**Tabla 9**). En Boca de Guacamayas, por el contrario, al no presentar intervención antrópica se asume una única pendiente en toda la costa arrojando un retroceso constante en todo el litoral. La diferencia del perfil de playa entre la época húmeda y seca arrojan resultados del modelo de Edelman y la regla de Bruun que indican una diferencia del 27% hasta el 54% en el retroceso costero en un mismo año (**Tabla 7**).

Tabla 7. Resultados del retroceso de la costa según el modelo de Edelman y la Regla de Bruun.

		Época seca			Época húmeda		
	Año	Guacamayas	Caimanera centro de espolón	Caimanera bordes del espolón	Guacamayas	Caimanera centro de espolón	Caimanera bordes del espolón
Retroceso según la Regla de Bruun (m)	1992	0.0446	0.0418	0.0477	0.0669	0.0514	0.0608
	2000	-0.3013	-0.2825	-0.3228	-0.452	-0.3476	-0.4109
	2007	-0.1056	-0.099	-0.1131	-0.1584	-0.1218	-0.144
	2015	0.4768	0.4470	0.5109	0.7153	0.5502	0.6502
	2018	0.3306	0.31	0.3542	0.496	0.3815	0.4509
Retroceso según el Modelo de Edelman (m)	1992	0.0446	0.0419	0.0479	0.0671	0.0515	0.0610
	2000	-0.2968	-0.2785	-0.3177	-0.442	-0.3417	-0.4026
	2007	-0.1050	-0.0985	-0.1125	-0.1571	-0.1211	-0.1429
	2015	0.4886	0.4573	0.5244	0.7421	0.5659	0.6723
	2018	0.3362	0.3149	0.3607	0.5087	0.3890	0.4613

Tabla 8. Resultados del retroceso de la costa según la regla de Robin (modelo RDA).

	Año	Guacamayas	Caimanera centro de espolón	Caimanera bordes del espolón
Retroceso según la Regla de Robin (m)	1992-1998	-0.9390	-0.8080	-0.8687
	1998-2003	-1.5737	-1.3542	-1.4559
	2006-2011	-0.1909	-0.1643	-0.1766
	2013-2018	-0.8069	-0.6944	-0.7465
	2016-2020	1.7428	1.4997	1.6123

Adicionalmente, se observa que el retroceso costero está reflejando valores negativos (**Tabla 7 y 8**). Estos datos se están presentando debido a que el ascenso del nivel del mar cuenta con valores negativos en ciertos períodos de tiempo, dando como resultado que del 2000 al 2007, según el modelo de Edelman y la regla de Bruun no estén indicando un retroceso costero, sino progresión, presentando un pico negativo máximo en el año 2000. En el modelo de Robín, el periodo de 1992 al 2009 está presentando una progresión con valores máximos en 1996 al 2000. No obstante, como se observa en la base de datos del nivel del mar hay una tendencia positiva a través de los años. Lo cual se refleja en los datos obtenidos por los modelos, presentando picos desde el 2015 en el modelo de Edelman y la Regla de Bruun y del 2010 al 2018 en el modelo de Robin.

Tabla 9. Porcentajes de la variabilidad de los datos obtenidos en los diferentes escenarios y reglas.

Variables	Porcentajes (%)
Diferencia entre la Regla de Bruun y Edelman	<5
Diferencia entre Bruun y Edelman con Robin	>100
Variabilidad entre bordes y centro de espolón	>25
Variabilidad entre época húmeda y seca	27-54

7. Análisis de Resultados

7.1. Erosión y Geomorfología

Los resultados de este estudio evidencian que la geomorfología costera del Golfo de Morrosquillo son principalmente playas intervenidas, ecosistemas de manglares y construcciones urbanas, las cuales abarcan casi todo el litoral. En el sur del Golfo se presentan en su mayoría intervenciones antrópicas, como la construcción de hoteles, asentamientos urbanos y estructuras de espolones. Estas intervenciones han modificado la geomorfología de la zona generando estructuras tipo tómbolos debido a la implementación de espolones tipo T, los cuales son barras de sedimento que se generan desde la costa hasta el espolón (**Figura 5**). Este incremento del sedimento se observa en la acreción que se está presentando en la Ciénaga de la Caimanera dado los resultados obtenidos de la regresión lineal de la costa (**Figura 9**). No obstante, la construcción de estructuras de protección, como los espolones y muros, generan cambios morfológicos y modifican los procesos de transporte natural de sedimentos (Rangel-Buitrago, 2009). Además, la influencia de la contracorriente Darien que se presenta en la parte sur del golfo en dirección perpendicular a la costa este (Barreto et al., 1999), puede estar favoreciéndola sedimentación que se observa en la Ciénaga de la Caimanera, contribuyendo a la distribución de los sedimentos del Río Sinú en esta zona del golfo. Adicionalmente, en una zona tan alterada, como el litoral de la Ciénaga de la Caimanera, se debe considerar la variación de los procesos antropogénicos. Principalmente por los ecosistemas de manglar que están siendo intervenidos como resultado de la urbanización de su ronda hídrica o área de influencia. En el Diagnóstico ambiental del Golfo, Barreto et al. (1999) establece que la apropiación de tierras con fines agropecuarios, construcciones de vías y el asentamiento de urbanizaciones con fines turísticos al interior y alrededor de estos ecosistemas ha desencadenado procesos de degradación. Lo cual, a largo plazo, estaría ocasionando un desequilibrio en el sistema, debido a la interferencia con respecto a la protección frente a la erosión costera que generan los manglares. Estos ecosistemas son esenciales para fijar las playas y formar suelos maduros, así como para la protección contra eventos extremos tales como tormentas, debido a su capacidad de atenuación de la fuerza de los vientos y el oleaje (Vides y Sierra-Correa, 2003). Chin et al. (2014) postula que la geomorfología antropogénica, además de estudiar los patrones de cambio de los procesos geomorfológicos con respecto a la intervención humana, también debe tener en cuenta cómo cambiar el modo de acción de la intervención humana para que los recursos de la respuesta geomorfológica se puedan utilizar mejor a través de retroalimentaciones positivas y negativas.

En la parte norte del Golfo de Morrosquillo se evidencian procesos erosivos significativos desde punta San Bernardo hasta Boca de Guacamayas. Posiblemente, debido a la ausencia de sedimentos, ya que no se encuentran drenajes significativos que contribuyan a un balance entre la pérdida y la ganancia de sedimentos en la zona. El estudio realizado por Correa et al. (2007) presenta un adelgazamiento o desaparición de las playas del norte del Golfo con tasas erosivas de -0.5 a -1 m/año. Lo cual, concuerda

con los resultados de este estudio, que evidencian tasas de $-0,8$ a $-0,6$ m/año en esta zona (**Figura 9**). Una de las evidencias más importantes de la pérdida de playa se observa cuando se compara el mapa geomorfológico actual con el del año 1969 (**Figura 7 y 8**), que resalta el retroceso costero que se presenta en el norte del Golfo de Morrosquillo. Asimismo, la exposición de los ecosistemas de manglares al agua de mar se ha incrementado en los últimos 50 años, lo cual ha aumentado el riesgo en la estabilidad del ecosistema, en conjunto con la variación de las desembocaduras que evidencian un cambio en el aporte de agua dulce en Boca de Guacamayas. Una de las causas de la degradación ambiental de los manglares es el desbalance de la salinidad y el agua dulce. Para mantener estos ecosistemas debe existir un equilibrio entre el agua dulce, una salinidad óptima baja, una productividad y un balance de nutrientes (Uribe et al., 2009).

La susceptibilidad frente a la erosión costera en el Golfo de Morrosquillo está influenciada en su mayoría por la geomorfología de la zona. En la Ciénaga de la Caimanera las estructuras geomorfológicas de costas estacionarias, como los tómbolos, son evidencias de acumulación de sedimentos en torno a estas estructuras. Kerry y Connos (2001) establecen que la protección costera excesiva por parte del hombre puede conducir a la formación de tómbolos en lugares con altas tasas de transporte costero. Asimismo, la evidencia de la geomorfología dada por la protección que presentan los suelos, gracias al manglar que ha generado estabilidad en la Ciénaga, y la formación de estructuras de tómbolos, en conjunto con la evolución de la línea de costa, indican que esta zona está presentando acumulación de sedimentos, denotando una baja susceptibilidad frente a la erosión costera. En cuanto a la parte central del golfo, la geomorfología de la zona está liderada por playas intervenidas y espolones, con pocos cordones litorales y pequeños ecosistemas de manglares. La geomorfología de tipos de costas de progradación o estacionarias son crestas de playa, espigas de barreras y tómbolos (Codignotto, 1997). La zona central (**Figura 14**) no presenta esta geomorfología de acumulación, además, no tiene presencia de dunas, marismas o ecosistemas de manglares que proporcionen una protección a la costa frente a los fenómenos de ascenso del nivel del mar o de erosión costera. Por lo tanto, se presenta una susceptibilidad alta, a pesar de la estabilidad relativa de la línea de costa que arrojó el modelo de regresión lineal. Asimismo, la parte norte (**Figura 15**) presenta zonas de muy alta a alta susceptibilidad frente a la erosión determinadas principalmente por la ausencia de playas en la zona. Adicionalmente, el manglar expuesto al mar podría presentar un deterioro debido al incremento de la salinidad que posiblemente desestabiliza el ecosistema, dejando la costa expuesta a la acción directa de los vientos, el oleaje y los eventos extremos.

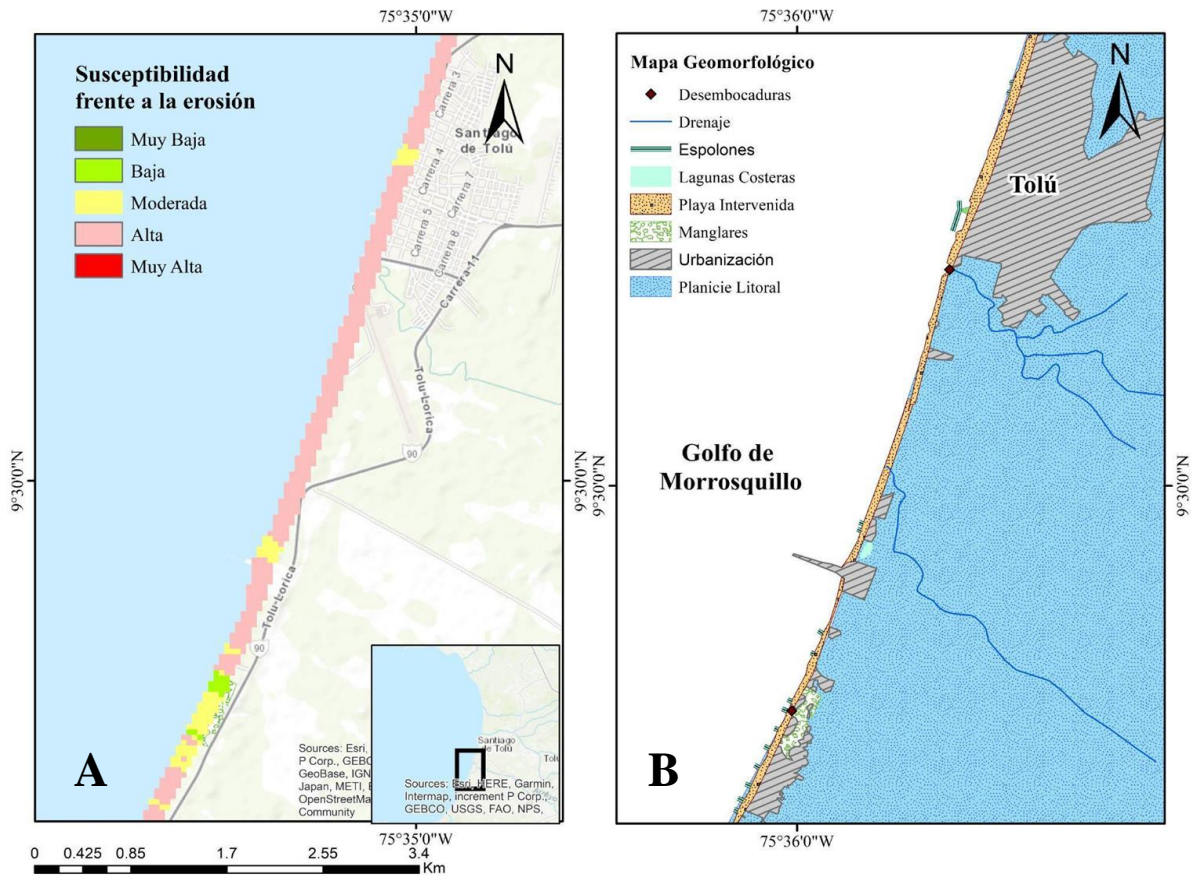


Figura 13. Relación entre (A) mapa de susceptibilidad frente a la erosión costera y (B) mapa geomorfológico en la zona central del Golfo de Morrosquillo.

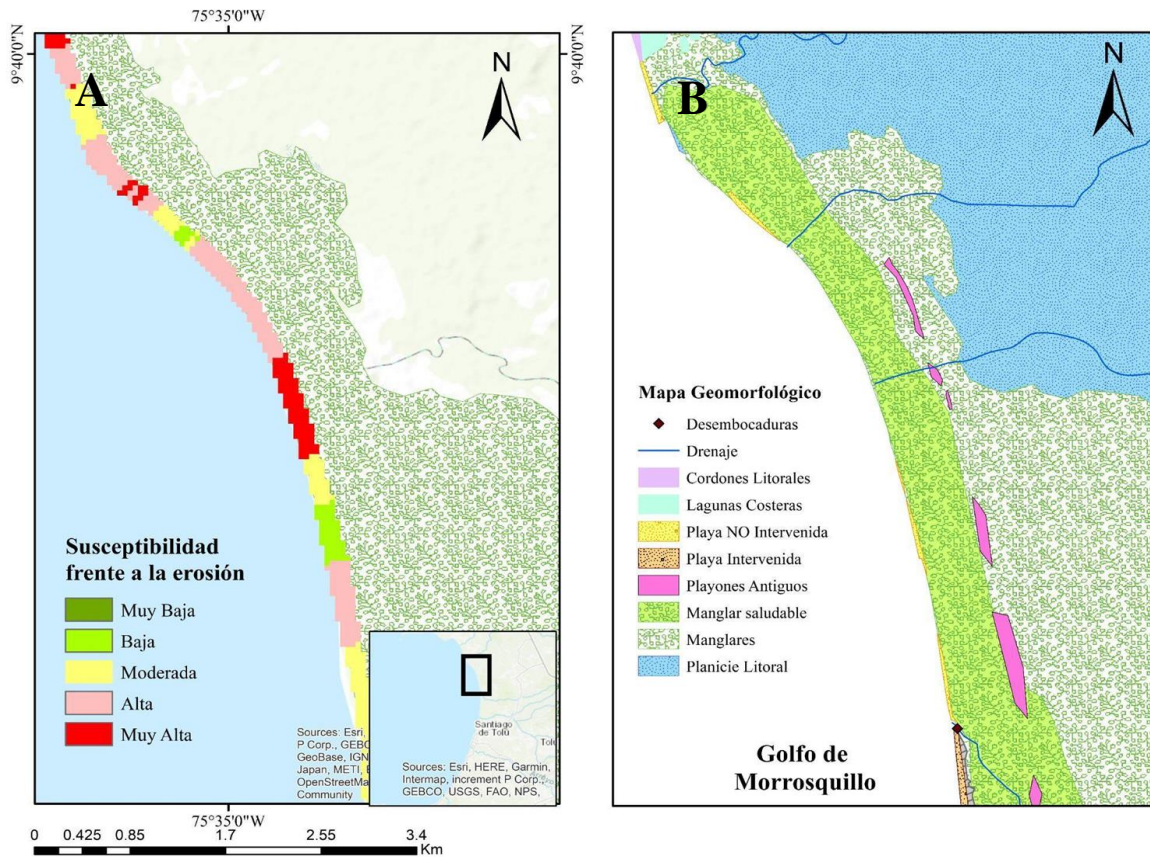


Figura 14. Relación entre (A) mapa de susceptibilidad frente a la erosión costera y (B) mapa geomorfológico (Derecha) en la zona norte del Parque regional natural Bocas de Guacamayas.

7.2. Influencia del nivel del mar

En cuanto al análisis cuantitativo realizado por medio de las reglas se obtiene que la regla de Bruun y el modelo de Edelman no toman un promedio de la pendiente como lo hace la regla de Robin, generando diferentes datos de retroceso de la costa para una época húmeda y una época seca (Tabla 9), mientras que el modelo de Robin tiene en cuenta el promedio de la pendiente durante el intervalo de tiempo escogido.

Para Ranasinghe et al. (2007) una incertidumbre importante del modelo de Bruun está asociada a la estimación del pendiente del perfil activo, ya que una variación en el rango de la pendiente podría producir estimaciones de la recesión costera de la regla de Bruun que pueden variar más de un 100%. Por lo tanto, aunque el modelo de Bruun dará como resultado el movimiento de arena desde la berma o duna hasta el perfil sumergido, los procesos reales por los cuales se produce esta erosión de dunas no se tienen en cuenta en la ecuación (Ranasinghe et al., 2012). Asimismo, se presenta en el modelo de Edelman, en el cual se tiene en cuenta la altura de las dunas. Sin embargo, no se consideran los procesos que establecen si hay dunas o no. Principalmente, en el caso del golfo de Morrosquillo, la ausencia de dunas es causada por la alta intervención que se ha presentado en las playas de la Ciénaga de la

Caimanera. De este modo, no se están generando cálculos confiables ya que esta playa presenta un desequilibrio en el perfil ideal que postulan la Regla de Bruun y el Modelo de Edelman. Por otro lado, ninguno de los modelos está teniendo en cuenta la variación de la pendiente en pequeñas distancias ocasionadas por construcciones antropogénicas como los espolones. Arrojando resultados diferentes frente a una variación en pendientes más leves que las que posiblemente se encuentren en los bordes de los espolones a las pendientes mayores que puede encontrarse en la parte central entre dos espolones. Además, en la Figura 13 se observa la variabilidad del retroceso de la costa para la regla de Bruun y el Modelo de Edelman dependiendo de la época del año. Se encontró que el retroceso de la costa será mayor en época húmeda, que presenta pendientes más bajas, mientras que en época seca con mayores pendientes el retroceso de la costa será menor. Lo cual, ilustra la ocurrencia de dos resultados diferentes de recesión costera para un mismo año.

Davidson-Arnott y Bauer (2021) fundamentan que la regla de Bruun se ha utilizado para predecir la transgresión de la costa sin mucha consideración de la dinámica del balance de los sedimentos, ya que muchos estudios la han utilizado sin considerar si la transferencia de sedimentos es permanente o temporal; mientras que el modelo de Robin (RDA model) no solo incluye en el perfil de la playa la existencia de las dunas sino de un *foredune*, como un amortiguador erosivo. Sin embargo, ni el modelo de Bruun ni el modelo de Robin tienen en cuenta los procesos que controlan las transferencias de sedimentos necesarios para preservar el perfil de equilibrio, ni la topografía hacia la tierra de la playa sobre la cual se producirá la traslación del perfil de equilibrio (Davidson-Arnott y Bauer. 2021). Asimismo, al ignorar la topografía, ninguna de las tres reglas está considerando la geomorfología más allá de las dunas, ni las variaciones de una playa que no presente un equilibrio o un perfil de playa ideal como lo presentan los diferentes modelos. Por lo tanto, ninguna de estas reglas será útil para calcular un retroceso real de la playa debido al ascenso del nivel del mar en la zona sur del Golfo de Morrosquillo debido a que presentan muchas incertidumbres en cuanto a los procesos que generan la geomorfología de las playas y descartan la geomorfología antropogénica, así como las variaciones presentes en una playa que no presenta equilibrio. Por lo cual, la regla de Robin es el modelo más adecuado para calcular el retroceso de la costa en la zona norte de Boca de Guacamayas, específicamente en las playas que no han presentado intervención antrópica, ya que este modelo tiene mayor consideración de la geomorfología del perfil de playa teniendo en cuenta el *foredune*. Mientras que la regla de Bruun, así como lo establece Ranasinghe et al. (2012) no es adecuada para evaluaciones locales y resulta inadecuada para marcos de planificación costera. Asimismo, el modelo de Edelman tampoco resulta adecuado, ya que presenta las mismas inconsistencias de los otros modelos. Lo cual, establece que estos modelos no pueden ser considerados como criterios fiables dentro de las estrategias de restauración del Golfo de Morrosquillo.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

A partir de los diferentes resultados expuestos en la presente investigación se obtienen los siguientes resultados:

- La Ciénaga de la Caimanera presenta una alta intervención antrópica por construcciones de asentamientos urbanos, espolones y carreteras, mientras PNR Guacamayas tiene menor intervención.
- La parte sur del Golfo de morrosquillo está presentando acreción, mientras que la parte norte está presentando un retroceso de hasta -0.8 m/y de acuerdo con la tasa de regresión de la línea de costa y a la geomorfología costera.
- La susceptibilidad frente a la erosión costera está enfocada principalmente a la geomorfología, dando como resultado que la zona norte y central del golfo sea altamente susceptible a la erosión.
- La regla de Bruun, ni el Modelo de Edelman pueden ser implementados en estudios del Golfo de Morrosquillo porque no está teniendo en cuenta factores importantes, entre los cuales destaca la geomorfología de la playa.
- La regla de Robin (RDA model) podría ser adecuada para los estudios de las playas que no han sido intervenidas, sin embargo, sigue presentando inconsistencias al no considerar procesos o morfologías diferentes a una playa en equilibrio.

8.2. Recomendaciones

En cuanto a las recomendaciones:

- Se recomienda realizar el análisis cuantitativo de las reglas propuestas en este trabajo con valores de pendientes reales.
- Es pertinente realizar estudios de la incidencia del ascenso del nivel del mar en todo el Golfo de Morrosquillo y si hay zonas que presentan el fenómeno de subsidencia.
- Es recomendable realizar salidas de campo que nos presenten un mayor detalle de la geomorfología costera y tener datos in situ de corrientes y oleaje de todo el litoral del golfo que nos permita complementar la susceptibilidad.

9. Referencias

- ALARCÓN H., J. c., et al., (2001). Colombia. Primera Comunicación Nacional ante la Convención marco las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Medio Ambiente - IDEAM- PNUD. Bogotá, 307 pp.
- AVISO+ Satellite Altimetry Data (2021). MEAN SEA LEVEL PRODUCTS. Recuperado de: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level/data-acces.html#c12195>
- Barreto, M., Barrera, R., Benavides, J., Cardozo, E., Hernández, H., Marín, L., ... & Villa, A. (1999). *Diagnóstico ambiental del golfo de Morrosquillo (Punta Rada, Tolú). Una aplicación de sensores remotos y SIG como contribución al manejo integrado de zonas costeras*. Editorial IGAC/CIAF. Tolú, Colombia.
- Black, K. P., & Andrews, C. J. (2001). Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles Part 1: Salient and Tombolo Geometry and Shape. *Journal of Coastal Research*, 82–93. <http://www.jstor.org/stable/25736207>
- Bruun P (1962) Sea-level rise as a cause of shore erosion. *J Waterways Harbors Division* 88:117–130.
- Caldwell, P. C., M. A. Merrifield, P. R. Thompson (2015), Sea level measured by tide gauges from global oceans — the Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset, doi:10.7289/V5V40S7W. Tomado de: <https://ccar.colorado.edu/altimetry/index.html>.
- Cattaneo, A., Steel, R.J., 2003. Transgressive deposits: a review of their variability. *Earth-Science Reviews* 62, 187 – 228.
- Chin A, Galvin K A, Gerlak A K et al., 2014. The Future of human–landscape interactions: Drawing on the past, anticipating the future. *Environmental Management*, 53(1): 1–3.
- Climate Science Special Report: A Sustained Assessment Activity of the U.S. Global Change Research Program* [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA (2017), pp. 493-539.
- Codignotto, J. (1997). Geomorfología y dinámica costera.
- Cooper, J. A. G., & Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and planetary change*, 43(3-4), 157-171.
- Correa, I.D., Morton, R.A., 2011. Coasts of Colombia. U.S. Department of the Interior USGS, St. Petersburg, Florida. Available from: <http://coastal.er.usgs.gov/coastscolumbia/>.
- Correa, I., Ríos, A., González, D., Toro, M., Ojeda, G., & Restrepo, I. (2007). Erosión litoral entre Arboletes y punta San Bernardo, costa Caribe colombiana. *Boletín de Geología*, 29(2), 115-129.
- Crooks, S. (2004). The effect of sea-level rise on coastal geomorphology. *Ibis*, 146, 18-20.
- Currea, J. A. G. (2014). Coastal erosion in the Golfo de Morrosquillo, Colombia: from the perception of stakeholders to preferred interventions.
- Davidson-Arnott, R.G.D., 2005. A conceptual model of the effects of sea-level rise on sandy coasts. *J. Coast. Res.* 21, 1166–1172
- Davidson-Arnott, R. G., & Bauer, B. O. (2021). Controls on the geomorphic response of beach-dune systems to water level rise. *Journal of Great Lakes Research*.

- Edelman, T. (1969). Dune erosion during storm conditions. In *Coastal Engineering 1968* (pp. 719-722).
- Franco, F. A., Mercado, I. C., & Otalvaro, N. T. (2007). Información espacial para el control y administración del litoral en el Golfo de Morrosquillo, Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, (25), 94-109.
- Granados, A. D. (1988). Resumen del estudio hidrogeológico del flanco nororiental de la serranía de San Jacinto y de la zona litoral del golfo de Morrosquillo. *Boletín Geológico*, 29(1), 3-44.
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., and Farris, A.S., 2018, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179, 110 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
- IDEAM-Universidad Nacional, (1997). Morfodinámica, Población y Amenazas Naturales en el Litoral Caribe Colombiano (valle del Sinú-Morrosquillo-Canal del Dique). Convenio IDEAM-Universidad Nacional, Bogotá, 155 pp.
- Kaplin, P. A., & Selivanov, A. O. (1995). *Recent coastal evolution of the Caspian sea as a natural model for coastal responses to the possible acceleration of global sea-level rise. Marine Geology*, 124(1-4), 161-175. doi:10.1016/0025-3227(95)00038-z
- Lacambra, C. L., Lozano, C. D. P., Alonso, D. A., & Fontalvo, M. L. (2003). *Amenazas naturales y antrópicas en las zonas costeras colombianas*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR.
- MIMURA, N. (ed.), (1996). Data Book of Sea-level Rise. Center for Global Environmental Research, Tokio, 88 pp.
- Molina, A., Molina, C., Giraldo, L., Parra, C., & Cevillot, P. (1994). Dinámica marina y sus efectos sobre la geomorfología del golfo de Morrosquillo. *Boletín Científico CIOH*, (15), 93-113.
- Moreno, M. 1997. Caracterización y diagnóstico Zona Costera del Municipio de San Antero (Córdoba). Tesis. Oceanografía Física. Escuela Naval, Cartagena de Indias D.T. y C.
- Pilkey, O.H., Young, R.S., Riggs, S.R., Smith, A.W.S., Wu, Huiyan, Pilkey, W.D., 1993. The concept of shoreface profile of equilibrium: a critical review. *Journal of Coastal Research* 9 (1), 255 – 278.
- Posada Posada, B. O., & Henao Pineda, W. (2008). *Diagnóstico de la erosión en la Zona Costera del Caribe Colombiano*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR.
- Ranasinghe R, Watson P, Lord D, Hanslow D, Cowell P (2007) Sea level rise, Coastal recession, and the Bruun Rule. Proceedings of Coasts and Ports '07, Melbourne, VIC, Australia. On CD Rom produced by Engineers Australia.
- Ranasinghe, R., Callaghan, D., & Stive, M. J. (2012). Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climatic Change*, 110(3), 561-574.
- Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129-144.
- Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., 2009. Assessment of Coastal vulnerability in la Guajira Peninsula, Colombian Caribbean Sea. *J. Coast. Res.* SI56, 792e796.

- Rangel-Buitrago, N., Correa, I., Anfuso, G., Ergin, A., Williams, A.T., 2013. Assessing and managing scenery in the Caribbean coast of Colombia. *Tour. Manag.* 35, 41e58.
- Rangel Buitrago, N. (2009). Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe colombiana. *Gestión y Ambiente*.
- Robertson, K. G., Martínez, N. J., & Jaramillo, O. (2003). Amenazas naturales asociadas al ascenso del nivel del mar en Caribe Colombiano. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, (12), 135-153.
- Robertson, K. G., & Martínez, N. (1999). Cambios del nivel del mar durante el Holoceno en el litoral Caribe colombiano. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 8(1), 168-198.
- Rosen, P. S. (1978). A regional test of the Bruun Rule on shoreline erosion. *Marine Geology*, 26(1-2), M7-M16.
- SIG-OT Colombia (2018). Geomorfología [Archivo Shape]. <http://sigotvg.igac.gov.co:8080/>
- Thom, B.G., 1983. Transgressive and regressive stratigraphies of coastal sand barriers in southeast Australia. *Marine Geology* 56, 137 – 158.
- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., Marcomini, A., 2012, Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the north Adriatic Sea: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(7), 2347–2368
- Uribe Pérez, J., & Urrego Giraldo, L. E. (2009). Gestión ambiental de los ecosistemas de manglar. Aproximación al caso Colombiano. *Gestión y Ambiente*.
- Van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867-887.
- Vides, M. P., Sierra-Correa, P. C., & Ruiz, M. L. (2003). *Atlas de paisajes costeros de Colombia*. INVEMAR.
- Zhang, K., Douglas, B.C., Leatherman, S.P., 2004. Global Warming and Coastal Erosion. *Climatic Change* 64, 41 – 58.