



**Estrategias para transformar obras costeras grises en defensas de infraestructura híbridas.  
Caso de estudio: Litoral urbano de Arboletes - Antioquia**

Isabel Cristina López Genes

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Director

César Augusto Salazar Hernández, Magíster (MSc) en Paisaje, Medio Ambiente y Ciudad

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Maestría en Sostenibilidad

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

## **Agradecimientos**

Inicial y principalmente a Dios, por guiar siempre mi camino y ponerme justo donde su voluntad lo requiere.

A mi director, César Salazar, por guiarme y motivarme siempre con la mejor disposición y paciencia.

A mi jefe, Vladimir Toro, por motivarme a embarcarme en esta maestría.

A mi madre, Arelis Genes y a mi pareja, Hernán Pérez, por entregarme su apoyo genuino, por darme ánimos y por no dejarme renunciar o pausar este proceso.

A la UPB y a sus profesores, por todas las bases entregadas para llevar a feliz término esta fase de estudio, aportando a mi superación profesional y personal.

A mi grupo de estudio, Yovanny, Yesika y Tatiana, por luchar en esto conmigo y por tantas retroalimentaciones y enseñanzas interdisciplinarias en la ejecución de los trabajos.

A mis abuelas, a mi familia y a mis amigos, por comprender mi ausencia con amor y paciencia.

**Tabla de contenido**

1. Resumen.....	11
Abstract .....	12
2. Planteamiento del problema.....	13
Área de estudio.....	13
3. Justificación .....	17
4. Marco teórico.....	19
4.1 Antecedentes .....	26
5. Objetivos.....	28
5.1 Objetivo general .....	28
5.2 Objetivos específicos.....	28
6. Metodología.....	29
6.1 Descripción de la geomorfología y los procesos costeros que influyen en la dinámica del área de estudio.....	30
6.2 Identificación de obras costeras grises existentes y de cambios de línea de costa debido a la influencia de estas .....	31
6.3 Estudio de alternativas para modificar las estructuras existentes de obras grises a obras híbridas .....	33
7. Resultados y análisis.....	35
7.1 Fase I. Descripción de la geomorfología y los procesos costeros que influyen en la dinámica del área de estudio .....	35
Geomorfología.....	35
Zona: Sector río Hobo.....	36
Zona: Centro.....	37
Zona: Playa principal .....	39
Clima.....	39

---

Oleaje .....	40
Zona: Sector río Hobo .....	40
Zona: Centro y Playa principal.....	41
Corriente de deriva.....	42
Mareas.....	43
7.2 Fase II. Identificación de obras costeras grises existentes y de cambios de línea de costa debido a la influencia de estas.....	44
Identificación de obras costeras grises existentes .....	45
Zona: Sector río Hobo .....	45
Zona: Centro.....	46
Sector: Playa principal .....	47
Verificación de las obras costeras grises existentes.....	49
Análisis del balance sedimentario.....	58
Cambios observados entre el 21/10/1999 y el 12/02/2001 .....	59
Cambios observados entre el 09/07/2008 y el 30/12/2013 .....	61
Cambios observados entre el 16/01/2020 y el 06/11/2021 .....	62
Impacto de las obras en la zona de playa principal .....	64
Dinámica en la zona central .....	64
Incremento de erosión en la zona de río Hobo.....	64
Recomendaciones para el manejo costero.....	65
7.3 Fase III. Estudio de alternativas para modificar las obras costeras grises existentes de obras grises a obras híbridas.....	66
Diferenciación entre obras costeras grises e infraestructura verde costera.....	66
Alternativas híbridas .....	70
Análisis de estudios de caso para identificar estrategias usadas en otras zonas costeras .....	71
Arrecifes artificiales en Puerto Morelos, México (Silva, y otros, 2019) .....	71

---

Experimento de hincamiento de troncos en el litoral de Antioquia .....	72
Perfilamiento de talud en Arboletes, Antioquia (Gobernación de Antioquia, 2021) .....	72
Rehabilitación de manglares en Mayakoba, México (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021).....	73
Un caso híbrido: acciones de ingeniería ecológicamente mejorada en la playa North Reach, Florida (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021) .....	73
Propuesta de modificación de las obras existentes .....	74
Propuestas para sector río Hobo.....	74
1. Perfilado del talud costero:.....	74
2. Refuerzo de la base del talud: .....	75
3. Siembra de vegetación: .....	76
4. Instalación de un filtro para escorrentía: .....	77
Propuestas para zona centro .....	78
1. Des ingeniería/reubicación: Eliminación del espolón (obra #1): .....	78
2. Des ingeniería/reubicación: Retiro de caminos de acceso en las obras #2 y #3: ...	78
3. Recuperación de la naturaleza: Restauración de dunas costeras:.....	79
Propuestas para la zona playa principal .....	81
1. Des ingeniería/reubicación: Retiro completo de la obra #5: espolón: .....	81
2. Des ingeniería/reubicación: Retiro del camino de acceso en las obras #6, #7 y #8:	82
3. Recuperación de la naturaleza: Restauración de dunas costeras:.....	83
Ecosistemas ingenierizados: Reducción de la altura de los diques exentos:.....	85
8. Conclusiones .....	87
9. Recomendaciones .....	89
10. Referencias .....	90

---

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Evaluaciones de erosión costera (2001-2021) en la costa Caribe colombiana .....	21
<b>Tabla 2</b> Desarrollo de la Fase I.....	30
<b>Tabla 3</b> Desarrollo de la Fase II .....	32
<b>Tabla 4</b> Desarrollo de la fase III.....	33
<b>Tabla 5</b> Síntesis de resultados del balance sedimentario.....	65
<b>Tabla 6</b> Tipos de obras grises .....	67
<b>Tabla 7</b> Tipos de obras verdes .....	69

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Ubicación del área de estudio. Cabecera municipal de Arboletes - Antioquia.....	13
<b>Figura 2</b> Delimitación del área de estudio en el municipio de Arboletes .....	14
<b>Figura 3</b> Cambio en la línea de costa de Arboletes. Izquierda: Aerofotografía del sector de Punta Rey, tomada por el IGAC en marzo de 1975. La línea discontinua representa el litoral en agosto del 2000. Derecha: Línea de costa en 2019.....	15
<b>Figura 4</b> Interacción de procesos físicos .....	20
<b>Figura 5</b> Dinámica del funcionamiento de una obra gris .....	24
<b>Figura 6</b> Dinámica del funcionamiento de una obra verde .....	25
<b>Figura 7</b> Síntesis del marco conceptual.....	25
<b>Figura 8</b> Tasas de retroceso de la línea de costa entre Punta Caribaná y el río Sinú. 1964-2005.	26
<b>Figura 9</b> Fases de la metodología desarrollada .....	29
<b>Figura 10</b> Margen izquierdo de la desembocadura del río Hobo. Fotografía diciembre 2024 .....	36
<b>Figura 11</b> Margen derecho de la desembocadura del río Hobo. Fotografía diciembre 2024.....	37
<b>Figura 12</b> Playa de la zona centro. Fotografía enero 2025.....	38
<b>Figura 13</b> Bahía formada en la zona centro. Fotografía enero 2025 .....	38
<b>Figura 14</b> Playa de la zona de playa principal. Fotografía enero 2025 .....	39
<b>Figura 15</b> Oleaje incidente en la base del acantilado zona río hobo. Fotografía diciembre 2022	41
<b>Figura 16</b> Oleaje incidente. Izquierda: zona centro. Derecha: zona playa principal. Fotografía enero 2025 .....	42
<b>Figura 17</b> Circulación en época seca (izquierda) y húmeda (derecha). Las flechas a lo largo del litoral representan la corriente de deriva .....	43
<b>Figura 18</b> Obras costeras grises identificadas la zona: Sector río Hobo .....	46
<b>Figura 19</b> Obras costeras grises identificadas la zona: Centro.....	47
<b>Figura 20</b> Obras costeras grises identificadas la zona: Playa principal .....	48
<b>Figura 21</b> Identificación de obras costeras grises existentes.....	49

---

<b>Figura 22</b> Verificación existencia de obra #1 .....	50
<b>Figura 23</b> Foto en campo Obra #1.....	50
<b>Figura 24</b> Verificación existencia de obra #2 .....	51
<b>Figura 25</b> Foto en campo Obra #2.....	51
<b>Figura 26</b> Verificación existencia de obra #3 .....	52
<b>Figura 27</b> Foto en campo obra #3 .....	52
<b>Figura 28</b> Verificación existencia de obra #4 .....	53
<b>Figura 29</b> Foto en campo obra #4 .....	53
<b>Figura 30</b> Verificación existencia de obra #5 .....	54
<b>Figura 31</b> Foto en campo obra #5 .....	54
<b>Figura 32</b> Verificación existencia de obra #6 .....	55
<b>Figura 33</b> Foto en campo Obra #6.....	55
<b>Figura 34</b> Verificación existencia de obra #7 .....	56
<b>Figura 35</b> Foto en campo Obra #7.....	56
<b>Figura 36</b> Verificación existencia de obra #8 .....	57
<b>Figura 37</b> Foto en campo Obra #8.....	57
<b>Figura 38</b> Escala de erosión de CASSIE.....	58
<b>Figura 39</b> Fechas de las imágenes disponibles y analizadas en el primer periodo .....	60
<b>Figura 40</b> Cambios en la línea de costa de 1999 a 2001 .....	60
<b>Figura 41</b> Fechas de las imágenes disponibles y analizadas en el segundo periodo.....	61
<b>Figura 42</b> Cambios en la línea de costa de 2008 a 2013 .....	62
<b>Figura 43</b> Fechas de las imágenes disponibles y analizadas en el tercer periodo .....	63
<b>Figura 44</b> Cambios en la línea de costa de 2020 a 2021 .....	63
<b>Figura 45</b> Representación gráfica del corte del talud. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2022) .....	75

---

<b>Figura 46</b> Resultado esperado corte del talud. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2021) .....	75
<b>Figura 47</b> Resultado esperado hincado de troncos. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2023)..	76
<b>Figura 48</b> Resultado esperado siembra de pasto. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2021) .....	76
<b>Figura 49</b> Vista en planta de propuesta en sector río Hobo .....	77
<b>Figura 50</b> Vista en perfil de propuesta en sector río Hobo .....	78
<b>Figura 51</b> Propuesta Obra #1. Izquierda: Antes, derecha: Después .....	78
<b>Figura 52</b> Propuesta Obra #2. Izquierda: Antes, derecha: Después .....	79
<b>Figura 53</b> Propuesta Obra #3. Izquierda: Antes, derecha: Después .....	79
<b>Figura 54</b> Vista en planta de propuesta en zona centro.....	80
<b>Figura 55</b> Vista en perfil de propuesta en zona centro.....	81
<b>Figura 56</b> Propuesta Obra #5. Izquierda: Antes, derecha: Después .....	81
<b>Figura 57</b> Propuesta Obra #6. Izquierda: Antes, derecha: Después .....	82
<b>Figura 58</b> Propuesta Obra #7. Izquierda: Antes, derecha: Después .....	82
<b>Figura 59</b> Propuesta Obra #8. Izquierda: Antes, derecha: Después .....	83
<b>Figura 60</b> Vista en planta de propuesta en zona playa principal.....	84
<b>Figura 61</b> Vista en perfil de propuesta en zona playa principal.....	84
<b>Figura 62</b> Propuesta reducción de altura de los diques exentos.....	85

## 1. Resumen

Este trabajo tiene como objetivo proponer una estrategia para transformar las obras costeras grises en infraestructuras híbridas integrando soluciones verdes, con el fin de restaurar el balance sedimentario y mitigar la erosión costera en el litoral de Arboletes, Antioquia. Se desarrolló una metodología en tres fases: caracterización de la geomorfología y los procesos costeros, análisis del impacto de las obras grises existentes y el estudio de alternativas para su modificación.

Los resultados muestran que las obras actuales (espolones y diques exentos), han alterado la dinámica sedimentaria, generando un incremento de la erosión en áreas adyacentes no intervenidas, como la desembocadura del río Hobo. Este estudio resalta la importancia de combinar defensas estructurales con soluciones verdes basadas en la naturaleza, como la restauración de ecosistemas costeros y el uso de vegetación para estabilizar taludes. Estas intervenciones promueven la resiliencia del litoral frente al cambio climático y mejoran la sostenibilidad ambiental y social.

El estudio concluye que las infraestructuras híbridas ofrecen beneficios significativos, al equilibrar la protección del litoral con la conservación de ecosistemas y el bienestar de las comunidades locales. Este enfoque multidisciplinario representa una oportunidad para adoptar modelos sostenibles en la gestión costera de la región.

*Palabras clave:* obra gris, infraestructura verde, infraestructura híbrida, erosión costera, gestión sostenible.

---

## Abstract

This study aims to propose a strategy to transform gray coastal structures into hybrid infrastructures that integrate green solutions, with the purpose of restoring sediment balance and mitigating coastal erosion along the Arboletes shoreline, Antioquia. A three phase methodology was developed: characterization of geomorphology and coastal processes, análisis of the impact of existing gray structures and exploration of alternatives for their modification.

The results reveal that current structures (groins and exempt dikes) have disrupted sediment dynamics, leading to increased erosion in adjacent, non-intervened areas, such as the mouth of the Hobo River. This study emphasizes the importance of combining structural defenses with nature-based green solutions, such as coastal ecosystem restoration and the use of vegetation to stabilize slopes. These interventions enhance coastal resilience to climate change and improve environmental and social sustainability.

The study concludes that hybrid infrastructures provide significant benefits by balancing shoreline protection with ecosystem conservation and the well-being of local communities. This multidisciplinary approach represents an opportunity to adopt sustainable models for coastal management in the region.

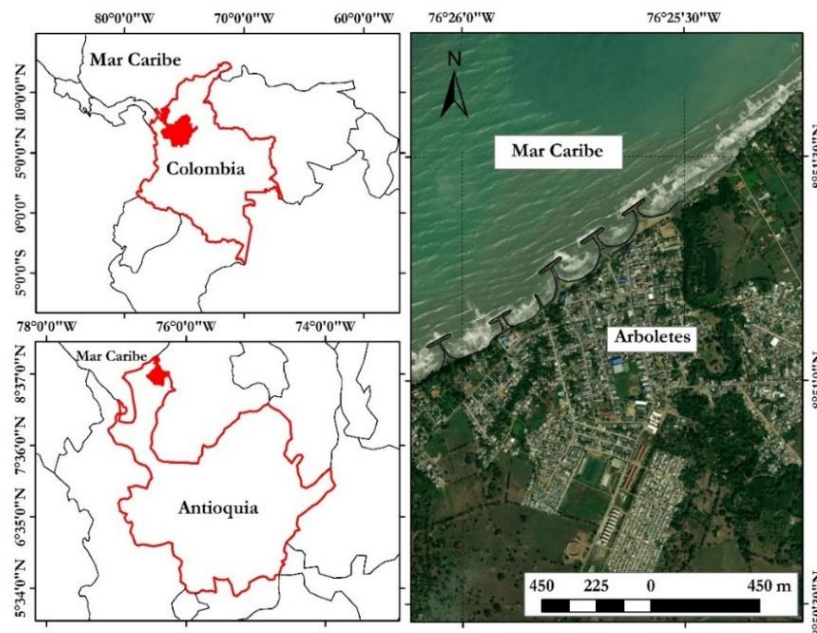
*Keywords:* gray structures, green infrastructure, hybrid infrastructure, coastal erosion, sustainable management.

## 2. Planteamiento del problema

### Área de estudio

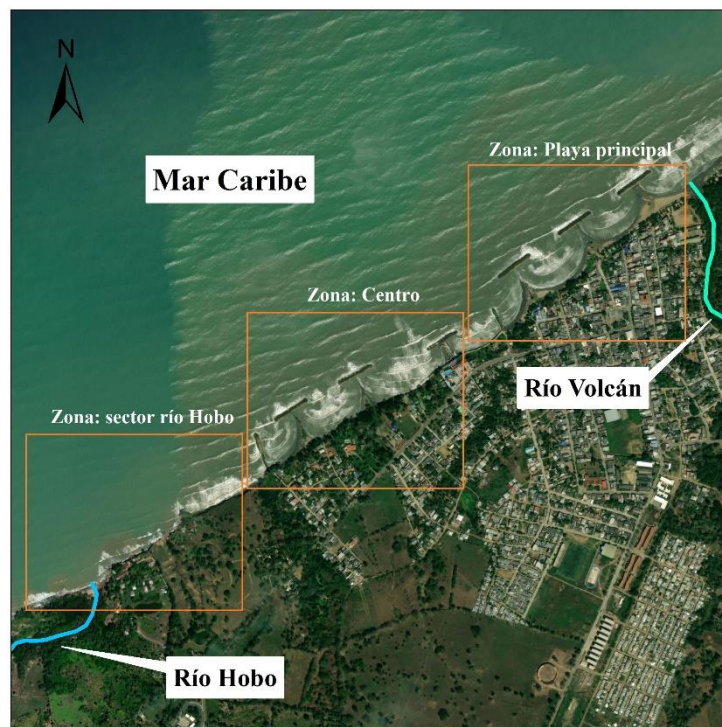
Arboletes es un municipio de Colombia ubicado al noroccidente del departamento de Antioquia en la región de Urabá, limita con el departamento de Córdoba al norte y su cabecera municipal se encuentra a orillas del Mar Caribe a 4 m sobre el nivel mar (Figura 1) (Alcaldía de Arboletes , 2024). Según (DANE, 2020), la proyección de su población para el año 2024 es de 32.192 habitantes. El municipio tiene una extensión de 710 km<sup>2</sup> y temperatura media de 28°C. El 75% de la economía de Arboletes está concentrada en la prestación de servicios de comerciales y turísticos (Alcaldía de Arboletes , 2024). Debido al atractivo de sus playas, Arboletes recibe un promedio de 10.000 turistas al año, especialmente en los meses de diciembre y enero, lo que convierte al municipio en uno de los destinos más visitados por personas provenientes de otros lugares de la región, el país y el mundo (Teleantioquia Periodista Digital, 2021). Por ello, es necesario e importante pensar en un desarrollo sostenible a largo plazo, que beneficie a la comunidad local y regional.

*Figura 1* Ubicación del área de estudio. Cabecera municipal de Arboletes - Antioquia



Para los fines de este trabajo, el litoral de interés abarca el tramo comprendido entre la desembocadura del río Hobo, al suroeste de la cabecera municipal, y la desembocadura del río Volcán, al noreste de la misma cabecera. Sobre este litoral, se realiza una zonificación que permite identificar diferentes puntos según el uso predominante de la línea de costa, tal como se muestra en la Figura 2. En la zona de la playa principal, como su nombre lo indica, predomina la actividad de turismo, es el área que más se utiliza por los visitantes para sus actividades de diversión y esparcimiento. En la zona centro predomina el uso de hotelería. En la zona del sector río Hobo predomina la actividad de pesca.

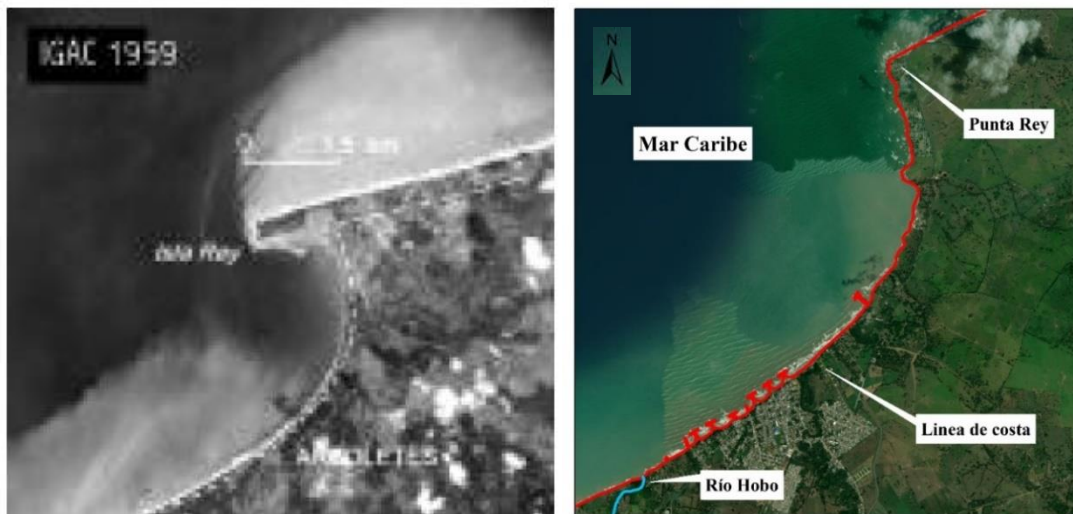
**Figura 2** Delimitación del área de estudio en el municipio de Arboletes



Hacia los años cincuenta, existía una península de 1.6 km de longitud (Figura 3) que se extendía desde punta Rey hasta el islote que hoy se conoce como isla Rey. Esta península funcionaba como una barrera natural que protegía la línea de costa del municipio, convirtiéndola en una bahía resguardada del oleaje proveniente del mar Caribe (MUTANTE, 2024). Los habitantes de Arboletes (ComunidadArboletes, 2021) mencionan diferentes hipótesis sobre la causa de la desaparición de la península. Una de las más citadas sugiere que los pescadores, con el

objetivo de reducir costos y evitar bordear toda la península para salir a pescar, crearon un canal que la atravesaba, alterando su estructura natural. A raíz de esta intervención, el mar comenzó a erosionar progresivamente la zona, lo que culminó en la desaparición total de la península en la década de los 60, lo cual dejó al litoral de Arboletes completamente expuesto y vulnerable al impacto directo de las olas incidentes del mar Caribe (AquaTerra, 2005). Este proceso, sumado a la intensa extracción de material de playa para la construcción de viviendas, aceleró la erosión costera en la región (Correa & Vernet, 2004) (AquaTerra, 2005).

**Figura 3** Cambio en la línea de costa de Arboletes. Izquierda: Aerofotografía del sector de Punta Rey, tomada por el IGAC en marzo de 1975. La línea discontinua representa el litoral en agosto del 2000. Derecha: Línea de costa en 2019



Nota: Fuente: Correa y Vernet, 2004

Una vez se dieron estas condiciones que aceleraron el proceso de erosión y después de que el mar se llevara la primera línea de casas, los propietarios de los terrenos que quedaron de frente con el mar que contaban con los recursos necesarios comenzaron a construir obras costeras grises tipo espolón para proteger sus propiedades de la incidencia directa del oleaje. Esta decisión se tomó, en gran parte, debido a la percepción de que este tipo de obras representaban una solución rápida. Sin embargo, existía una concepción equivocada de que, al interrumpir el flujo natural de sedimentos a lo largo de la costa, se podría frenar la erosión. Los espolones, al alterar el transporte natural de sedimentos, tienen un efecto contraproducente. Al disponerse de manera perpendicular a la línea de costa, modifican la corriente de deriva litoral, que normalmente mueve el sedimento

de manera paralela a la línea de costa. Los espolones actúan como obstáculos, acumulando sedimentos en su lado protegido, pero también impiden que estos sedimentos lleguen a las playas adyacentes. Como resultado, el flujo natural de arena se ve interrumpido, lo que no solo afecta a las áreas cercanas, sino que amplifica la erosión en otros sectores, agravando el fenómeno en lugar de mitigar sus efectos.

### 3. Justificación

Las zonas costeras albergan aproximadamente el 40% de la población mundial (McGranahan, Balk, & Bridget, 2007) y son fundamentales para la economía global. En ellas se encuentran los puertos, que gestionan alrededor del 80% del comercio mundial que se transporta por vía marítima (UNCTAD, 2020), además de ser fuente de recursos a través de actividades como la pesca y el turismo. Por otro lado, las zonas costeras son cruciales para la biodiversidad, debido a su alta productividad ecológica y a los diversos ecosistemas que sustentan. Sin embargo, a pesar de su gran importancia, las zonas costeras son de las más afectadas por los efectos del cambio climático, cuyos impactos ya se hacen sentir con mayor intensidad en la actualidad.

Dada su importancia y los impactos económicos, sociales y ambientales que genera el aumento de la erosión costera, organismos multilaterales como la ONU con su programa “La Década de los Océanos”, así como a nivel nacional, la implementación de la “Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros (PNOEC)”, a nivel departamental, el “Programa Integral Para el Monitoreo y la Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA)”, financiado por la Gobernación de Antioquia, y a nivel regional, iniciativas de manejo sostenible como las metodologías implementadas por la “Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (CORPOURABÁ)”, impulsan metodologías orientadas hacia la sostenibilidad y el manejo adecuado de los recursos costeros.

La región de Urabá, que actualmente cuenta con dos proyectos portuarios en desarrollo, experimentará un crecimiento económico y poblacional asociado a la modernización de la infraestructura vial, mejorando la conectividad con el resto del país y con mercados internacionales. No obstante, la expansión de la infraestructura portuaria y el crecimiento urbano asociado están ejerciendo presión sobre las zonas costeras, lo que plantea desafíos en términos de sostenibilidad ambiental. Las actividades humanas en estas áreas pueden afectar tanto la biodiversidad costera como la resiliencia de los ecosistemas marinos. Así, aunque las zonas costeras son clave para el desarrollo económico de Urabá, también enfrentan el reto de equilibrar este crecimiento económico con la conservación y el manejo sostenible de sus recursos naturales.

Ante la creciente amenaza de la erosión costera, intensificada por los efectos del cambio climático y considerando la relevancia de las zonas costeras a nivel global y en la región de Urabá, es necesario replantear las estrategias de manejo del litoral. Las obras grises que históricamente

han sido utilizadas para mitigar los efectos de la erosión han demostrado ser soluciones insostenibles a largo plazo. Esto se debe no solo al aumento y desplazamiento de la problemática que generan, sino también a su impacto ambiental negativo y a su limitada capacidad para adaptarse a las dinámicas naturales de la costa.

Con el objetivo de promover un cambio en el enfoque de manejo de zonas costeras, este trabajo propone una estrategia para transformar las obras costeras grises presentes en la zona de estudio en infraestructuras híbridas. Estas soluciones no solo son más eficaces y resilientes, sino que también son más amigables con el entorno natural, contribuyendo de manera sostenible a la protección del litoral.

La integración de infraestructuras híbridas en la gestión del litoral de interés y en general, en toda la región de Urabá, no solo responde a la necesidad de adaptar los ecosistemas costeros al cambio climático, sino que también representa una inversión a largo plazo en la sostenibilidad ambiental, económica y social de la región. Así, esta propuesta se presenta como una oportunidad para transformar la gestión de los espacios costeros, promoviendo un modelo de desarrollo que integre la protección del medio ambiente con el bienestar de las comunidades locales.

#### 4. Marco teórico

La erosión costera es un fenómeno natural y complejo que implica la pérdida de sedimentos de las zonas litorales, lo cual reduce el volumen de arena en las playas (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016). Aunque este proceso forma parte de la dinámica natural de las zonas costeras, puede ser acelerado o intensificado por actividades humanas, como la urbanización, la construcción de infraestructuras, la deforestación y la alteración de los flujos sedimentarios naturales. La erosión costera no solo afecta el paisaje y la biodiversidad, sino que también tiene implicaciones para la infraestructura, la economía local y las comunidades. Además, genera daños en viviendas y altera el acceso a recursos naturales como la pesca y el turismo. (Carranza-Edwards, 2010).

El equilibrio dinámico de las zonas costeras, en particular el de las playas, depende en gran medida de la carga sedimentaria que aportan los ríos desde el continente, así como de otras fuentes secundarias como las dunas y los acantilados costeros. En el caso específico del Caribe Colombiano se estima un aporte de aproximadamente 168 megatoneladas de sedimentos en suspensión al año (Restrepo, 2005). Sin embargo, gran parte de este sedimento aportado es fino, lo cual dificulta la consolidación efectiva de las playas, que están constituidas por arenas finas a gruesas. Como consecuencia, se ha visto un retroceso de las playas locales (Posada & Henao, 2008).

Comprender los procesos costeros es fundamental para entender la dinámica del litoral y el impacto de las intervenciones humanas en estos ecosistemas. En este contexto, se incluyen tanto los procesos físicos como los climáticos que afectan las costas.

Los procesos físicos son los fenómenos naturales que ocurren en las zonas costeras y que afectan la dinámica de la línea de costa, los ecosistemas y los materiales presentes en la región. Estos procesos son fundamentales para entender cómo se forman, evolucionan y modifican las costas y su geomorfología a lo largo del tiempo, entre los procesos más importantes se incluyen:

**Oleaje:** Se obtiene de la interacción del viento con la superficie del mar. Tiene un impacto directo sobre el balance sedimentario de las playas, pues el movimiento de las olas produce la remoción de arena (erosión) o la acumulación de sedimentos (depósito). La magnitud, frecuencia y dirección de las olas influye de forma determinante en el comportamiento de la línea de costa.

**Corrientes marinas:** Flujos de agua que se mueven horizontalmente a través del mar. Son impulsadas principalmente por el viento, la rotación de la Tierra (efecto Coriolis), las diferencias

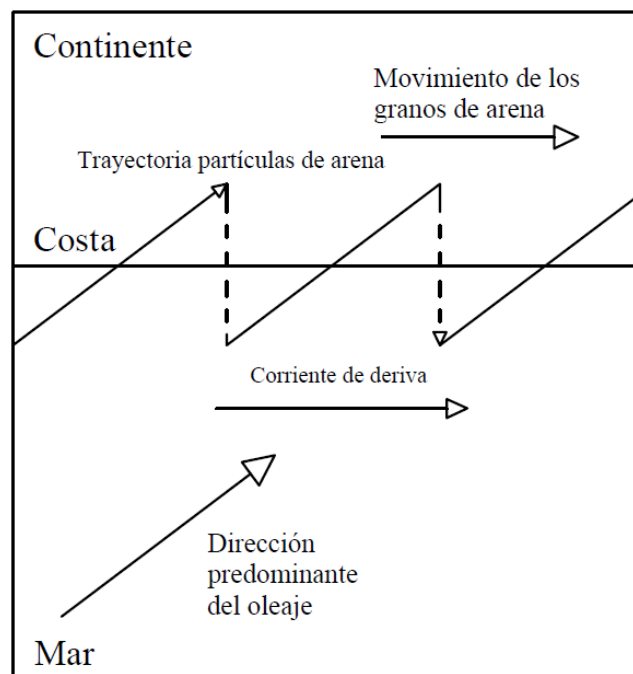
de temperatura y salinidad, y la batimetría. Las corrientes son importantes para el transporte de sedimentos y pueden impulsar la erosión o el depósito de sedimentos en el litoral.

**Mareas:** Ascenso y descenso periódico del nivel del mar, causado por la atracción gravitacional de la luna y el sol. Las mareas tienen un efecto directo sobre la línea de costa contribuyendo a la configuración de la distribución de sedimentos.

**Balance sedimentario:** La erosión es el proceso por el cual las olas, las corrientes y las mareas remueven el material de la costa. El depósito es el proceso opuesto de la erosión, en el cual las partículas de sedimento se acumulan sobre la costa. Ambos procesos trabajan en conjunto para moldear la forma del litoral, creando playas, acantilados, deltas y otros.

Todos estos procesos interactúan entre sí y afectan la dinámica de las costas, modificando su forma, estructura y ecosistemas a lo largo del tiempo (Figura 4). Además, comprender estos procesos es importante para entender cómo las costas evolucionan de manera natural, así como para evaluar el impacto de las intervenciones humanas, como las obras grises, en el equilibrio de esta dinámica y su influencia en la estabilidad y sostenibilidad de las costas (Charlier & Meyer, 2005).

**Figura 4** Interacción de procesos físicos



*Nota:* Fuente: modificado de (Junta de Andalucía, 2024)

Los procesos climáticos son aquellos fenómenos atmosféricos y meteorológicos que influyen en la dinámica de las costas. Estos procesos están estrechamente influenciados por el cambio climático, que, a través de fenómenos como el aumento del nivel del mar y eventos meteorológicos extremos, han modificado los patrones naturales de la costa, afectando la estabilidad de las infraestructuras y el balance sedimentario. El aumento global del nivel del mar, causado por el derretimiento de casquetes polares, es uno de los principales factores de riesgo para las costas. Además, los eventos climáticos extremos como huracanes y otros fenómenos afectan de manera directa a las zonas costeras (Nicholls & Cazenave, 2010).

Se estima que al menos el 49% de la línea de costa del caribe colombiano sufre procesos erosivos por factores naturales y antrópicos, generando impactos en las comunidades, ecosistemas y en sectores productivos (Aguilera, Reina, Orozco, Vega, & Barcos, 2017). La erosión a lo largo de la costa caribe colombiana está asociada a factores naturales como el oleaje, las corrientes, los eventos extremos y el aumento del nivel del mar. Sin embargo, las actividades humanas han exacerbado las tasas de erosión en varias zonas (Posada & Henao, 2008).

Los aspectos mencionados hacen que la zona costera del caribe colombiano sea objeto de estudio de muchas investigaciones científicas relacionadas con los procesos costeros. En la Tabla 1, se destacan al menos cinco estudios sobre erosión en cada uno de los departamentos de la región Caribe colombiana, subrayando la magnitud de este fenómeno y su relevancia. Los estudios se centran en la cuantificación de tasas de erosión y en la identificación de sus causas, destacando la influencia negativa de las intervenciones antrópicas, como las obras costeras con diseños inadecuados para mitigar la erosión.

**Tabla 1** Evaluaciones de erosión costera (2001-2021) en la costa Caribe colombiana

Autores	Departamento	Tasa (m/año)	Longitud de la línea de costa erosionada (m)	Obras costeras grises (N°)
Molina et al. (2001)	Atlántico	>10	-	-
Correa & Vernet (2004)	Antioquia	0.5 - 2	130.000	155
Rangel & Posada (2005)	Córdoba	1 - 2	-	-
Correa et al. (2007)	Sucre	0.5 - 1	-	-
	Córdoba	0.75 - 70	-	-
	Guajira	-	183.000	-
	Magdalena	-	79.000	-
	Atlántico	-	9.000	-
Posada & Henao (2008)	Bolívar	-	22.000	-
	Sucre	-	41.000	-
	Córdoba	-	89.000	-

	Antioquia	-	81.000	-
	Chocó	-	11.000	-
Rangel & Anfuso (2009 a, b, 2012)	Guajira	1.2 – 3.23	165.000	-
Rangel et al. (2011, 2012)	Bolívar	-	-	289
	Córdoba	-	-	150
	Guajira	3.2	-	-
Botero et al. (2013)	Magdalena	5.3	-	-
	Córdoba	0.62 – 3.3	-	-
	Guajira	2.3 – 4	307.900	114
	Magdalena	15 – 19	239.000	125
	Atlántico	29.5	36.700	62
Rangel (2020), Rangel et al. (2015, 2018)	Bolívar	1.7 – 3	194.000	321
	Sucre	1.7 – 3	46.300	324
	Córdoba	56.5	123.400	240
	Antioquia	3 – 3.5	204.900	223
Vélez et al. (2021)	Chocó-	4.96 –	-	-
	Antioquia	17.94	-	-

*Nota: Fuente: Pérez et al. (2022)*

Los 512 km de línea de costa que tiene Antioquia, al igual que muchas otras regiones del mundo, se encuentran sujetos a erosión generalizada. Este fenómeno ha impactado la infraestructura habitacional y turística. En las últimas cuatro décadas se ha registrado un retroceso de línea de costa que representan más de 4.5 km<sup>2</sup>, siendo los puntos más críticos los sectores de Punta Rey en Arboletes y Punta las Vacas en Turbo (Correa & Vernet, 2004).

Como se mencionó anteriormente, la erosión costera en el litoral de Antioquia y en el Golfo de Urabá ha sido estudiada por varios autores. (Correa & Vernet, 2004) estimaron tasas de erosión de 3.4 m/año en el extremo noreste del golfo y de 3.5 m/año en el interior del golfo de Urabá. Estas tasas se asocian con el ascenso relativo del nivel del mar, el diapirismo de lodo y la intervención antrópica (Vélez, Betancurth, & Cañón, 2021).

(Rangel, Williams, & Anfuso, 2018) establecieron que existen 223 obras costeras en el golfo de Urabá que suman una longitud construida de 11,6 km y con las cuales se ha intervenido de manera aleatoria el litoral. Por otro lado, (Posada & Henao, 2008) reportaron una extensión de costa erosionada de 81 km en Antioquia, con tasas de erosión entre 3.0 y 3.5 m/año.

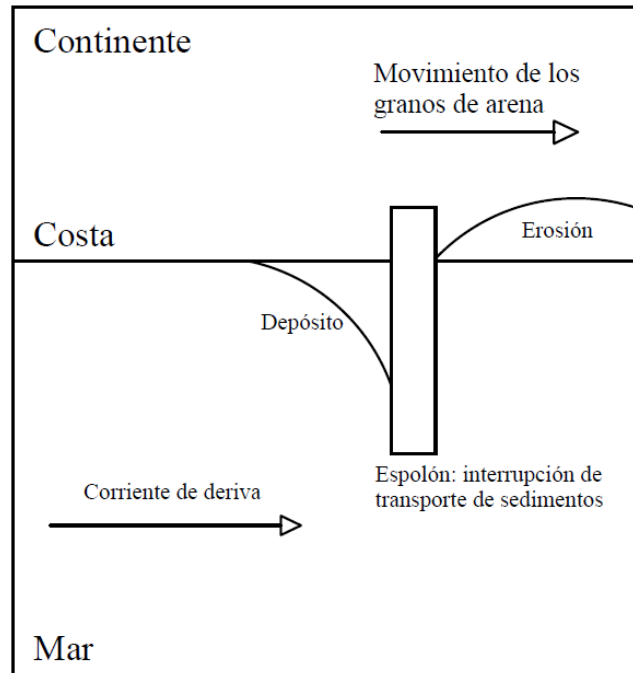
Más recientemente, (Vélez, Betancurth, & Cañón, 2021) caracterizaron los procesos de erosión y acreción cerca del delta del río Atrato, al sur del golfo de Urabá y cerca al Parque Nacional Natural Los Katíos. Los autores evidenciaron tasas de erosión entre 5.0 - 17.9 m/año asociadas a procesos naturales y antrópicos en la cuenca del río, tales como el aumento del nivel del mar, la subsidencia y la deforestación.

---

Para “mitigar” los efectos de la erosión, en la región de Urabá se ha implementado la construcción de obras de protección costera grises utilizando materiales como roca, hormigón o elementos artificiales como los tetrápodos, cubos, etc. (Manrique, 2012).

Este tipo de obras construidas con materiales como el hormigón armado, puede tener un impacto significativo en la biodiversidad local y generar efectos no deseados en los procesos sedimentarios. Las obras pueden disponerse de manera perpendicular o paralela a la línea de costa, y también dentro del medio marino o sobre la costa. Entre 1997 y 2000 se registró la construcción de 37 obras costeras grises en el litoral de Arboletes (MUTANTE, 2024), como respuesta a la creciente erosión. Sin embargo, la falta de estudios previos y una planificación adecuada han contribuido a la intensificación del problema.

Las obras grises (Figura 5) pueden alterar ecosistemas costeros, promover la erosión costera, reducir hábitats naturales, lo que provoca la pérdida de biodiversidad e impide procesos naturales de depósito de sedimentos y regeneración natural de las playas. Por tanto, la falta de estudios detallados sobre la dinámica costera y de una planificación adecuada de estas obras ha llevado a que, en muchos casos, estas soluciones no sean efectivas a largo plazo. Se ha señalado que el fracaso de los espolones y otras obras construidas en la región se debe en gran parte a la repetición de errores en su diseño y construcción (Correa & Vernet, 2004), como la falta de consideración de las condiciones locales, la dinámica sedimentaria y las posibles interacciones con otras obras cercanas.

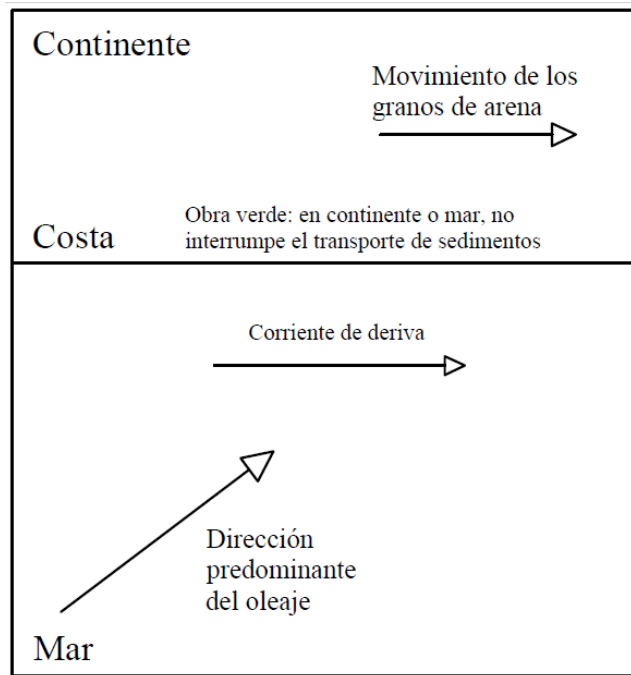
**Figura 5** Dinámica del funcionamiento de una obra gris

El concepto de “defensas basadas en la naturaleza” hace referencia al uso de los ecosistemas para proteger las costas imitando las características de la naturaleza, pero son diseñadas y construidas por el ser humano. Estas soluciones incluyen ecosistemas costeros naturales, como humedales y arrecifes, así también diseños híbridos que combinan los beneficios de la naturaleza con elementos estructurales, aprovechando las fortalezas de ambos. En un sentido más amplio y no limitado solo a las zonas costeras, este tipo de soluciones también se conoce como “infraestructura verde” (Figura 6).

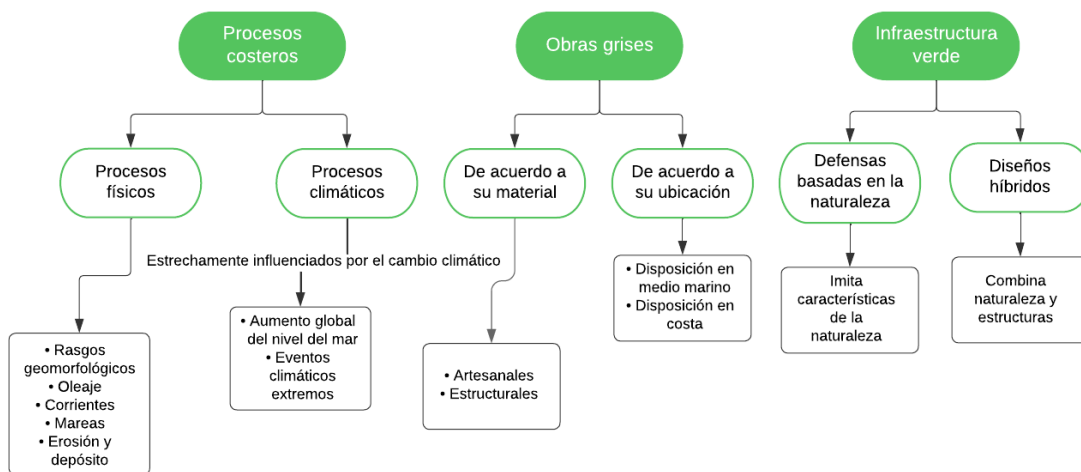
Este tipo de infraestructura se diferencia de las obras grises principalmente en dos aspectos: primero, tienen un comportamiento dinámico, por lo que se adaptan con las condiciones cambiantes del clima y segundo, por los múltiples beneficios que ofrecen, como creación de hábitats para las especies marinas y el fomento de pesca. Aunque las infraestructuras basadas en la naturaleza se han convertido en una alternativa prometedora con resultados principalmente positivos, es importante mencionar que aún existe poca información que respalde su efectividad para su implementación en diferentes escenarios, sin embargo, esta información se puede obtener mediante pruebas a diferentes escalas (tanto regionales como urbanas), lo que permitirá responder a la necesidad de enfrentar riesgos costeros, integrando la conservación ambiental, la sostenibilidad y

el desarrollo costero. Estas soluciones pueden complementar o incluso reemplazar las obras grises, proporcionando alternativas más sostenibles y rentables a largo plazo, además de promover la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas. No obstante, la aplicación de este tipo de infraestructura requiere un enfoque integral y multidisciplinario (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021).

**Figura 6** Dinámica del funcionamiento de una obra verde



**Figura 7** Síntesis del marco conceptual





---

sector Volcán de Lodo, paseo marítimo en Punta Rey, paseo marítimo en Minuto de Dios, diques exentos -paseo marítimo en playa principal. Sin embargo, luego de analizar diseños y dimensionamientos, factores como su influencia en la dinámica litoral y los análisis técnico, económico y funcional, solo resultaron viables las siguientes alternativas: diques exentos en playa principal y sector Volcán de Lodo, y paseo marítimo en Punta Rey y Minuto de Dios, por lo que se procedió con la elaboración de diseños definitivos solo de estas alternativas (AquaTerra, 2005).

Posterior a lo anterior, en 2009 se inició la construcción de los diques exentos propuestos en la playa principal, basándose en el análisis y diseño realizados años antes, sin embargo, en el diseño de estas obras no se consideró el posible impacto en zonas aledañas a la intervención, lo cual se hizo evidente años después en el sector de la desembocadura del río Hobo. En esta zona, se encontraba asentada una comunidad vulnerable que se vio obligada a abandonar sus viviendas, ya que la erosión costera comenzó a destruirlas por completo, generando impactos tanto en su vida cotidiana como en sus medios de subsistencia (pesca y turismo).

## 5. Objetivos

### 5.1 Objetivo general

Plantear una propuesta para transformar las obras costeras grises existentes en el litoral urbano de Arboletes mediante su hibridación con soluciones verdes para el restablecimiento del balance sedimentario.

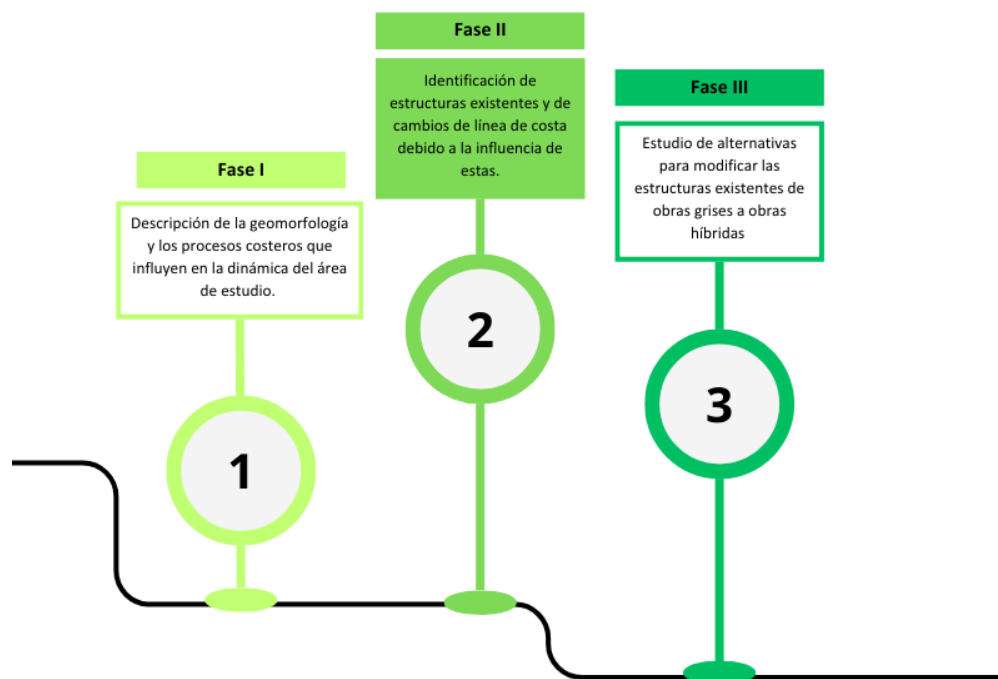
### 5.2 Objetivos específicos

- Describir la geomorfología, características del oleaje, corrientes y mareas en las diferentes épocas climáticas del municipio de Arboletes Antioquia.
- Analizar los cambios en la línea de costa antes, durante y después de la construcción de las obras grises existentes, para evaluar su impacto en el balance sedimentario.
- Identificar soluciones verdes costeras que podrían ser aplicadas a las obras grises existentes, de tal forma que contribuyan sosteniblemente al balance sedimentario de las playas de arena.
- Proponer estrategias de hibridación de las obras costeras grises existentes en litoral urbano de Arboletes incorporando soluciones verdes para la recuperación del balance sedimentario y promuevan la sostenibilidad del paisaje costero.

## 6. Metodología

Para alcanzar los objetivos de este trabajo, se estructuró una metodología dividida en tres fases, cada una de las cuales está vinculada los objetivos específicos del estudio. Así, la Fase I asegura el cumplimiento del primer objetivo específico, que consiste en describir los procesos costeros que ocurren en el municipio de Arboletes. La Fase II se centra en el análisis de los cambios ocurridos en la línea de costa de interés, tanto antes, durante y después de la construcción de las obras costeras grises existentes en el litoral de interés, asegurando el cumplimiento del segundo objetivo específico. Finalmente, la Fase III tiene como propósito identificar soluciones verdes costeras que puedan integrarse con las defensas grises, con el fin de contribuir sosteniblemente al balance sedimentario de las playas, como se plantea en el tercer objetivo específico. Además, esta fase también abordará el cuarto objetivo específico, que consiste en proponer una estrategia conceptual para transformar las obras grises en obras híbridas integrando infraestructura verde. El resumen del desarrollo de cada una de estas fases se presenta en la Figura 9, que ilustra de manera esquemática las etapas involucradas.

*Figura 9 Fases de la metodología desarrollada*



A continuación, se describen las actividades incluidas en el desarrollo de cada fase para el cumplimiento de los objetivos establecidos.

### 6.1 Descripción de la geomorfología y los procesos costeros que influyen en la dinámica del área de estudio

La fase I, resumida en la Tabla 2, consistió en la descripción de la geomorfología y los procesos costeros de la zona de estudio. Dada la magnitud reducida de esta franja costera analizada, se realizó una búsqueda de información general sobre la región, considerando que los procesos costeros se desarrollan en una escala espacial más amplia. No obstante, la información obtenida resulta ser suficiente para identificar las variables de interés en esta primera fase, tales como los rasgos geomorfológicos, el oleaje, las corrientes y las mareas. Esto permite dar una comprensión inicial de las características de esta línea de costa de interés.

**Tabla 2** Desarrollo de la Fase I

<b>Fase I. Descripción de la geomorfología y los procesos costeros que influyen en la dinámica del área de estudio</b>			
Procedimiento	Actividad	Herramienta	Resultado esperado
1.1 Geomorfología	-Revisión de estudios que describen la geomorfología costera de Arboletes	-Artículos científicos de los autores: (Correa & Vernette, 2004) (Rangel, 2009) (Correa, Acosta, & Bedoya, 2007) (AquaTerra, 2005)	- Descripción de las principales formas costeras en Arboletes (playas, acantilados, etc.) - Identificación de áreas propensas a la erosión costera
1.2 Oleaje	-Revisión de estudios sobre la dinámica del oleaje en la zona de interés	-Artículos científicos de los autores: (Correa & Vernette, 2004) (Ricaurte & Bastidas, 2017) (Sunamura, 2015)	-Descripción del oleaje en la región (altura y dirección) en las diferentes épocas climáticas
1.3 Corriente de deriva	-Revisión de estudios previos en la zona de interés para la identificación y	-Artículos científicos de los autores: (Molina, Molina, & Chevillot, 1992)	-Descripción de las corrientes de deriva en el área de estudio, incluyendo velocidad y

	descripción de las corrientes de deriva	(Chevillot, Molina, Giraldo, & Molina, 1993)	dirección predominante en las diferentes épocas climáticas
1.4 Marea y nivel del mar	-Revisión de estudios sobre la variabilidad del nivel del mar en la región Caribe	-Artículos científicos de los autores: (Correa & Vernet, 2004)	-Descripción de las mareas en la zona de interés, incluyendo amplitud y tipo de marea

Para llevar a cabo la Fase I, se realizó una búsqueda de información bibliográfica. El objetivo principal de esta fase fue obtener un contexto general de la zona de interés, incluyendo aspectos como el tipo de costa (arenosa, rocosa, acantilada, etc.), la altura y características del oleaje, dirección de las corrientes y características de la marea. Esta información permitió construir un panorama integral de los procesos dinámicos que afectan el litoral de interés, ayudando a comprender cómo estos procesos interactúan entre sí y qué impacto tienen en la estabilidad de la línea de costa. La recopilación y análisis de estos datos son importantes para identificar las variables más relevantes que guiarían las fases posteriores de este trabajo, permitiendo una mejor planificación y evaluación de las intervenciones necesarias en el área de estudio.

## **6.2 Identificación de obras costeras grises existentes y de cambios de línea de costa debido a la influencia de estas**

Para ejecutar la Fase II, descrita en la Tabla 3, se comenzó con la identificación de las obras de protección costera existentes a lo largo del litoral de interés. Este primer procedimiento se llevó a cabo mediante el análisis de una foto base de la herramienta ArcBruTile de ArcGIS del año 2023. Este análisis permitió identificar las obras costeras grises presentes en la zona. Posteriormente, se realizó una visita de campo con el fin de verificar la información obtenida en el primer procedimiento. Durante esta visita, se confirmó el número, tipo y disposición de las obras costeras existentes. Este registro visual fue importante para obtener una visión detallada de las condiciones locales, lo que facilitó el análisis y la identificación de las intervenciones necesarias para transformar las obras costeras grises en obras híbridas, integrando soluciones más sostenibles y adaptadas a las dinámicas naturales de la costa.

**Tabla 3** Desarrollo de la Fase II

<b>Fase II. Identificación de obras costeras grises existentes y de cambios de línea de costa debido a la influencia de estas</b>			
Procedimiento	Actividad	Herramienta	Resultado esperado
2.1 Identificación de obras costeras grises existentes	-Revisión de imagen satelital de la zona de estudio para identificar las obras costeras grises existentes	-Software ArcGIS -Herramienta ArcBruTile	Identificación de las obras costeras grises existentes en el área de interés
2.2 Verificación de las obras costeras grises existentes	-Salida de campo para identificar la presencia de obras costeras grises identificadas en el procedimiento anterior	-Mapa de localización -Cámara fotográfica -Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023) -Software ArcGIS	-Confirmación en terreno de la ubicación y tipo de obra costera identificada, comparando con los datos obtenidos a partir de la revisión de las imágenes satelitales
2.3 Análisis del balance sedimentario	-Análisis de la evolución de la línea de costa en tres momentos diferentes: antes, durante y después de la construcción de las obras de protección costera.	-Herramienta CASSIE -Imágenes satelitales	-Descripción de los cambios en el balance sedimentario del litoral de interés

Para identificar la erosión/acreción provocada por las obras costeras grises existentes, se utilizó la herramienta CASSIE, una plataforma web colaborativa con soluciones de observación y previsión geoespacial aplicadas al seguimiento, mitigación y adaptación de la zona costera ante el cambio climático (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024). Las imágenes analizadas fueron tomadas por el satélite Landsat en los siguientes periodos: 1999 - 2001 (antes de la construcción de los diques exentos en la playa principal), 2008 - 2013 (inmediatamente después de la construcción de los diques exentos) y 2019 - 2021 (varios años después de la intervención). Finalmente, se llevó a cabo un análisis visual para describir los cambios ocurridos en la zona de interés a lo largo del tiempo. Los resultados que entrega la herramienta CASSIE proporcionan la evolución de la línea de costa, realizando transectos a lo largo del litoral e identificando si hubo

pérdida o depósito de sedimentos por cada transecto, esto permite identificar áreas vulnerables a la erosión costera y los cambios que se quieren identificar en esta fase.

### 6.3 Estudio de alternativas para modificar las estructuras existentes de obras grises a obras híbridas

La fase III, indicada en la Tabla 4, se centró en la identificación, comparación y análisis de las características que definen tanto las obras de protección costera grises como las soluciones basadas en infraestructura verde. El objetivo de esta fase fue establecer una comparación clara entre ambos enfoques, considerando factores como la forma, los materiales empleados, la ubicación y el impacto de estas infraestructuras sobre la línea de costa. Este análisis permitió distinguir las características de las obras grises y verdes, brindando una comprensión de los factores que influyen en la elección de cada tipo de intervención.

**Tabla 4** Desarrollo de la fase III

<b>Fase III. Estudio de alternativas para modificar las estructuras existentes de obras grises a obras híbridas</b>			
Procedimiento	Actividad	Herramienta	Resultado esperado
3.1 Diferenciación entre obras costeras grises e infraestructura verde costera	-Clasificar obras costeras grises e infraestructura verde	-Publicaciones científicas de los autores: (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021) (Reguero, Beck, Losada, & Narayan, 2017)	-Descripción de la tipología de obras costeras grises -Descripción de la tipología de infraestructura verde
3.2 Estudios de caso para identificar estrategias usadas en otras zonas costeras	-Reconocimiento y análisis de aplicación de hibridación de obras grises	-Análisis de proyectos previos publicado por los autores: (Silva, y otros, 2019)	-Información sobre las estrategias usadas en otras zonas costeras
3.3 Definir una propuesta de modificación de las obras existentes	-Proponer una modificación en las obras grises que incluya infraestructura verde para mejorar el	-Resultados de las fases anteriores	-Propuesta para modificar las obras grises existentes

---

equilibrio  
sedimentario en el  
litoral de interés

---

Posteriormente, se realizó una búsqueda de metodologías empleadas en otras zonas costeras, para modificar y optimizar las obras grises. Este análisis permitió conocer prácticas exitosas implementadas. A lo largo de esta etapa, se evaluaron beneficios y limitaciones de las metodologías aplicadas en otros lugares, con el fin de identificar aquellas que pudieran adaptarse a las características del litoral de interés.

Con base en los resultados obtenidos, se desarrolló una propuesta para modificar las obras grises existentes, integrando soluciones tanto para el refuerzo de las obras grises existentes como para la incorporación de soluciones verdes. Esta propuesta busca mejorar el balance sedimentario, promover la sostenibilidad a largo plazo y adaptar las infraestructuras a las dinámicas naturales del litoral.

La integración de soluciones verdes en la modificación de las obras costeras grises permitirá mejorar la adaptación de la infraestructura a las dinámicas naturales del litoral, generando un sistema híbrido más eficiente y resiliente a largo plazo. Además, este enfoque no solo responde a los desafíos medioambientales, sino que también tiene en cuenta el bienestar de las comunidades locales, fomentando la participación ciudadana y la apropiación de las estrategias de conservación y manejo sostenible.

## **7. Resultados y análisis**

Aplicando la metodología descrita, se obtuvieron los siguientes resultados que permiten responder los objetivos planteados:

### **7.1 Fase I. Descripción de la geomorfología y los procesos costeros que influyen en la dinámica del área de estudio**

Los resultados de la Fase I se derivan de la revisión de artículos científicos, informes técnicos y otros estudios disponibles sobre la dinámica costera de Arboletes, Antioquia. Este análisis tuvo como objetivo caracterizar la franja costera del municipio, describiendo aspectos clave como la geomorfología del litoral, el comportamiento del oleaje, la corriente de deriva, la marea y el nivel del mar.

Arboletes se encuentra entre los municipios más afectados por la erosión costera en la región. Diversos estudios indican altas tasas de erosión en los últimos años, con proyecciones que sugieren un retroceso de la línea de costa superior a 65 m para el año 2059 (Paniagua & Correa, 2013). En respuesta a este problema, se han implementado obras de protección costera grises como espolones y muros de contención, las cuales, en lugar de mitigar la erosión, han trasladado y agudizado el problema (Correa & Vernet, 2004). Según (Cardona, 2018), las zonas que experimentan las mayores acreciones y erosiones están asociadas a la construcción de espolones, que alteran la dinámica natural de la zona. Como alternativa, se propone la intervención con enrocados, ya que estos no trasladan ni intensifican el retroceso de la línea de costa.

#### ***Geomorfología***

En cuanto a la geomorfología, los rasgos geomorfológicos más relevantes en la franja costera de interés incluyen unidades de costas altas y unidades de costas bajas (Rangel, 2009). Según (Correa & Vernet, 2004), la morfología de esta zona se describe como “costa abierta”, con una configuración “en sierra”, caracterizada por amplias bahías separadas por puntas de mayor resistencia a la erosión.

Entre las principales geoformas presentes se encuentran acantilados, arcos, acanaladuras de erosión, playas y manifestaciones de diapirismo de lodos. Los rasgos geológicos sobre los acantilados facilitan los movimientos en masa, lo que contribuye al retroceso de la línea de costa (Correa, Acosta, & Bedoya, 2007). De manera más específica, la morfología del litoral de Arboletes presenta una gran cantidad de terrazas marinas emergidas, con una elevación media de 36 m desde San Juan de Urabá. Esta elevación disminuye gradualmente hacia Punta Rey, donde la altura alcanza los 0.5 m.

El área también está marcada por intrusiones de lodo, una característica dominante en la región, especialmente en el Volcán de Lodo, que se eleva unos 22 m sobre el nivel del mar. Igualmente, en el sector de río Hobo se pueden observar intrusiones de lodo en la parte baja de los acantilados (AquaTerra, 2005).

### **Zona: Sector río Hobo**

El margen izquierdo de la desembocadura del río Hobo está formado por una playa de unos 130 m de longitud y 20 m de ancho, adicionalmente, también hay un parche de manglar (Figura 10); el margen derecho presenta un acantilado casi vertical de aproximadamente 12 m de altura (Figura 11), el cual genera una terraza de arcillolitas y lodolitas que se extiende hasta Punta Rey.

**Figura 10** Margen izquierdo de la desembocadura del río Hobo. Fotografía diciembre 2024



**Figura 11** Margen derecho de la desembocadura del río Hobo. Fotografía diciembre 2024



### **Zona: Centro**

En esta zona, el acantilado es de unos 10 m de altura y se presenta una playa de unos 20 m de ancho. Desde el límite sur de esta zona y en sentido norte, se extiende una zona intervenida con obras de protección costera grises, que presenta playas (Figura 12) encajadas en pequeñas bahías (Figura 13). Estas playas podrían haberse formado debido a la interrupción del transporte de sedimentos generado por dicho tipo de obras.

**Figura 12** Playa de la zona centro. Fotografía enero 2025



**Figura 13** Bahía formada en la zona centro. Fotografía enero 2025



### **Zona: Playa principal**

La playa principal del municipio se caracteriza por tener las playas más amplias de la zona de estudio (Figura 14) y por tanto es la zona que más se explota turísticamente. La altura del acantilado en esta zona es de unos 8 m y la playa tiene una longitud de 700 m y un ancho de 40 m.

**Figura 14** Playa de la zona de playa principal. Fotografía enero 2025



De acuerdo con lo anterior, se identifica que la zona más vulnerable y propensa a la erosión costera, debido a la dinámica de los procesos costeros en el área de interés, es la zona del sector del río Hobo. Esto se debe a que, en esta área, la línea de costa está formada por un acantilado con condiciones inestables que facilitan los deslizamientos, los cuales retroceden considerablemente la línea de costa. Por lo tanto, es importante enfocar esfuerzos en esta zona para intentar reforzar, en la medida de lo posible, las condiciones geomorfológicas naturales de la misma.

### **Clima**

De manera general, la región presenta dos épocas climáticas influenciadas por los desplazamientos periódicos de la Zona de Convergencia Intertropical: una época seca, que va de diciembre a abril, caracterizada por la predominancia de vientos del norte y del noroeste con magnitudes mayores; y una época húmeda, que se extiende de mayo a noviembre, en la que predominan los vientos del oeste (Ricaurte & Bastidas, 2017) (Ordoñez, Peña, Bastidas, & Ricaurte, 2017) con magnitudes más débiles a la época seca. Durante el transcurso del año, la temperatura en el área de interés oscila entre 27 y 31°C, esta temperatura provoca agrietamiento de los suelos, que luego, cuando llega la lluvia, genera drenajes de escorrentía que favorecen el desgaste de estos, aportando al aumento de la erosión.

### *Oleaje*

A partir de la diferenciación de las épocas climáticas, se identifica que el oleaje en la zona entre Arboletes y Necoclí están principalmente influenciado por los vientos Alisios del norte y el noreste durante la época seca (Correa & Vernet, 2004). En esta temporada, el oleaje proveniente del norte y el nor-noroeste es más frecuente, con alturas medias de las olas que oscilan entre 0.5m y 1.6m, lo cual está asociado a la actividad de los vientos alisios del norte y noreste. Esta época es la que presenta mayor energía del oleaje. Por otro lado, en la época húmeda, los oleajes provienen del oeste-suroeste, asociados a los vientos del sur, lo que resulta en un oleaje de menor energía (Ricaurte & Bastidas, 2017). Durante esta temporada, se puede considerar realizar cualquier tipo de modificación que se requiera, ya que el oleaje permite llevar a cabo intervenciones dentro de la zona del mar y en su orilla.

Dado lo anterior, se puede concluir que los procesos de oleaje dominan en esta zona. Además, (Sunamura, 2015) sugiere que el oleaje es el principal factor en el retroceso de acantilados. Por su parte (Correa & Vernet, 2004) identificaron el ángulo de incidencia del oleaje como factor clave en este proceso, lo que respalda la información previamente descrita sobre la dinámica del retroceso de los acantilados en esta zona.

### **Zona: Sector río Hobo**

En esta zona, el oleaje en la época seca incide directamente sobre la base del acantilado (Figura 15) generando socavamientos. Por otro lado, en época húmeda, el oleaje incide con menos energía, lo que disminuye la afectación en la base de los acantilados, pero permanece.

**Figura 15** Oleaje incidente en la base del acantilado zona río hobo. Fotografía diciembre 2022



### **Zona: Centro y Playa principal**

En estas zonas, el oleaje en época seca, al ser de mayor energía, es disipado por las obras allí presentes. Las playas disminuyen su ancho, pero no sufren afectaciones directas. En la época húmeda, el sistema se conserva estable. En estas zonas, el oleaje no incide sobre la base del acantilado debido a las playas, las cuales disipan la energía incidente (Figura 16).

Debido a lo anterior, la zona más vulnerable a la erosión costera causada por el oleaje es la zona del sector río Hobo. Esto se debe a que la incidencia directa del oleaje sobre la base del acantilado provoca socavamientos que debilitan la parte superior al quedar sin soporte. Además, cuando la parte superior se carga con aguas de lluvia, se desmorona, lo que acelera el retroceso de la línea costera.

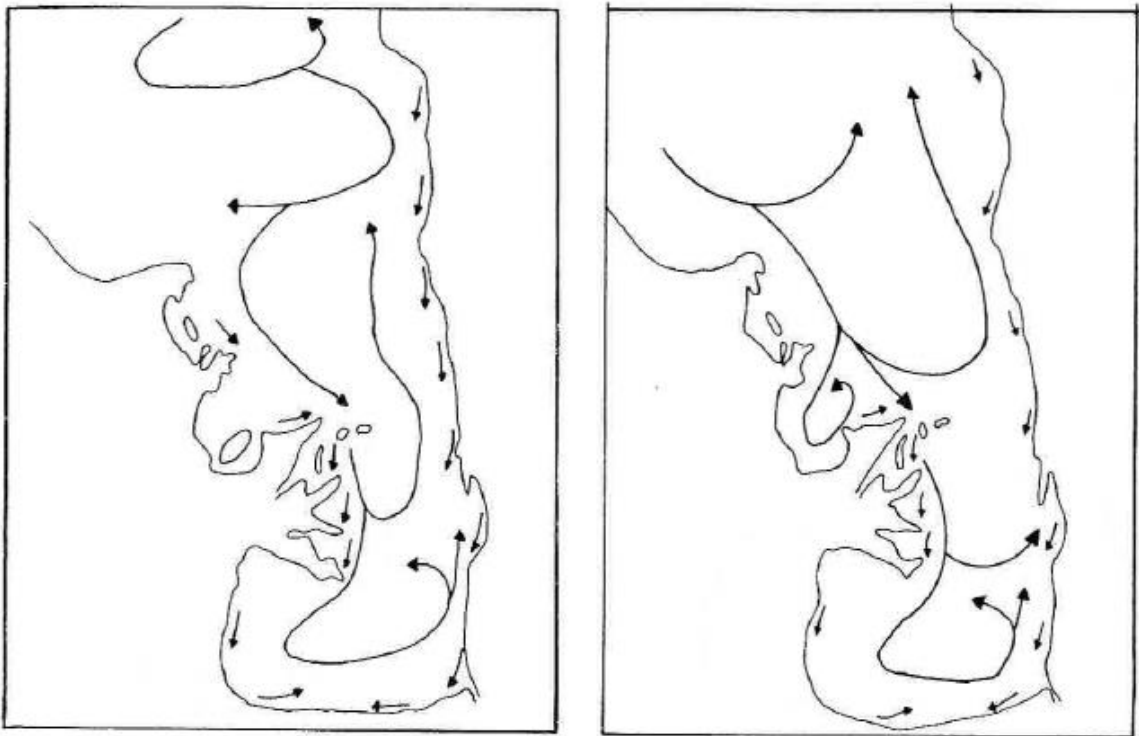
**Figura 16** Oleaje incidente. Izquierda: zona centro. Derecha: zona playa principal. Fotografía enero 2025



### ***Corriente de deriva***

(Molina, Molina , & Chevillot , 1992) y (Chevillot, Molina, Giraldo, & Molina, 1993) indican que la dirección de la corriente de deriva litoral en el golfo de Urabá es de norte a sur durante ambas épocas climáticas (seca y húmeda) (Figura 17). El factor determinante de estas características de la corriente de deriva es el oleaje, lo cual puede causar erosión en algunos puntos y depósito en otros.

**Figura 17** Circulación en época seca (izquierda) y húmeda (derecha). Las flechas a lo largo del litoral representan la corriente de deriva



*Nota: Fuente:* (Chevillot, Molina, Giraldo, & Molina, 1993)

### **Mareas**

El régimen de mareas en el Caribe sur colombiano es semidiurno mixto. Según las tablas de marea del IDEAM, las amplitudes máximas de marea en esta zona alcanzan los 40 cm (Correa & Vernet, 2004).

De manera general, el litoral costero de interés presenta una serie de condiciones que definen su dinámica costera. La combinación de oleaje, corriente de deriva y marea constituyen un reto para la conservación del litoral y planificación costera, ya que estos procesos no actúan de manera aislada, sino que interactúan entre sí y aumentan sus efectos. Por ejemplo, el oleaje asociado a los vientos alisios puede aumentar la erosión en ciertas zonas, mientras que la marea y la corriente de deriva contribuyen al transporte de sedimentos, lo que genera variaciones en el perfil costero. Esta interacción genera la necesidad de un enfoque integral para la gestión de la zona costera.

Por ello, es necesario profundizar en los efectos del cambio climático en la región, especialmente en relación con el aumento del nivel del mar y la intensificación de fenómenos climáticos extremos, para desarrollar estrategias de mitigación adaptativas. Estas estrategias deben ser dinámicas y considerar no solo los procesos naturales, sino también las actividades humanas que afectan la dinámica costera, como la urbanización y las obras de infraestructura.

Los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica ofrecen una comprensión de la dinámica costera en la cabecera municipal de Arboletes. Sin embargo, es importante implementar medidas de gestión adaptativa frente al impacto de la erosión costera, con el fin de proteger tanto los ecosistemas como las comunidades locales. Específicamente, sería recomendable enfocar los esfuerzos de conservación en las áreas más vulnerables, como los márgenes de los ríos y las zonas afectadas por la construcción de obras de protección costera grises. Además, se sugiere realizar estudios adicionales que evalúen la interacción entre los procesos naturales y las intervenciones humanas en la zona, con el fin de ajustar las políticas de manejo y prevención de manera más eficaz.

## **7.2 Fase II. Identificación de obras costeras grises existentes y de cambios de línea de costa debido a la influencia de estas**

La Fase II de estudio tuvo como propósito analizar los cambios en la línea de costa de Arboletes, a partir de la influencia de las obras de protección costera grises existentes. Este análisis se centró en identificar el balance sedimentario de la zona de interés antes, durante y después de la construcción de dichas obras. Para lograr este objetivo, se inició con la identificación de las obras costeras grises existentes mediante la revisión de una imagen satelital, seguida de una verificación en campo para confirmar la información obtenida inicialmente. Además, se realizó un análisis temporal de los cambios de la línea de costa, utilizando la herramienta CASSIE para delimitar la línea de costa en los tres momentos antes mencionados. Este enfoque integral permite comprender cómo las intervenciones humanas han alterado la dinámica sedimentaria de la zona. En particular, se buscó evaluar los impactos de estas obras en los procesos de erosión y acreción, factores clave que inciden en la estabilidad del litoral.

El estudio de las obras existentes y los cambios en la línea de costa es importante para evaluar la efectividad de las medidas de protección implementadas en la región, con el objetivo de

identificar las áreas más vulnerables y los posibles efectos adversos. Este análisis, realizado a través de imágenes georreferenciadas y verificaciones en campo, proporciona una base para la formulación de recomendaciones sobre la necesidad de transformar las actuales obras de protección costera en soluciones híbridas, que integren enfoques más sostenibles y adaptados a la dinámica natural de la costa.

Al comprender cómo las obras afectan la evolución de la línea de costa en diferentes momentos temporales, se obtienen datos importantes para la planificación futura y la gestión del litoral. De esta manera, los resultados de esta fase permiten tomar decisiones informadas sobre las estrategias de intervención necesarias para fortalecer la resiliencia del litoral frente a los procesos naturales de erosión y otros factores ambientales, como el cambio climático.

### ***Identificación de obras costeras grises existentes***

Para identificar las obras costeras grises existentes en el litoral de interés, se utilizó una imagen cargada con la herramienta ArcBruTile, un complemento del software ArcGIS. Una vez cargado este mapa base, se delimitó la línea de costa y se identificaron ocho obras costeras, como se muestra en la Figura 18. A continuación, se describen las obras encontradas:

#### **Zona: Sector río Hobo**

No se identifican obras grises existentes en esta zona (Figura 18).

**Figura 18** Obras costeras grises identificadas la zona: Sector río Hobo



*Nota: Imagen Bing Satellite 2023*

### **Zona: Centro**

1. Espolón (obra #1): Construido de tetrápodos y con una longitud aproximada de 100 m. Está dispuesto de manera perpendicular a la línea de costa, en un predio del barrio Campomar del municipio.
2. Dique exento (obra #2): Situado a unos 150 m de distancia de la obra #1, construido también con tetrápodos, dispuesto paralelamente a la línea de costa, y con una longitud aproximada de 110 m. Se observa un camino de arena que conecta la obra con la playa del barrio Campomar.
3. Dique exento (obra #3): Ubicado a unos 200 m de distancia de la obra #2, construido con tetrápodos, dispuesto paralelamente a la línea de costa, con una longitud aproximada de 110 m. Asimismo, se identifica un camino de arena que conecta la obra con la playa del Hotel El Retiro.

4. Dique exento (obra #4): Situado a unos 280 m de distancia de la obra #3, construido con tetrápodos, dispuesto paralelamente a la línea de costa, con una longitud aproximada de 100 m. Se observa un camino firme de aproximadamente 50 m que conecta la obra con la playa del Hotel Riviera del Sol, proporcionando acceso a varios atractivos turísticos situados sobre la obra (Figura 19).

**Figura 19** Obras costeras grises identificadas la zona: Centro



*Nota: Imagen Bing Satellite 2023*

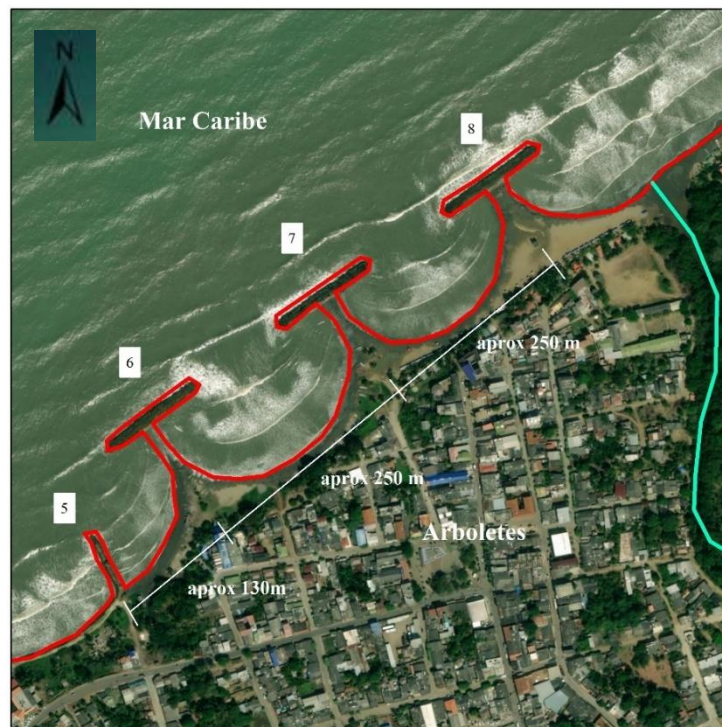
### **Sector: Playa principal**

5. Espolón (obra #5): Ubicado a unos 170 m de distancia de la obra #4, construido con tetrápodos, dispuesto de manera perpendicular a la línea de costa, con una longitud aproximada de 70 m. Esta obra se encuentra en la playa del barrio Pambelé.
6. Dique exento (obra #6): Situado a unos 130 m de distancia de la obra #5, construido con tetrápodos, dispuesto paralelamente a la línea de costa, con una longitud

aproximada de 110 m. Se identifica un camino de arena que conecta esta obra con la playa principal del municipio.

7. Dique exento (obra #7): Ubicado a unos 250 m de distancia de la obra #6, construido con tetrápodos, dispuesto paralelamente a la línea de costa, con una longitud aproximada de 110 m. Al igual que las anteriores, se observa un camino de arena que une la obra con la playa principal del municipio.
8. Dique exento (obra #8): Situado a unos 250 m de distancia de la obra #7, construido con tetrápodos, dispuesto paralelamente a la línea de costa, con una longitud aproximada de 110 m. Esta obra costera se encuentra justo a un costado de la desembocadura del río Volcán y al igual que las anteriores, se observa un camino de arena que conecta la obra con la playa principal del municipio (Figura 20).

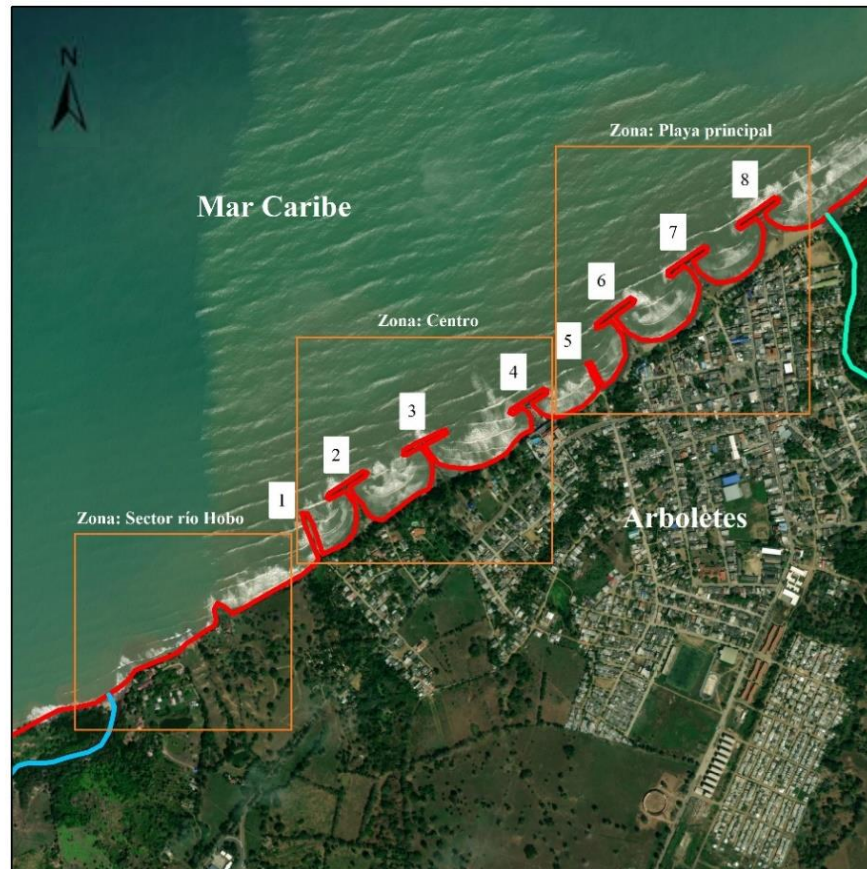
**Figura 20** Obras costeras grises identificadas la zona: Playa principal



*Nota: Imagen Bing Satellite 2023*

De manera general, la línea de costa del área de interés quedó delimitada como se muestra en la Figura 21.

**Figura 21** Identificación de obras costeras grises existentes



*Nota: Imagen Bing Satellite 2023*

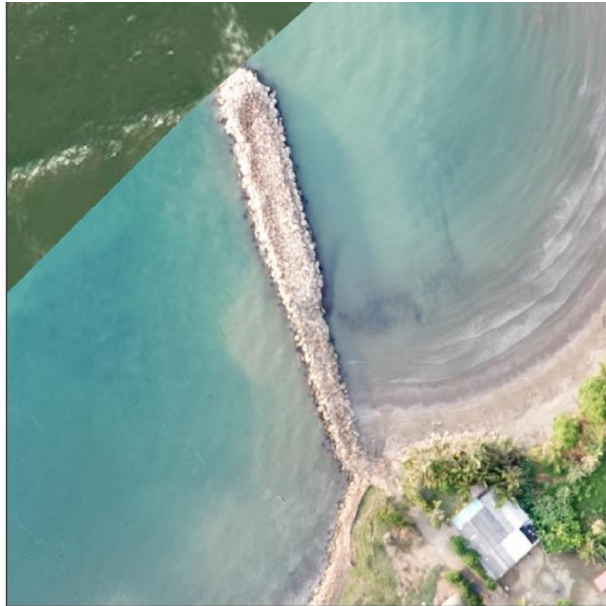
### **Verificación de las obras costeras grises existentes**

El día 11 de diciembre se realizó una salida de campo en el área de interés para verificar la presencia y el estado de las obras costeras grises identificadas previamente mediante la herramienta ArcBruTile. Durante la inspección en terreno, se confirmaron todas las obras descritas anteriormente. Además, se identificaron dos intervenciones con infraestructura verde basada en la naturaleza.

Por último, se verificó que las ocho obras costeras identificadas en las imágenes satelitales están presentes en el lugar y coinciden con las descripciones previas. A continuación, se confirma la presencia de cada una de las obras:

1. **Espolón (obra #1):** Confirmada en el terreno, con las características descritas y ubicada en el predio del barrio Campomar. Adicionalmente, en campo se identifica un enrocado al sur de este (Figura 22 y 23).

**Figura 22** Verificación existencia de obra #1



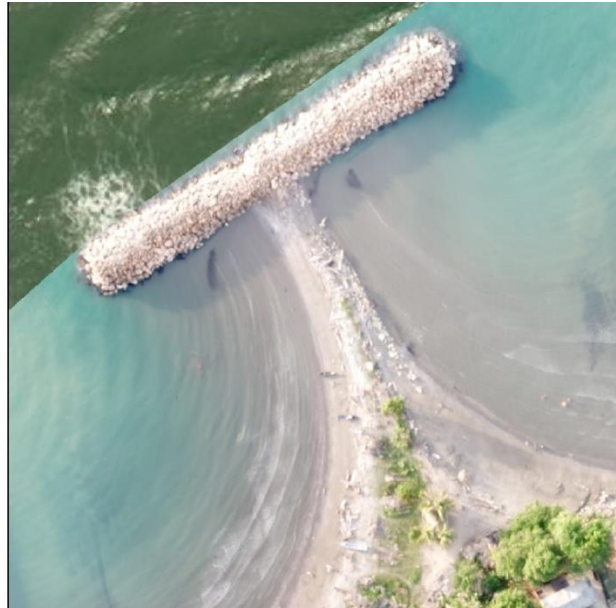
*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

**Figura 23** Foto en campo Obra #1



2. **Dique exento (obra #2):** Confirmada, con una longitud de aproximadamente 110 m, dispuesta de paralelamente a la línea de costa y con un camino de arena que conecta con la playa del barrio Campomar (Figura 24 y 25).

**Figura 24** Verificación existencia de obra #2



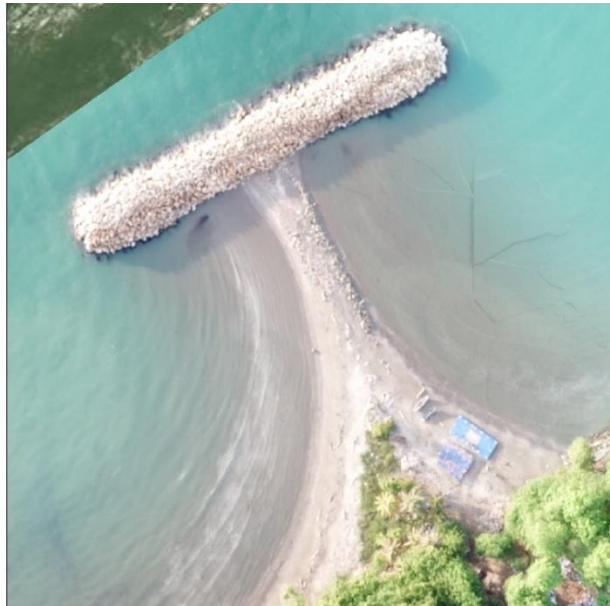
*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

**Figura 25** Foto en campo Obra #2



- 3. Dique exento (obra #3):** Confirmada, ubicada cerca del Hotel El Retiro y con las características descritas previamente (Figura 26 y 27).

*Figura 26 Verificación existencia de obra #3*



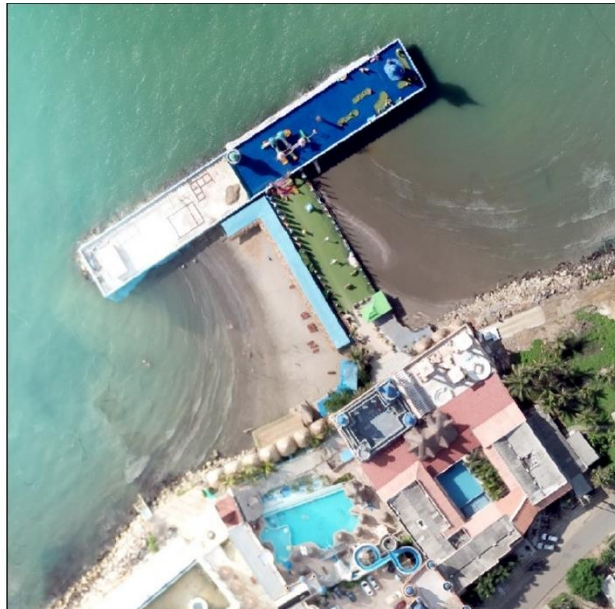
*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

*Figura 27 Foto en campo obra #3*



4. **Dique exento (obra #4):** Verificada, con el camino firme que conecta la obra con la playa del Hotel Riviera del Sol (Figura 28 y 29).

*Figura 28 Verificación existencia de obra #4*



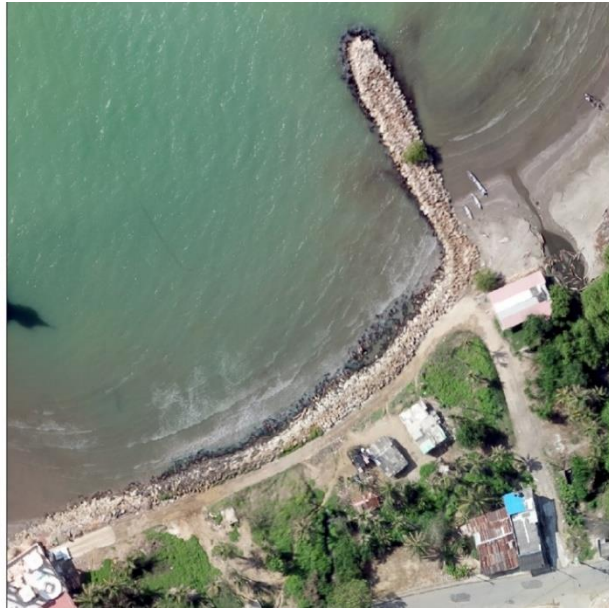
*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

*Figura 29 Foto en campo obra #4*



- 5. Espolón (obra #5):** Confirmada, ubicada en la playa del barrio Pambelé. En esta obra se identificó un refuerzo de la línea de costa con un enrrocado dispuesto en el límite océano – continente (Figura 30 y 31).

**Figura 30** Verificación existencia de obra #5



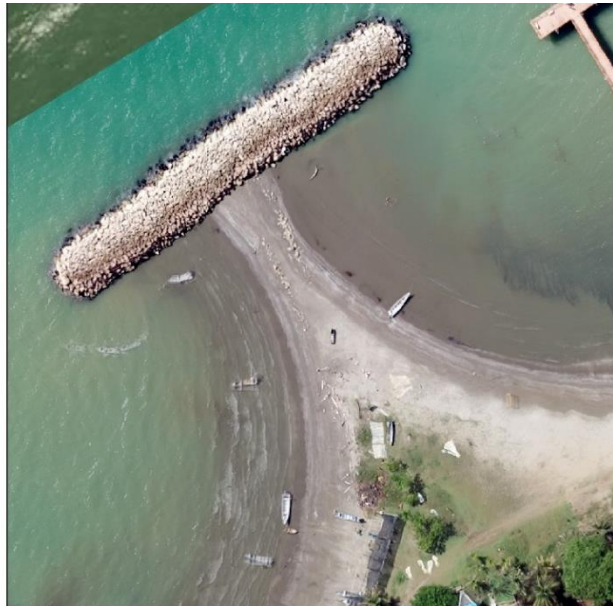
*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

**Figura 31** Foto en campo obra #5



- 6. Dique exento (obra #6):** Confirmada, con disposición paralela a la línea de costa y con el camino de arena hacia la playa principal (Figura 32 y 33).

*Figura 32 Verificación existencia de obra #6*



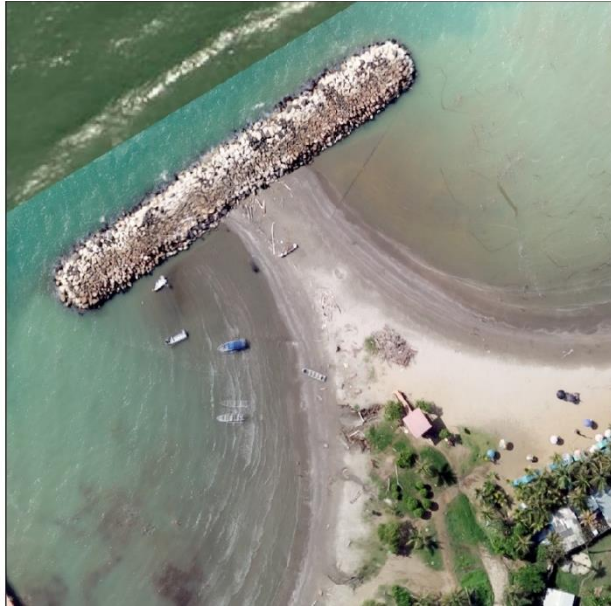
*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

*Figura 33 Foto en campo Obra #6*



- 7. Dique exento (obra #7):** Verificada en campo, con la misma orientación y longitud aproximada de 110 m (Figura 34 y 35).

**Figura 34** Verificación existencia de obra #7



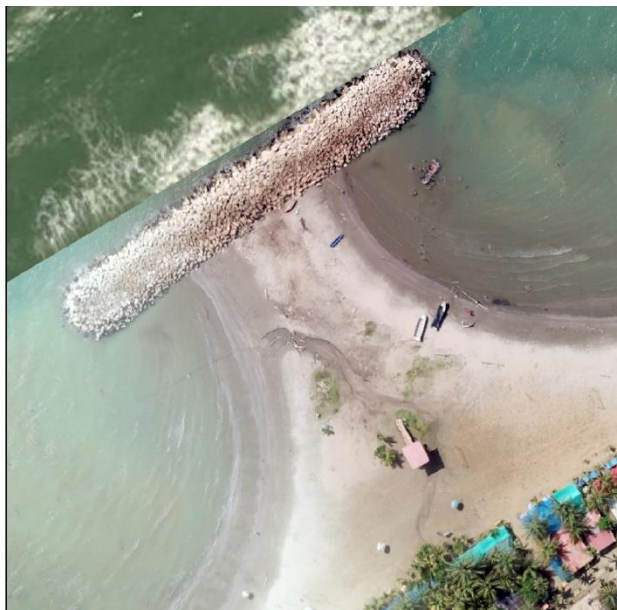
*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

**Figura 35** Foto en campo Obra #7



- 8. Dique exento (obra #8):** Confirmada, con el camino de arena que conecta con la playa principal del municipio y ubicada cerca de la desembocadura del río Volcán (Figura 36 y 37).

**Figura 36** Verificación existencia de obra #8



*Nota: Fuente: Ortofoto (Gobernación de Antioquia, 2023)*

**Figura 37** Foto en campo Obra #8



La verificación en campo de las obras costeras grises en el litoral de Arboletes ha permitido confirmar la existencia de las obras identificadas previamente a partir de la imagen satelital. Estas obras, principalmente espolones y diques exentos construidos con tetrápodos, fueron implementadas con el fin de mitigar la erosión costera y proteger la infraestructura urbana. Sin embargo, como se describe en el planteamiento del problema, estas soluciones grises han

impactado la dinámica natural del lugar, interrumpiendo la corriente de deriva litoral, lo que ha incrementado la erosión en las áreas adyacentes, donde ya no es posible el acceso al flujo de sedimentos que se transporta a través de dicha corriente. La identificación de estas estructuras muestra la alta concentración de obras en un espacio pequeño, lo que contribuye al diagnóstico actual de la situación y establece un punto de partida para el diseño de estrategias más adaptativas y respetuosas con el medio ambiente.

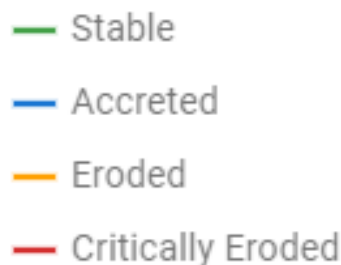
### ***Análisis del balance sedimentario***

Para el análisis del balance sedimentario se utilizó la herramienta CASSIE para evaluar los cambios en la línea de costa durante tres periodos:

- Del 21/10/1999 al 16/03/2001: periodo antes de la construcción de los diques exentos en la playa principal.
- Del 09/07/2008 al 30/12/2013: periodo inmediatamente posterior a la construcción de los diques exentos.
- Del 24/06/2020 al 06/11/2021: periodo un tiempo después de la construcción de las obras.

Las líneas presentadas en las imágenes correspondientes representan los transectos generados por la herramienta para analizar los cambios en la línea de costa. Los colores de cada transecto indican la magnitud de los cambios sedimentarios (Figura 38), interpretadas de la siguiente manera:

***Figura 38*** Escala de erosión de CASSIE



*Nota: Fuente:* (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024)

- Verde: Playa estable.
- Azul: Acreción (ganancia de sedimentos).
- Naranja: Erosión.
- Rojo: Erosión crítica.

A continuación, se presentan las imágenes correspondientes a los tres periodos analizados, con el fin de relacionar la construcción de las obras con la dinámica de erosión a lo largo de toda la línea de costa del área de interés.

### **Cambios observados entre el 21/10/1999 y el 12/02/2001**

Durante este periodo se analizaron doce imágenes satelitales tomadas en las fechas indicadas en la Figura 39. Los resultados de los transectos (Figura 40) muestran las siguientes tendencias:

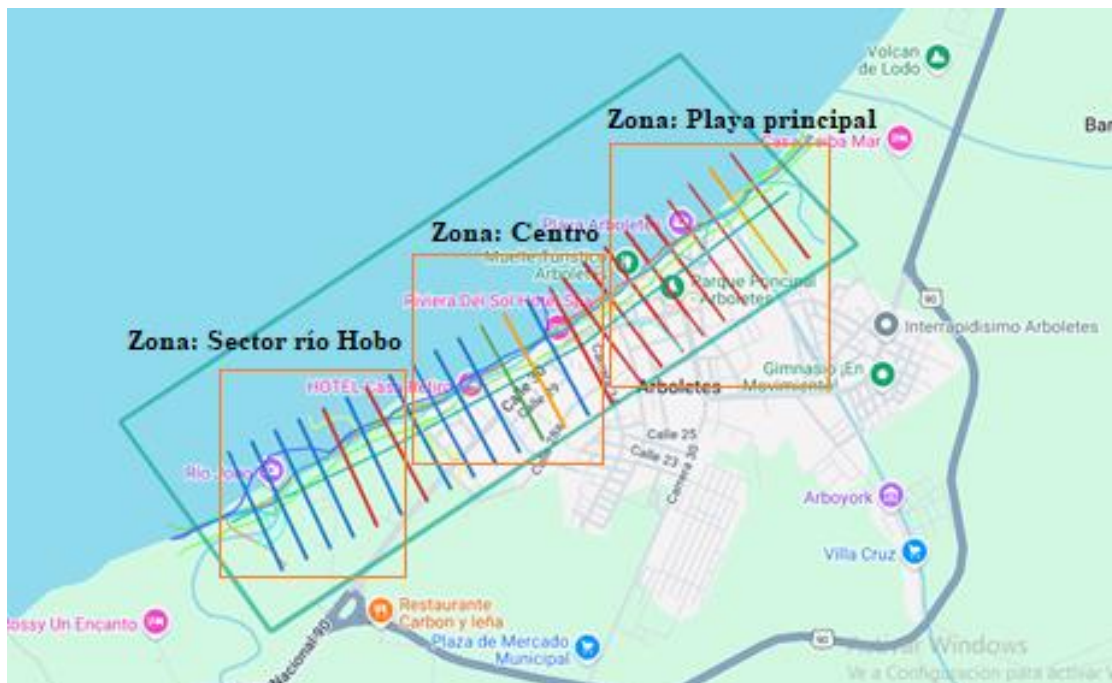
- Zona de río Hobo: Predominó la acreción, aunque se observan dos transectos con signos de erosión crítica localizada en dos transectos específicos.
- Zona central: Se identificó un transecto con acreción, algunos con estabilidad y otros con erosión y erosión crítica en límite con zona de playa principal.
- Zona de playa principal: Esta área presentó un mayor número de transectos con erosión y erosión crítica, indicando un alto grado de vulnerabilidad.

Estos resultados sugieren que la decisión de la empresa AquaTerra de construir los diques exentos en esta zona se basó en su condición de ser la más afectada por la erosión y en su importancia para el turismo local.

**Figura 39** Fechas de las imágenes disponibles y analizadas en el primer periodo

LT05 - 16/03/2001 15:04
LT05 - 12/02/2001 15:03
LT05 - 27/01/2001 15:03
LT05 - 26/12/2000 15:03
LT05 - 24/11/2000 15:03
LT05 - 23/10/2000 15:02
LT05 - 20/08/2000 15:01
LT05 - 03/07/2000 15:00
LT05 - 13/03/2000 14:57
LT05 - 09/01/2000 14:58
LT05 - 08/12/1999 14:59
LT05 - 21/10/1999 15:00

*Nota: Fuente:* (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024)

**Figura 40** Cambios en la línea de costa de 1999 a 2001

*Nota: Fuente:* (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024)

### Cambios observados entre el 09/07/2008 y el 30/12/2013

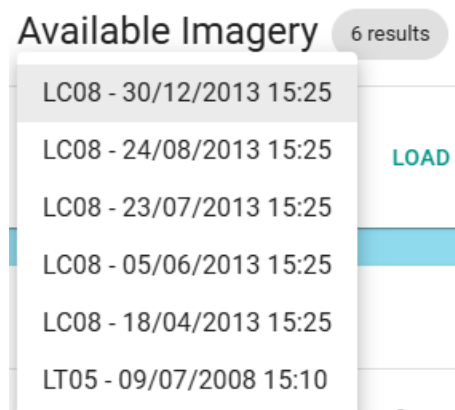
Durante este periodo se analizaron seis imágenes satelitales tomadas en las fechas indicadas en la Figura 41. Los resultados de los transectos (Figura 42) muestran las siguientes tendencias:

- Zona de río Hobo: Se observó un número reducido de transectos que indican erosión y erosión crítica. No obstante, aún se predominan transectos que muestran estabilidad y depósito de sedimentos, evidenciando un equilibrio general en esta área.
- Zona central: La acreción fue predominante, con un transectos que indican erosión crítica en el centro de esta zona. Se mejora la erosión crítica en límite con zona de playa principal.
- Zona de playa principal: En esta área, la estabilidad y la acreción dominaron de manera visible en este periodo, sugiriendo una recuperación importante de la playa.

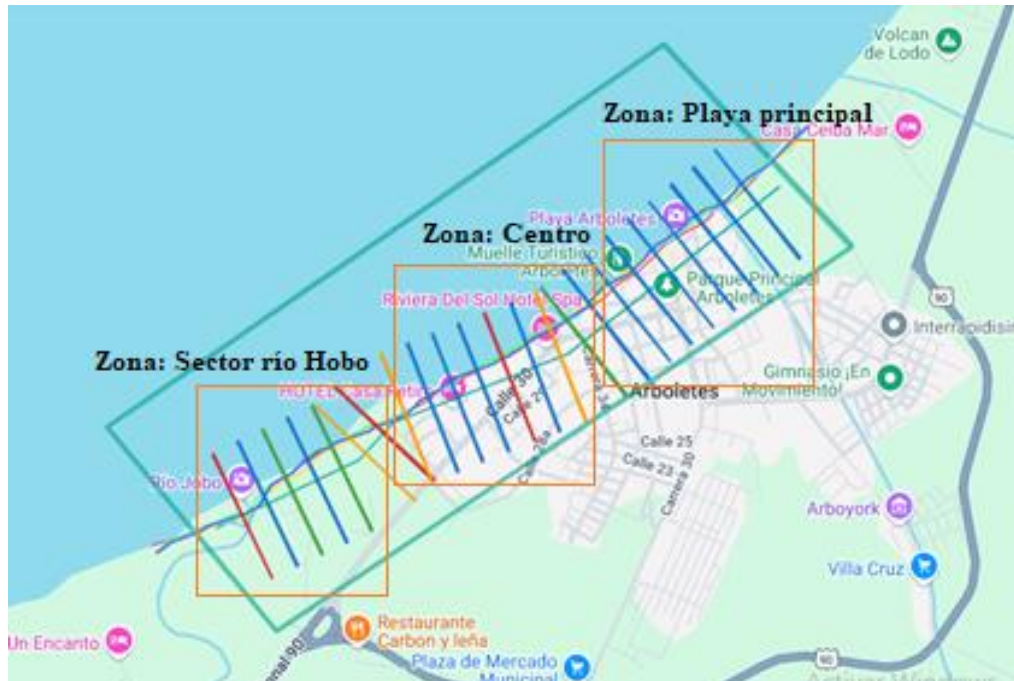
Estos resultados indican que las obras construidas comenzaron a tener un impacto positivo en la zona de intervención, promoviendo la estabilidad y reduciendo los efectos de la erosión.

Sin embargo, en la playa del Hotel Riviera del Sol, se identificó un transecto que muestra erosión. Este hallazgo sugiere que, como respuesta a esta situación, el hotel tomó la decisión de construir su propio tómbolo para proteger su playa y mitigar los efectos de la erosión.

**Figura 41** Fechas de las imágenes disponibles y analizadas en el segundo periodo



*Nota: Fuente:* (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024)

**Figura 42** Cambios en la línea de costa de 2008 a 2013

*Nota: Fuente:* (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024)

### **Cambios observados entre el 16/01/2020 y el 06/11/2021**

Durante este periodo se analizaron quince imágenes satelitales tomadas en las fechas indicadas en la Figura 43. Los resultados de los transectos (Figura 44) muestran las siguientes tendencias:

- Zona de río Hobo: Se observó un nuevo transecto que indica erosión crítica, evidenciando un aumento progresivo de la problemática en esta área.
- Zona central: Aunque se identificaron dos transectos con erosión crítica, la mayoría de los transectos muestran acreción en la playa, lo que indica un balance sedimentario positivo.
- Zona de playa principal: Predominan los transectos que indican acreción. Aunque se observaron algunos transectos con erosión crítica, de manera general, la playa creció durante este periodo.

Estos resultados sugieren que las obras construidas lograron un impacto positivo en la zona de intervención directa, promoviendo la acreción y reduciendo los efectos de la erosión.

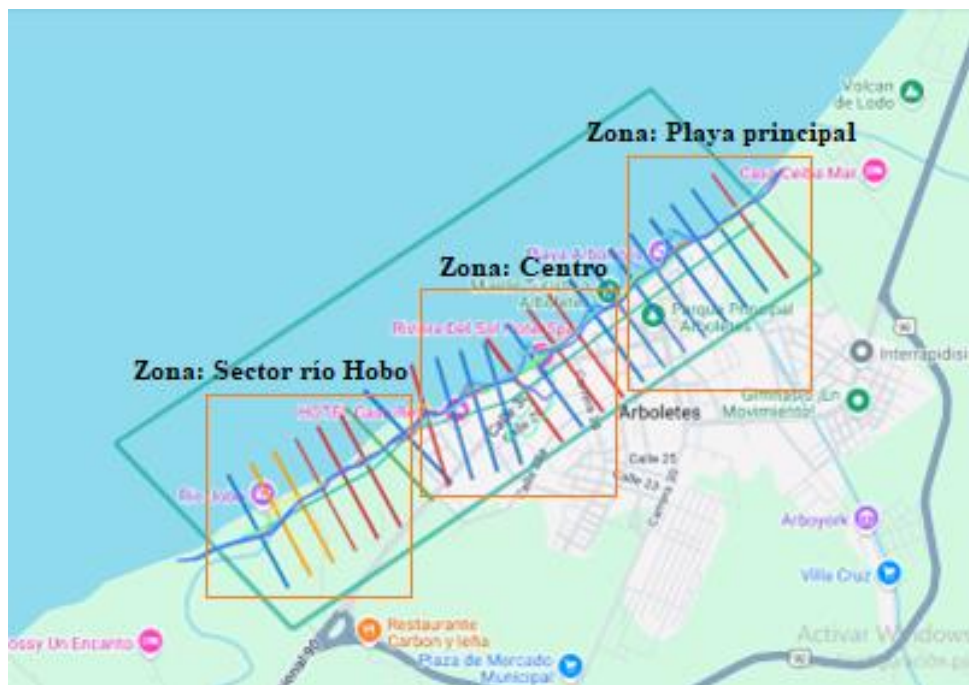
No obstante, se evidenció un aumento progresivo de los transectos con erosión crítica en la zona de río Hobo. Esto respalda la idea de que la construcción de obras costeras grises en la zona central y de la playa principal provocó un traslado de la problemática hacia esta área, teniendo en cuenta que la dinámica natural del transporte de sedimentos es de norte a sur en la región. La concentración de la erosión en el río Hobo, confirma la necesidad de considerar enfoques más integrales y sostenibles en el diseño de intervenciones costeras.

**Figura 43** Fechas de las imágenes disponibles y analizadas en el tercer periodo

LC09 - 06/11/2021 15:25	LC08 - 01/12/2020 15:24
LC08 - 05/01/2022 15:24	LC08 - 14/10/2020 15:24
LC08 - 17/10/2021 15:24	LC08 - 27/08/2020 15:24
LC08 - 23/03/2021 15:23	LC08 - 11/08/2020 15:23
LC08 - 19/02/2021 15:23	LC08 - 07/05/2020 15:23
LC08 - 03/02/2021 15:24	LC08 - 04/03/2020 15:23
LC08 - 02/01/2021 15:24	LC08 - 16/01/2020 15:24
LC08 - 17/12/2020 15:24	

*Nota: Fuente:* (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024)

**Figura 44** Cambios en la línea de costa de 2020 a 2021



*Nota: Fuente:* (Laboratorio de Oceanografía Costera, 2024)

El análisis del balance sedimentario realizado con la herramienta CASSIE permitió identificar cambios importantes en la dinámica sedimentaria de la línea de costa a lo largo de tres periodos clave, asociados con la construcción de obras costeras grises. Estos resultados ofrecen información para evaluar el impacto de las intervenciones humanas en el litoral, destacando tanto beneficios como efectos secundarios no deseados.

### **Impacto de las obras en la zona de playa principal**

La playa principal, que inicialmente presentaba un alto grado de vulnerabilidad con predominancia de erosión crítica y erosión generalizada (1999-2001), mostró una recuperación evidente en los periodos posteriores a la construcción de los diques exentos (2008-2013 y 2020-2021). Esta evolución positiva, reflejada en un aumento de la estabilidad y la acreción, respalda la efectividad de estas estructuras para proteger zonas costeras puntuales altamente impactadas. La mejora en esta área es consistente con su importancia para el turismo local, lo que justifica la intervención enfocada en estabilizar esta sección específica de la línea de costa.

### **Dinámica en la zona central**

En la zona central, los resultados muestran una evolución hacia un balance sedimentario positivo, particularmente en el periodo 2008-2013, donde la acreción predominó. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta estabilidad podría haberse logrado a costa de afectar otras áreas, debido a la interrupción del transporte de sedimentos causada por estas estructuras construidas. Aunque esta zona parece beneficiarse directamente de las obras, el análisis a largo plazo sugiere la necesidad de monitorear posibles efectos secundarios en zonas adyacentes.

### **Incremento de erosión en la zona de río Hobo**

Un aspecto crítico identificado es el deterioro progresivo en la zona de la desembocadura del río Hobo, especialmente durante el periodo 2020-2021, donde se observó un aumento importante de transectos con erosión crítica. Este fenómeno se alinea con la dinámica natural del

transporte de sedimentos en la región, de norte a sur, y evidencia un efecto colateral de las obras costeras grises construidas en la playa principal y la zona central. El traslado de la erosión hacia áreas no protegidas (sector río Hobo) destaca la necesidad de enfoques integrales que consideren las dinámicas costeras regionales en lugar de soluciones puntuales. La síntesis de estos resultados se ve consignada en la Tabla 5.

**Tabla 5** Síntesis de resultados del balance sedimentario

Período	Zona de río Hobo	Zona central	Zona de playa principal	Conclusión general
1999 – 2001	Predomina la acreción, erosión en pocos transectos	Predomina la estabilidad, pocos transectos con erosión	Predomina la erosión y erosión crítica	La playa principal es la más afectada por la erosión
2008 – 2013	Sigue predominando estabilidad y acreción, pocos transectos con erosión y erosión crítica	Predomina acreción, pocos transectos con erosión crítica	Dominan acreción y estabilidad, sugiriendo recuperación de playa	Las obras empiezan a tener un impacto positivo
2020 - 2021	Aumento de erosión y erosión crítica, destacando deterioro en esta zona	Predomina acreción, pocos transectos con erosión crítica	Acreción predomina, aunque algunos transectos con erosión crítica	Impacto positivo en playa principal debido a la construcción de obras costeras grises, pero traslado de la problemática por incremento de erosión crítica en la zona de río Hobo

### Recomendaciones para el manejo costero

Aunque las obras costeras grises han demostrado ser efectivas para mitigar la erosión en áreas críticas, su impacto a largo plazo puede ser perjudicial para otras zonas de la línea de costa. Esto refuerza la importancia de diseñar intervenciones que combinen soluciones grises y verdes para mitigar los impactos negativos del transporte sedimentario interrumpido.

Además, los resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de monitoreo continuo y adaptativo, especialmente en áreas como el río Hobo, que muestran signos de deterioro.

Esto permitiría ajustar las intervenciones y minimizar los efectos secundarios en el balance sedimentario.

En la zona de la playa principal y zona centro, se recomienda modificar las obras grises existentes para permitir el restablecimiento de la dinámica natural del transporte de sedimentos hacia el sur. Por su parte, en el sector río Hobo, se recomienda realizar intervenciones que no alteren la dinámica de los procesos costeros, con el fin de reducir la vulnerabilidad presente en esta zona.

### **7.3 Fase III. Estudio de alternativas para modificar las obras costeras grises existentes de obras grises a obras híbridas**

En la Fase III de la metodología, se abordaron tres procedimientos principales: la diferenciación entre obras costeras grises e infraestructuras verdes, el análisis de estudios de caso para identificar estrategias utilizadas en otras zonas costeras y la propuesta de modificación de las obras existentes. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las actividades realizadas en cada uno de estos procedimientos.




#### ***Diferenciación entre obras costeras grises e infraestructura verde costera***


Las obras grises son infraestructuras diseñadas por el ser humano para proteger las zonas costeras de fenómenos naturales como la erosión, las tormentas y otros eventos. Estas estructuras, construidas de forma perpendicular o paralela a la línea de costa (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021), incluyen elementos como muros de contención, espolones, diques exentos, entre otros. Se fabrican con materiales como concreto, acero y piedra, lo que les permite ofrecer una protección inmediata, especialmente en áreas con alto riesgo de erosión o frecuentes amenazas naturales (Tabla 6).

No obstante, las obras grises presentan limitaciones significativas, entre ellas:

- Impacto ambiental negativo, ya que alteran las dinámicas sedimentarias y los ecosistemas marinos.
- Costos elevados, debido al mantenimiento constante y las inversiones prolongadas necesarias para su operación.

**Tabla 6** Tipos de obras grises

Tipo	Definición	Factores para tener en cuenta	Ejemplo	Comentarios área de interés
Diques rompeolas	Barrera que se dispone de frente al oleaje. Tiene influencia sobre la morfodinámica del frente costero.	Nivel de protección alto y modifica mucho la costa adyacente.		No se identificaron intervenciones de este tipo en el área de interés.
Estructuras sumergidas	Se dispone para romper el oleaje y afecta los patrones de oleaje y corrientes. Tiene influencia sobre la morfodinámica del frente costero.	Nivel medio – alto. Requiere un estudio de los patrones de circulación y puede proporcionar beneficios como hábitat.		No se identificaron intervenciones de este tipo en el área de interés.
Diques exentos	Se dispone para afectar la rotura del oleaje y afecta los patrones de oleaje y corrientes. Tiene influencia sobre la morfodinámica del frente costero.	Nivel de protección medio – alto. Genera zonas de erosión y sedimentación.		Las intervenciones identificadas en la zona central y de playa principal, han contribuido al equilibrio de las playas de estos sectores, como se logró observar en el apartado anterior. En época seca, en la cual se presentan los oleajes de mayor energía, estas estructuras

					protegen las playas evitando la erosión
Espolones	Retiene el sedimento que se transporta con las corrientes Afecta los patrones de oleaje y corrientes	Nivel de protección medio – alto Impactos en costa adyacente por un desbalance sedimentario			Los espolones identificados en el área de interés interrumpen el libre transporte de sedimentos mediante la corriente de deriva, generando depósito al norte de estos y erosión al sur de estos

*Nota: Fuente: (Reguero, Beck, Losada, & Narayan, 2017)*

Por otro lado, con el propósito de generar un cambio de enfoque debido a los impactos que generas las obras grises, se han venido incorporando soluciones verdes que no tratan de ir en contra de la naturaleza, sino que intenta sacar provecho de ella para obtener resultados más eficaces. Las infraestructuras verdes emplean soluciones basadas en la naturaleza, promoviendo el uso y la restauración de ecosistemas costeros como manglares, dunas, pastos marinos (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021). Estas soluciones ofrecen beneficios adicionales al proteger contra la erosión, fomentar la biodiversidad y mejorar el balance sedimentario (Tabla 7).

Las principales ventajas de las infraestructuras verdes son:

- Sostenibilidad a largo plazo, al trabajar en armonía con los procesos naturales del medio ambiente.
- Capacidad de adaptación, al ajustarse a las dinámicas naturales de la costa.

Sin embargo, su efectividad requiere un periodo de tiempo considerable para establecerse, lo que puede limitar su aplicación en situaciones urgentes.

**Tabla 7** Tipos de obras verdes

Tipo	Definición	Ejemplos	Posible contribución al litoral de interés
Recuperación de la naturaleza	Conservación y restauración de los hábitats y pueden ir acompañadas de otras medidas para aumentar la salud ecológica y la resiliencia de los ecosistemas	<p>Restauración de dunas costeras</p>  <p>Fuente: (ALLIANCE MEXICO, 2025)</p>	Protección natural actúa como barrera, habitat de diferentes especies de flora y fauna, con vegetación ayuda a fijar los sedimentos para evitar que sean desplazados, etc. Este tipo de obra verde se podría implementar en las tres zonas: sector río Hobo, centro y playa principal
Ecosistemas ingenierizados	Rehabilitación de los ecosistemas para recuperar servicios críticos sin llegar al nivel de complejidad de los sistemas naturales	<p>Acciones para permitir ventanas de oportunidad para la recuperación de la flora y la fauna</p>  <p>Fuente: (esentia, 2025)</p>	La siembra de diferentes especies nativas y que soporten las condiciones naturales como la temperatura y la salinidad, ayudan a la recuperación del sistema natural. Este tipo de obra verde se podría implementar en el costado izquierdo de la zona: sector río Hobo, ya que allí se encuentra un parche de manglar que podría reforzarse
Ingeniería ecológicamente mejorada	Las medidas tradicionales de ingeniería gris y verde se modifican para cambiar los procesos físicos, quizás produciendo indirectamente ciertos beneficios a partir de los procesos naturales que se mantienen o adaptan imitando los ecosistemas naturales	<p>Realimentación de playas, arrecifes de coral artificiales</p>  <p>Fuente: (Silva, y otros, 2019)</p>	Las acciones de ingeniería con complementos que contribuyan al aporte del buen funcionamiento del sistema, contribuyen a la dinámica natural ya que actúan de manera similar a este. Este tipo de acción verde se podría implementar en las zonas: centro y playa principal, ya que allí es donde se identifican obras grises existentes

Des-ingeniería/ reubicación	Implica la eliminación de obras costeras duras o blandas para recuperar el sistema y avanzar hacia un funcionamiento más natural	Eliminación de obras costeras, retirada de infraestructura turística como negocios y restaurantes 	La eliminación de obras contribuye a la recuperación de la dinámica natural del sistema, esto fomenta un sistema natural. Este tipo de acción verde se podría implementar en las zonas: centro y playa principal, ya que allí es donde se identifican obras grises existentes
--------------------------------	--	---	---

Fuente: (Caracol Radio, 2025)

*Nota: Fuente: (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021)*

Ambos enfoques son diseñados por el hombre y comparten el objetivo de proteger las costas, pero difieren en sus métodos, impactos y beneficios. Mientras las obras grises actúan de manera rápida y directa, las infraestructuras verdes ofrecen una protección más natural y resiliente, aunque su implementación requiere más tiempo.

### **Alternativas híbridas**

Las alternativas híbridas combinan características de las obras grises y las infraestructuras verdes, integrando diferentes niveles de naturalidad en su diseño. Estas soluciones permiten aprovechar lo mejor de ambos enfoques, adaptándose a las necesidades específicas en cada contexto.

En los sistemas naturales, no todos los elementos funcionan de manera flexibles: algunos, como los acantilados, son rígidos, mientras que otros, como las playas, son más flexibles. Dependiendo de los beneficios que aporte, las infraestructuras pueden clasificarse como grises o verdes (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021).

Las soluciones híbridas, al combinar estos dos enfoques, representan una oportunidad para optimizar la protección costera, minimizando los impactos ambientales y maximizando la resiliencia a largo plazo.

### *Análisis de estudios de caso para identificar estrategias usadas en otras zonas costeras*

Como parte de la metodología propuesta, se realizó un análisis de estudios de caso de estrategias híbridas aplicadas en diferentes regiones del mundo. Este análisis incluyó intervenciones costeras que combinan obras grises con infraestructuras verdes. A continuación, se detallan los casos seleccionados:

#### **Arrecifes artificiales en Puerto Morelos, México (Silva, y otros, 2019)**

En Puerto Morelos, México, se implementó un programa de restauración costera con el objetivo de mitigar la erosión causada por desequilibrios hidro-sedimentarios derivados de actividades humanas y fenómenos extremos como huracanes. Este proyecto híbrido se desarrolló en tres fases principales:

- Construcción de arrecifes artificiales: En las primeras dos fases (2008-2012), se instalaron dos estructuras de arrecifes artificiales diseñadas para imitar las funciones protectoras de los arrecifes naturales, disipando la energía del oleaje y promoviendo la regeneración de hábitats marinos.
- Restauración de dunas costeras: En 2016, se llevaron a cabo acciones para restaurar dunas en la playa adyacente, aumentando la resiliencia del sistema costero frente a eventos extremos y reforzando la capacidad de acumulación de sedimentos.
- Monitoreo y participación comunitaria: Se implementaron programas de monitoreo continuo con la participación de expertos y la comunidad local, lo que permitió realizar ajustes adaptativos y generar beneficios socioeconómicos, como el uso turístico de las playas restauradas.

Este caso evidencia cómo las soluciones híbridas pueden proporcionar múltiples beneficios al combinar las funciones de obras grises con los servicios ecosistémicos de obras verdes que incluyen soluciones basadas en la naturaleza. Adicionalmente, refuerza la importancia de integrar el monitoreo constante y la participación comunitaria para garantizar la sostenibilidad de las intervenciones.

### **Experimento de hincamiento de troncos en el litoral de Antioquia**

En marco de PIMECLA, la Universidad de Antioquia ha realizado un experimento en diferentes zonas del litoral antioqueño, siguiendo la metodología propuesta por (Winterwerp, y otros, 2020). Este experimento consistió en construir una barrera mediante el hinchamiento de troncos en la zona de incidencia de las olas, con el fin de disipar su energía y generar una zona de depósitos detrás de la barrera. El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio Costero y en otras playas del departamento, donde se obtuvieron resultados prometedores para fomentar el depósito de sedimentos sin alterar su transporte natural (Gobernación de Antioquia, 2022).

### **Perfilamiento de talud en Arboletes, Antioquia (Gobernación de Antioquia, 2021)**

Realizada en el Laboratorio Costero de la Universidad de Antioquia en 2021, esta intervención consistió en el perfilamiento del talud que conforma la línea de costa en dicho lugar. El objetivo principal fue modificar la forma en que las olas inciden sobre la base del talud, con el fin de evitar la formación de socavamientos que favorezcan la erosión. La intervención incluyó el refuerzo de la parte baja del talud con rocas que disipan la energía del oleaje, la siembra de *Brachiaria Decumbens* para estabilizar el terreno y la instalación de un filtro en la corona del talud, con el propósito de captar las aguas de escorrentía de lluvias antes de que estas ingresaran al talud intervenido, evitando así la formación de cárcavas que también contribuyen a la erosión. Además, se identificó una réplica de este experimento en la zona más cercana a la desembocadura del río Hobo, donde se realizó el mismo procedimiento, pero sin la construcción del filtro. Esta intervención ha sido monitoreada constantemente y no se ha registrado retroceso en la corona del talud. Por lo tanto, es muy probable que esta metodología pueda ser aplicada en zonas con condiciones similares para mitigar el impacto de la erosión costera (Gobernación de Antioquia, 2021) (Gobernación de Antioquia, 2023). Esta obra es un ejemplo de “ingeniería ecológicamente mejorada”, ya que se realizó una rehabilitación del ecosistema para abordar el problema sin alterar la dinámica natural del transporte de sedimentos.

### **Rehabilitación de manglares en Mayakoba, México (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021)**

En el desarrollo turístico de Mayakoba, en el Caribe mexicano, se implementó una intervención para restaurar manglares afectados por el desarrollo turístico no planificado. La estrategia consistió en la creación de un sistema de canales artificiales que restauró los flujos de agua superficial y subterránea, rehabilitando el manglar y aumentando su valor ecológico y turístico. Este proyecto es un ejemplo de “ecosistema ingenierizado” (ver Tabla 6), donde las soluciones verdes se integraron con enfoques de ingeniería para restablecer funciones ecosistémicas y velar por la sostenibilidad a largo plazo.

### **Un caso híbrido: acciones de ingeniería ecológicamente mejorada en la playa North Reach, Florida (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021)**

En North Reach, Florida, se adoptaron soluciones híbridas para abordar la erosión costera crónica causada por alteraciones en el transporte de sedimentos debido a la construcción del puerto de Puerto Cañaveral. Las intervenciones incluyeron alimentación artificial de la playa y transferencia de sedimentos para compensar la pérdida de arena. Aunque estas medidas estabilizaron parcialmente la playa, el fenómeno de erosión persiste, lo que muestra la necesidad de estrategias adaptativas a largo plazo. Este caso es un ejemplo de aplicación de ingeniería ecológicamente mejorada (ver Tabla 6) para mantener la funcionalidad del ecosistema y proteger los intereses humanos.

El análisis de estos casos muestra la versatilidad de las estrategias híbridas para abordar los retos asociados a la erosión costera y el desequilibrio sedimentario. Cada intervención se adaptó a las características locales, combinando obras grises con infraestructuras verdes basadas en la naturaleza para maximizar los beneficios tanto para los ecosistemas como para las personas que forman la comunidad.

Se destaca la importancia del monitoreo continuo y la participación comunitaria, que permiten ajustar las intervenciones y aumentar la probabilidad de lograr su sostenibilidad. Asimismo, los casos de Mayakoba y Blackwater muestran cómo las acciones iniciales pueden abrir

camino a soluciones más naturales y de largo plazo. Sin embargo, el caso de North Reach muestra las limitaciones de las soluciones híbridas si no se abordan las causas subyacentes, como las alteraciones en el transporte de sedimentos.

Estos ejemplos muestran la viabilidad de aplicar soluciones híbridas en el litoral de Arboletes, integrando estrategias adaptadas a su geomorfología y contexto social. Además, refuerzan la necesidad de adoptar un enfoque integral de manejo costero que combine la restauración ecológica, la mitigación de riesgos y la promoción de beneficios socioeconómicos.

### ***Propuesta de modificación de las obras existentes***

La presente propuesta tiene como objetivo transformar las obras costeras grises existentes en el litoral de Arboletes en un sistema híbrido, integrando infraestructuras verdes que restauren el equilibrio sedimentario y favorezcan la sostenibilidad ecológica. Basados en el estudio de (Chávez, Lithgow, Losada, & Silva, 2021) (Tabla 7) se han identificado acciones que permiten modificar las características de las obras grises actuales y complementarlas con soluciones verdes basadas en la naturaleza. A continuación, se detallan las propuestas para cada sector identificado.

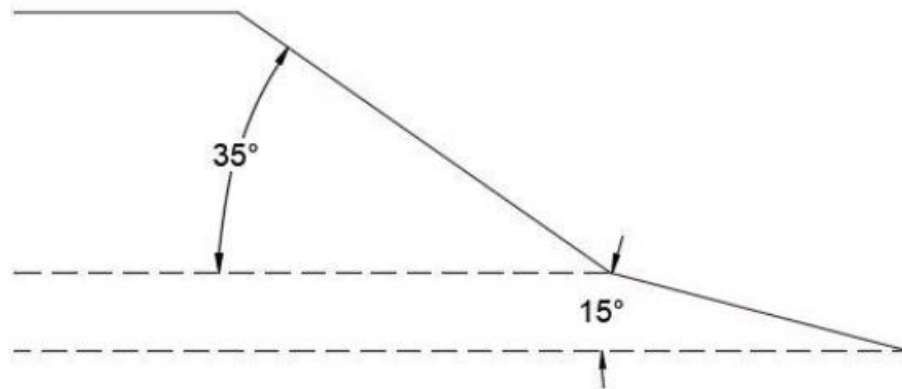
#### **Propuestas para sector río Hobo**

En este sector no se han identificado obras grises existentes. Por lo tanto, se propone implementar una intervención de infraestructura verde que no altere la dinámica natural de los procesos costeros. La intervención incluirá las siguientes acciones:

##### ***1. Perfilado del talud costero:***

Siguiendo el perfil implementado en el Laboratorio Costero de la Universidad de Antioquia, se propone realizar un corte de todo el talud que conforma la línea de costa de esta zona, siguiendo los mismos ángulos ya implementados (Figura 45, Figura 46). Para ello, se utilizará un topógrafo y un operador de retroexcavadora, con la disposición del material extraído en áreas locales para su aprovechamiento por parte de la comunidad, lo que podría significar un impacto social positivo.

**Figura 45** Representación gráfica del corte del talud. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2022)



**Figura 46** Resultado esperado corte del talud. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2021)



## **2. Refuerzo de la base del talud:**

Luego del perfilado, se sugiere reforzar la parte baja del talud, que está directamente expuesta a las condiciones del mar. Para ello se empleará la técnica de hincado de troncos en tres hileras, como se ha utilizado en estudios previos. El proceso consistirá en enterrar troncos en la playa (Figura 47) utilizando una motobomba para expulsar agua del mar a presión y enterrar los troncos tomados de la playa en el lugar deseado.

**Figura 47** Resultado esperado hincado de troncos. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2023)



### **3. Siembra de vegetación:**

Una vez realizado el corte y refuerzo, se propone sembrar pasto *Brachiaria Decumbens* sobre el talud para consolidar el terreno con las raíces de este y reducir la erosión (Figura 48).

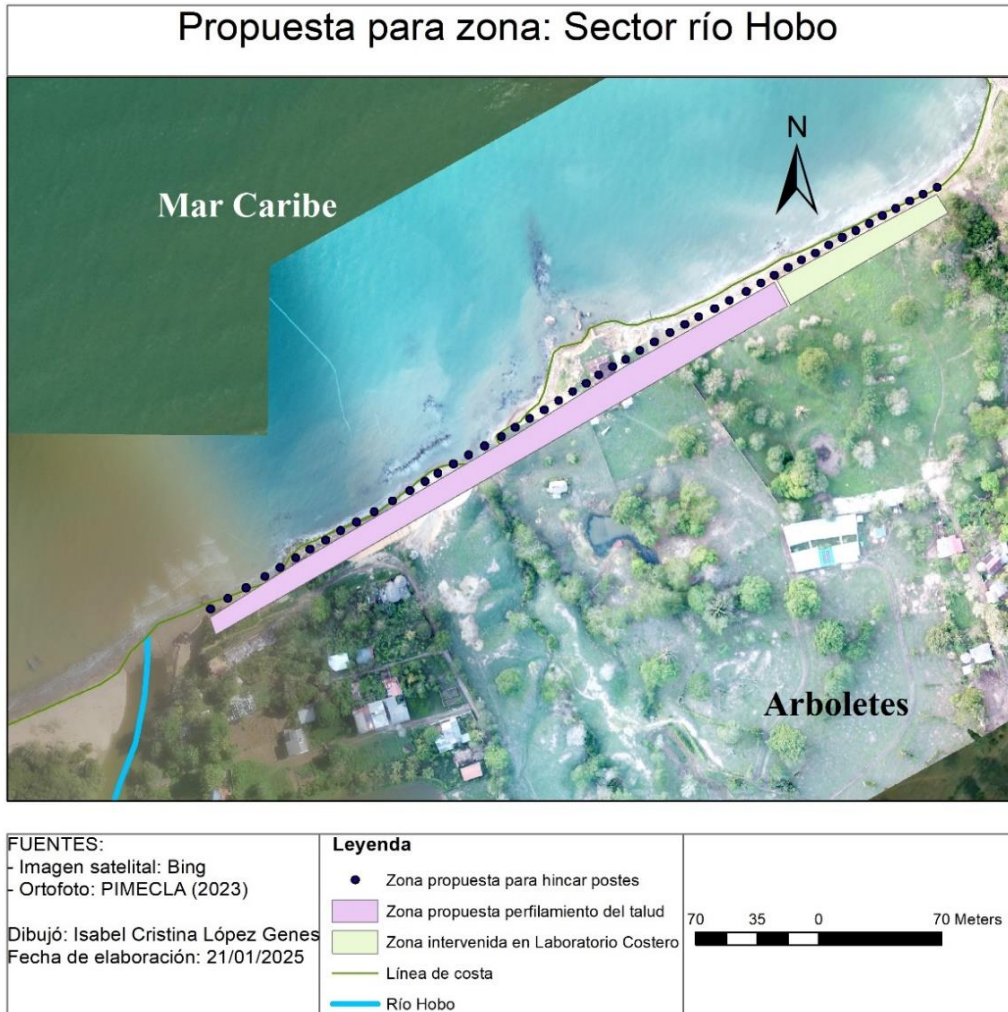
**Figura 48** Resultado esperado siembra de pasto. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2021)

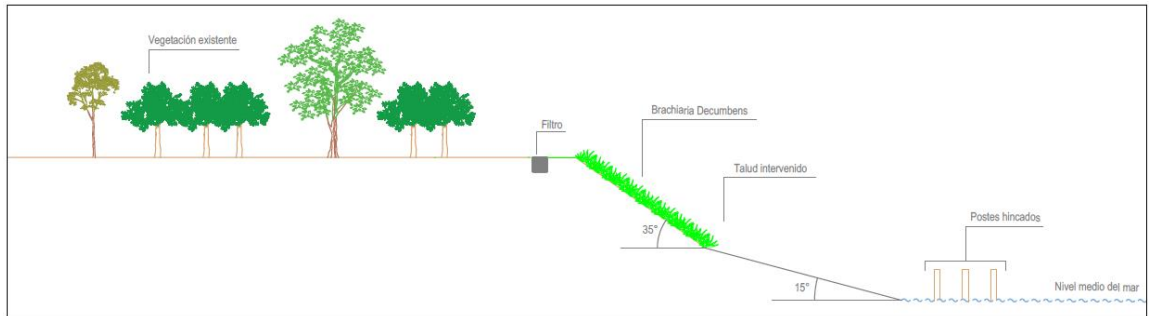


**4. Instalación de un filtro para escorrentía:**

Finalmente, se plantea la construcción de un filtro a 4 m de la corona del talud, con un diseño que permita la captación rápida de aguas de escorrentía y la posterior evacuación del agua a través de un sistema especial.

**Figura 49** Vista en planta de propuesta en sector río Hobo

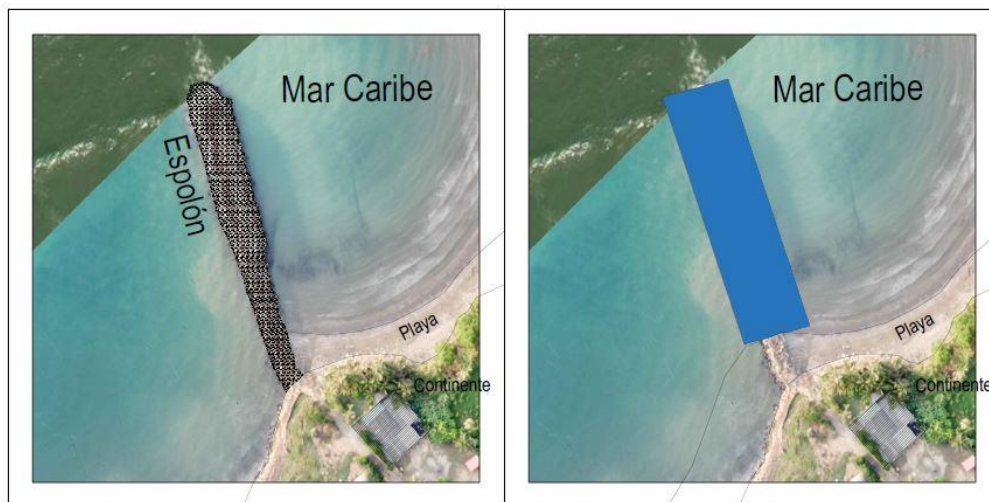


**Figura 50** Vista en perfil de propuesta en sector río Hobo

### Propuestas para zona centro

#### 1. Des ingeniería/reubicación: Eliminación del espolón (obra #1):

Se propone retirar completamente la obra #1 (Figura 51), ya que este tipo de estructuras interrumpen el transporte natural de sedimentos y afectan negativamente la dinámica litoral. La eliminación se llevará a cabo con maquinaria retroexcavadora y la disposición del material extraído en un sitio adecuado.

**Figura 51** Propuesta Obra #1. Izquierda: Antes, derecha: Después

#### 2. Des ingeniería/reubicación: Retiro de caminos de acceso en las obras #2 y #3:

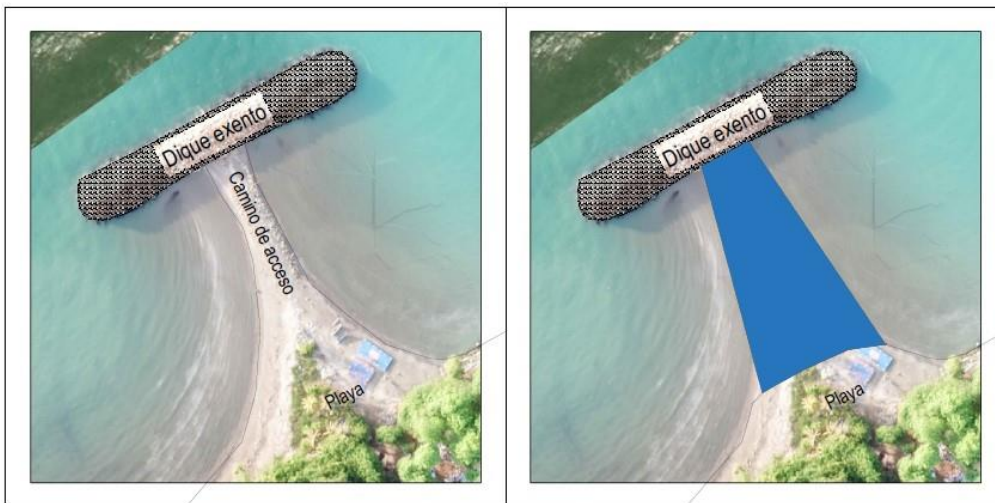
Con el fin de evitar la formación de nuevas barreras que alteren la corriente de deriva, se propone eliminar los caminos de acceso a las partes externas de las obras #2 y #3 (Figura 52, Figura

53). Solo se mantendrán los diques exentos directamente expuestos al oleaje, favoreciendo el libre transporte de sedimentos. En total se eliminará un camino de aproximadamente 100 m de longitud en la obra #2 y de aproximadamente 90 m en la obra #3.

**Figura 52** Propuesta Obra #2. Izquierda: Antes, derecha: Después



**Figura 53** Propuesta Obra #3. Izquierda: Antes, derecha: Después



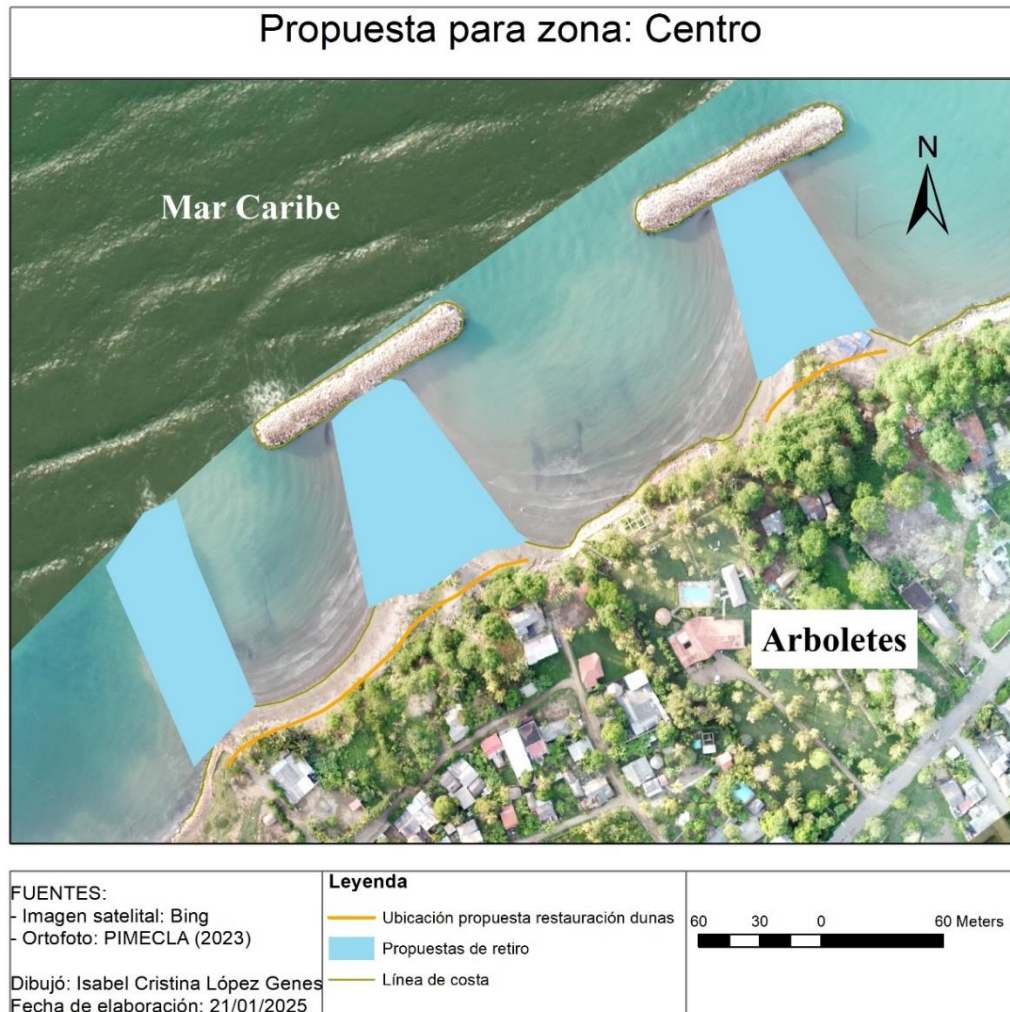
### 3. Recuperación de la naturaleza: Restauración de dunas costeras:

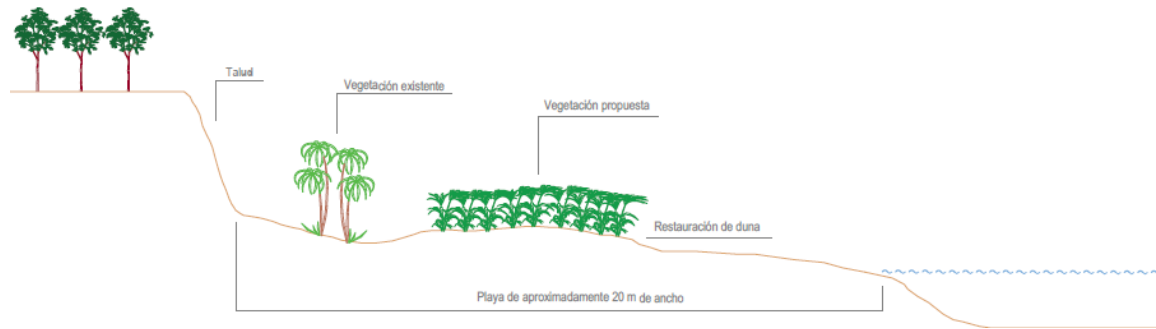
Se propone la restauración de las dunas en las zonas centro para regular la dinámica de los sedimentos y proteger la costa de la erosión. El proceso incluiría la colocación de sedimentos similares a los de la playa natural en costales apilados y luego de consolidar la forma de las dunas

propuestas, es importante que se pueda mantener esta forma a lo largo del tiempo, por lo cual se propone la siembra de arbustos que estabilicen las dunas y mejoren la biodiversidad local.

La propuesta final para esta zona se muestra a continuación.

**Figura 54** Vista en planta de propuesta en zona centro



**Figura 55** Vista en perfil de propuesta en zona centro

La obra 4 no se incluye en esta propuesta porque es propiedad privada del Hotel Riviera del Sol, el cual utiliza el camino de acceso con fines turísticos y también utiliza la altura del dique, para ubicar estructuras de diversión y esparcimiento.

### Propuestas para la zona playa principal

#### 1. *Des ingeniería/reubicación: Retiro completo de la obra #5: espolón:*

Similar a la zona centro, se propone la eliminación total de la obra #5 (Figura 56), ya que esta estructura interfiere con el transporte natural de los sedimentos. Se utilizará máquina retroexcavadora para retirar el material y se debe realizar una disposición adecuada del mismo.

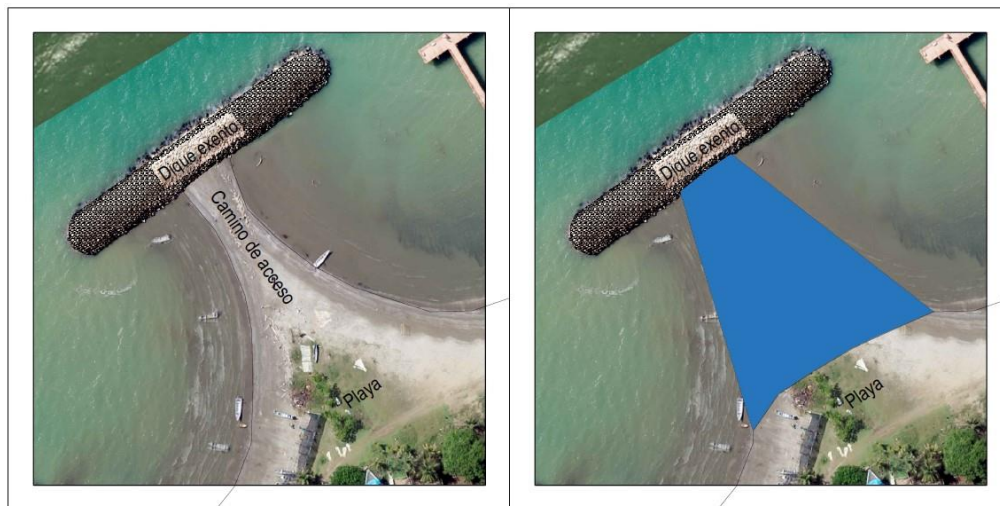
**Figura 56** Propuesta Obra #5. Izquierda: Antes, derecha: Después

En esta obra se propone dejar in situ el enrocado que se encuentra sobre el costado sur de la obra, pues este protege el litoral y no altera el transporte de sedimentos.

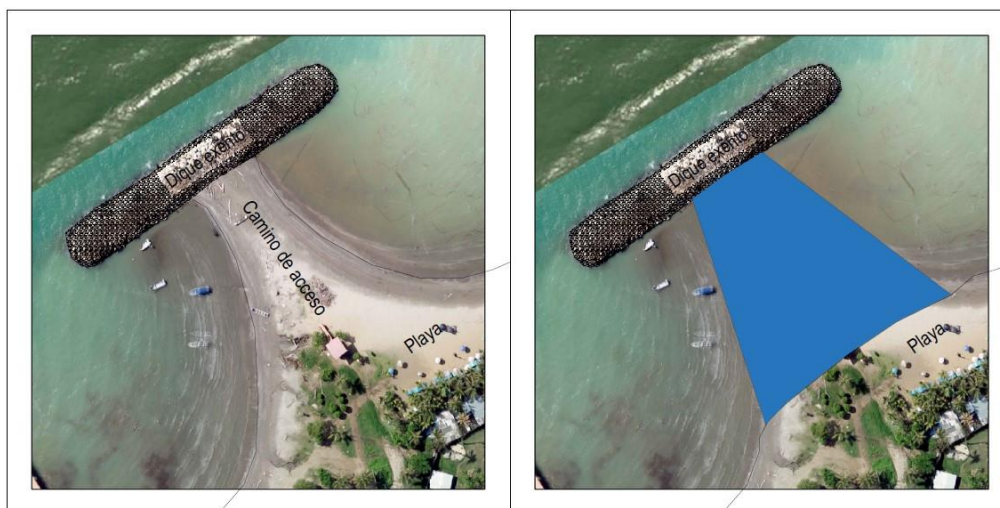
**2. Des ingeniería/reubicación: Retiro del camino de acceso en las obras #6, #7 y #8:**

Se propone retirar los caminos de acceso a la parte externa de los diques exentos en las obras #6, #7 y #8 (Figuras 57, Figura 58, Figura 59), permitiendo la libre circulación de sedimentos.

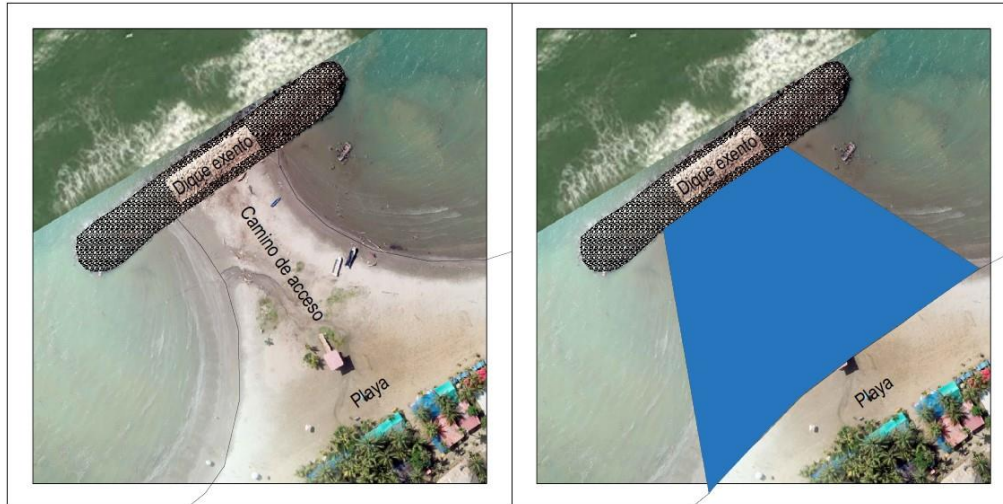
**Figura 57** Propuesta Obra #6. Izquierda: Antes, derecha: Después



**Figura 58** Propuesta Obra #7. Izquierda: Antes, derecha: Después



**Figura 59** Propuesta Obra #8. Izquierda: Antes, derecha: Después



### **3. Recuperación de la naturaleza: Restauración de dunas costeras:**

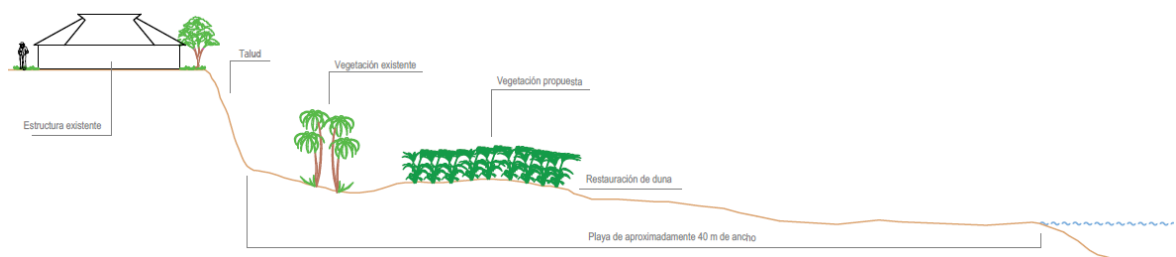
Se propone la restauración de las dunas en la zona playa principal para regular la dinámica de los sedimentos y proteger la costa de la erosión. El proceso incluiría la colocación de sedimentos similares a los de la playa natural en costales apilados y luego de consolidar la forma de las dunas propuestas, es importante que se pueda mantener esta forma a lo largo del tiempo, por lo cual se propone la siembra de arbustos que estabilicen las dunas y mejoren la biodiversidad local.

La propuesta final para esta zona se representa a continuación:

**Figura 60** Vista en planta de propuesta en zona playa principal



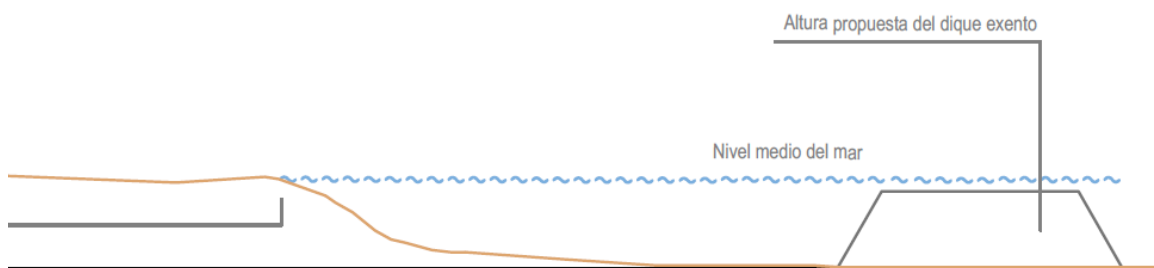
**Figura 61** Vista en perfil de propuesta en zona playa principal



### **Ecosistemas ingenierizados: Reducción de la altura de los diques exentos:**

Se sugiere reducir la altura de los diques exentos en las obras #2, #3, #6, #7 y #8 para evitar la formación de nuevos depósitos de sedimentos y al mismo tiempo, mantener la función de protección de la zona (Figura 62).

**Figura 62** Propuesta reducción de altura de los diques exentos



Estas modificaciones propuestas están orientadas a restaurar los procesos dinámicos naturales de la zona costera, garantizando una mayor sostenibilidad y el mantenimiento y recuperación de los ecosistemas costeros.

La propuesta presentada en este trabajo muestra la importancia de integrar soluciones híbridas, que combinan lo mejor de las obras grises con las infraestructuras verdes, como una alternativa viable para la protección costera sostenible. Al comparar ambos enfoques, se evidencian las ventajas y limitaciones de cada uno, subrayando la necesidad de adaptarlos a las características específicas de cada zona costera.

El análisis de estudios de caso demuestra que las soluciones híbridas no solo protegen las costas, sino que también promueven la regeneración de los ecosistemas marinos y costeros, contribuyendo a la mejora de la resiliencia a largo plazo. Las modificaciones propuestas para el litoral de interés, como la eliminación de espolones, la restauración de los procesos naturales de sedimentación, la restauración de dunas costeras y la modificación de los diques exentos, buscan restaurar la dinámica natural de la costa, sin dejar de proteger las zonas de intervención y buscando minimizar los impactos negativos sobre zonas adyacentes y sobre el medio ambiente.

Si bien la implementación de estas soluciones híbridas requiere un proceso de modelación previa, adaptación y monitoreo continuo para evaluar su efectividad, los beneficios en términos de sostenibilidad, biodiversidad y reducción de costos a largo plazo son considerables. Además, la integración de estas estrategias permitirá que las intervenciones sean más resilientes ante fenómenos climáticos extremos y otras amenazas naturales, favoreciendo la estabilidad ecológica y social de la región.

## 8. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten plantear las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- La geomorfología del litoral de Arboletes: Los procesos naturales, como el oleaje, las corrientes de deriva y las mareas, son los principales factores que interactúan para moldear la línea de costa. La descripción de estos procesos indicó que las unidades geomorfológicas predominantes en el litoral de interés son los acantilados y playas. Además, se identificó que la dirección y magnitud de oleaje varían según la época climática, mientras que la corriente de deriva presenta una dirección predominante de norte a sur. Estos factores son determinantes para entender la vulnerabilidad del litoral frente a la erosión costera.
- Balance sedimentario y efectos de las obras grises existentes: Se identificaron y se verificaron ocho obras costeras grises en el litoral de interés. La construcción de estas obras ha causado cambios en el balance sedimentario. Aunque estas estructuras han promovido la acreción en ciertas áreas inicialmente críticas, como la playa principal, también han generado erosión en zonas adyacentes, como la zona de la desembocadura del río Hobo. Esto evidencia que las obras grises, si bien pueden ofrecer soluciones localizadas, tienden a desplazar los problemas de erosión hacia otras áreas vulnerables, lo que resalta la necesidad de estrategias de manejo más integrales y sostenibles.
- Impacto de los diques exentos: La construcción de los diques exentos ha tenido un impacto positivo en las áreas directamente protegidas, promoviendo estabilidad y recuperación en la playa principal y la zona central. Sin embargo, los efectos negativos observado en zonas adyacentes, como la zona del río Hobo, evidencian la importancia de considerar enfoques de manejo costero más sostenibles y de mayor alcance, para evitar la transferencia de problemas de erosión a otras zonas vulnerables. Estos hallazgos constituyen una base para futuras investigaciones y el desarrollo de estrategias de manejo integral en la región.
- Soluciones verdes: Las infraestructuras verdes, como la restauración de manglares y dunas, representan una alternativa viable para complementar las obras grises existentes. Estas soluciones no solo promueven la estabilización de los sedimentos y la

regeneración de las playas, sino que también contribuyen al aumento de la biodiversidad y mejoran la resiliencia del ecosistema ante eventos extremos asociados al cambio climático.

- Propuesta de hibridación de infraestructuras grises: La hibridación de infraestructuras grises puede ser una estrategia para mitigar la erosión costera sin desplazar el problema ni afectar zonas adyacentes. La propuesta presentada, que incluye la modificación de los espolones y diques exentos existentes, favorece el balance sedimentario y minimiza los impactos negativos en áreas cercanas. Este enfoque integral no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino que también responde a las necesidades socioeconómicas de la región, beneficiando tanto a la comunidad local como a los ecosistemas costeros.
- La implementación de estas soluciones requiere un monitoreo constante y adaptaciones según los resultados obtenidos, pero los beneficios a largo plazo en términos de sostenibilidad, biodiversidad y reducción de costos operativos justifican la propuesta de implementar este tipo de infraestructura híbrida. La participación comunitaria y la sensibilización serán clave para el éxito de estas intervenciones, que buscan mejorar la calidad de vida de los habitantes de Arboletes mientras se restablece el equilibrio natural de su litoral.

## 9. Recomendaciones

Aunque los resultados de este trabajo mencionan que las soluciones híbridas, que combinan los beneficios de obras grises e infraestructura verde, pueden ser una estrategia viable para mitigar la erosión costera en el litoral de Arboletes, es fundamental destacar que la aplicación de esta propuesta requiere un análisis profundo. Por lo tanto, se recomienda:

- Realizar estudios detallados de impacto ambiental y social y económico: Para evaluar los efectos de las modificaciones propuestas en los ecosistemas locales, los procesos sedimentarios, las comunidades y la economía. Esto para asegurarse de que estos cambios no generen consecuencias no previstas.
- Monitoreo continuo: Implementar un sistema de monitoreo a largo plazo para evaluar la evolución de los procesos costeros. Este monitoreo debería incluir la participación de la comunidad local para asegurar que las intervenciones sean adaptativas y alineadas con las necesidades locales.
- Colaboración con expertos y comunidades locales: Para asegurar que las modificaciones propuestas sean exitosas, es fundamental promover la colaboración entre expertos en gestión costera, autoridades locales y la comunidad en general. La integración de conocimiento local y la participación de los involucrados aumentarán las probabilidades de éxito a largo plazo.

## 10. Referencias

- Aguilera , M., Reina, Y., Orozco, A., Vega, J., & Barcos, R. (2017). *Evolución socioeconómica de la región Caribe colombiana entre 1997 y 2017*. Documentos de trabajo sobre economía regional y urbana.
- Alcaldía de Arboletes . (2024). *Análisis de situación de salud* . Obtenido de [https://www.dssa.gov.co/images/asis/documentos/ASIS\\_arboletes\\_2023.pdf](https://www.dssa.gov.co/images/asis/documentos/ASIS_arboletes_2023.pdf)
- ALLIANCE MEXICO. (11 de Enero de 2025). *A dos años de la restauración de duna costera en Riviera Maya*. Obtenido de <https://iki-alliance.mx/a-dos-anos-de-la-restauracion-de-duna-costera-en-riviera-maya/>
- AquaTerra. (diciembre de 2005). *Estudio y evaluación de alternativas de solución para la protección costera de unos sectores de la costa Caribe colombiana Fase II EPROCA*. Obtenido de DAGRAN: <https://dagran.antioquia.gov.co/>
- Caracol Radio. (11 de Enero de 2025). *Denuncian abandono al proyecto de Protección Costera de Cartagena*. Obtenido de <https://caracol.com.co/2024/03/21/denuncian-abandono-al-proyecto-de-proteccion-costera-de-cartagena/>
- Cardona, D. (2018). *ACTUALIZACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE ACANTILADOS BLANDOS TROPICALES ENTRE MINUTO DE DIOS Y PUERTO REY, SUR DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA*. Medellín: EAFIT.
- Carranza-Edwards, A. (2010). Causas y consecuencias de la erosión de playas. Impactos Del Cambio Climático Sobre La Zona Costera. 37-50.
- Charlier, R., & Meyer, C. (2005). *Coastal Erosion Response and Management*.
- Chávez, V., Lithgow, D., Losada, M., & Silva, R. (2021). Coastal green infrastructure to mitigate coastal squeeze. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1-12.
- Chevillot, P., Molina, A., Giraldo, L., & Molina, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 79-89.
- ComunidadArboletes. (15 de Febrero de 2021). Conversación con la comunidad. (I. López, Entrevistador)
- Correa, I., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) Costa Caribe Colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 5-26.

- Correa, I., Acosta, S., & Bedoya, G. (2007). Análisis de las causas y monitoreo de la erosión litoral en el departamento de Córdoba. *EAFIT*.
- Correa, I., Alcántara, J., & González, D. (2005). Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean Coast. *Journal of Coastal Research*, 52-57.
- DANE. (Febrero de 2020). *Proyecciones de población con base en el Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Obtenido de [dssa.gov.co](https://dssa.gov.co)
- EOS Data Analytics. (07 de marzo de 2024). *Imágenes de satélite gratis: Fuentes de datos para todos*. Obtenido de [https://eos.com/es/blog/imagenes-de-satelite-gratis/#:~:text=USGS%20EarthExplorer%3A%20Una%20Enorme%20Colecci%C3%B3n,travel%20de%20EarthExplorer%20\(EE\)](https://eos.com/es/blog/imagenes-de-satelite-gratis/#:~:text=USGS%20EarthExplorer%3A%20Una%20Enorme%20Colecci%C3%B3n,travel%20de%20EarthExplorer%20(EE)).
- esentia. (11 de Enero de 2025). *Nueva siembra de plántulas de mangle para recuperar la Ciénaga de la Virgen en Cartagena*. Obtenido de <https://www.esentia.co/noticias/nueva-siembra-de-plantulas-de-mangle-para-recuperar-la-cienaga-de-la-virgen-en-cartagena/>
- Gobernación de Antioquia. (2021). *Generar conocimiento de la erosión costera a través del desarrollo de la primera fase del Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño PIMECLA*. DAGRAN.
- Gobernación de Antioquia. (2022). *Generar conocimiento de la erosión costera a través de la implementación de la segunda fase del Programa Integral para el Monitoreo y la Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño*.
- Gobernación de Antioquia. (2023). *Generar conocimiento de la erosión costera a través del desarrollo de la cuarta fase del Programa Integral para el Monitoreo y la Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño PIMECLA*. DAGRAN.
- Junta de Andalucía. (24 de Noviembre de 2024). *2.1 Dinámica litoral: oleaje, mareas y corrientes litorales*. Obtenido de [https://edeja.juntadeandalucia.es/bancorecursos/file/40b87567-cf6f-4c28-b766-9b393d8795b3/1/es-an\\_2019030412\\_9153507.zip/21\\_dinmica\\_litoral\\_oleaje\\_mareas\\_y\\_corrientes\\_litorales.html?temp.hn=true&temp.hb=true](https://edeja.juntadeandalucia.es/bancorecursos/file/40b87567-cf6f-4c28-b766-9b393d8795b3/1/es-an_2019030412_9153507.zip/21_dinmica_litoral_oleaje_mareas_y_corrientes_litorales.html?temp.hn=true&temp.hb=true)
- Laboratorio de Oceanografía Costera. (01 de Diciembre de 2024). *CASSIE*. Obtenido de Sistema de análisis costero del motor de imágenes espaciales: <https://cassiengine.org/>
- Manrique, J. (2012). Estudio experimental de alternativas de protección costera, caso Chelem-Chuburná, Yucatán. *Instituto Politécnico Nacional*.

- McGranahan, G., Balk, D., & Bridget, A. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 17-37.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Erosión Costera*. Obtenido de <https://mapas.snet.gob.sv/oceanografia/erosionCostera.pdf>
- Molina, A., Molina, C., & Chevillot, P. (1992). La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. *Boletín Científico CIOH*, 43-58.
- MUTANTE. (09 de abril de 2024). *Peligro: erosión costera*. Obtenido de <https://mutante.org/contenidos/peligro-erosion-costera/>
- Nicholls, R., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 1517-1520.
- Ordoñez, A., Peña, C., Bastidas, M., & Ricaurte, C. (2017). Región 8: Sinú - Urabá. En INVEMAR, *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe* (págs. 144-145). Santa Marta: Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR #14.
- Paniagua, J., & Correa, I. (2013). PREDICCIÓN DE LAS MAGNITUDES DE RETROCESO DE ALGUNOS SECTORES ACANTILADOS DE ANTIOQUIA EN CONDICIONES DE ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR - RESULTADOS PARA EL SECTOR DE ARBOLETES. *ResearchGate*.
- Pereira, C., Madrid, D., Correa, I., Pranzini, E., & Botero, C. (2019). An evaluation of human interventions in the anthropogenically disturbed Caribbean Coast of Colombia. *Elsevier*, 1-11.
- Posada, B., & Henao, W. (2008). *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano*. Santa Marta: INVEMAR.
- Rangel, N. (2009). Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos. *Gestión y Ambiente*.
- Rangel, N., Williams, A., & Anfuso, G. (2018). Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. *Elsevier*, 58-75.
- Reguero, B., Beck, M., Losada, I., & Narayan, S. (2017). Uniendo ingeniería y ecología: la protección costera basada en ecosistemas. *Revista Iberoamericana del Agua*, 41-58.
- Restrepo, J. (2005). Los sedimentos del río Magdalena: un reflejo de la crisis ambiental. *EAFIT*.

- Ricaurte, C., & Bastidas, M. (2017). *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe*. Santa Marta: INVEMAR.
- Silva, R., Chávez, V., Bouma, T., Van Tussenbroek, B., Arkema, K., Martínez, M., . . . Pereira, P. (2019). The Incorporation of Biophysical and Social Components in Coastal Management. *Estuaries and Coasts*.
- Sunamura, T. (2015). Rocky coast processes: with special reference. Proceedings of the Japan Academy. *Series B, Physical and Biological Sciences*, 481-500.
- Teleantioquia Periodista Digital. (10 de diciembre de 2021). *En Arboletes calculan que podrían llegar a 10 mil turistas*. Obtenido de <https://www.teleantioquia.co/noticias/en-arboletes-calculan-que-podrian-llegar-10-mil-turistas/>
- UNCTAD. (2020). Review of marine transport 2020. *United Nations Conference on Trade and Development*.
- Vélez, J., Betancurth, G., & Cañón, J. (2021). Erosion and progradation in the Atrato River delta: A spatiotemporal analysis with Google Earth Engine. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 83-98.
- Winterwerp, J., Albers, T., Anthony, E., Friess, D., Mancheño, A., Moseley, K., . . . Van Wesenbeeck, B. (2020). Managing erosion of mangrove-mud coasts with permeable dams - lessons learned. *Ecological Engineering*, 158.