



GUÍA PARA LA
**PROTECCIÓN Y
REHABILITACIÓN**
DE LAS
PLAYAS
DEL
**GRAN
CARIBE**



© Asociación de Estados del Caribe 2024
Publicado por la Asociación de Estados del Caribe
Secretaría de la AEC
5-7 Sweet Briar Road, Saint Clair,
Puerto España,
Trinidad, Indias Occidentales.
WWW: <http://www.acs-aec.org>
Teléfono: 1-868-622-9575

Todos los derechos reservados.
Ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida, copiada, almacenada en un sistema de recuperación electrónico o transmitida de ninguna manera o por ningún medio, electrónico, mecánico, fotocopiado, grabación u otros, sin el permiso previo por escrito del autor y los editores.
Si tiene alguna pregunta sobre esta publicación, escribanos a:
mail@acs-aec.org

Copias adicionales están disponibles en:
Secretaría de la Asociación de Estados del Caribe | Comunicaciones
comunicaciones@acs-aec.org

Impreso por Royards Publishing Company Limited
7A Macoya Industrial Estate, Macoya,
Trinidad. Indias Occidentales
Teléfono: 1-868-645-0423 / 663-6002
Fax: 1-868-663-3616
Correo electrónico: royards@aol.com
Sitio web: <http://www.royards.com>

Agradecimientos

Las siguientes personas han formado parte del grupo de redacción de la guía:

Dr. Miguel Canals del Centro de Ciencias Oceánicas Aplicadas de la UPRM de la Universidad de Mayagüez, Puerto Rico

Dra. Ywenn de la Torre, de la Dirección Regional de Guadalupe del BRGM

Dr. José Luis Juanes, del Departamento de Procesos Físicos del Instituto de Ciencias del Mar (CIMAR), Cuba

Dra. Constanza Ricaurte Villota, del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), Colombia

Dr. Carlos Valdés, del Departamento de Sismología del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Todos ellos son miembros del Grupo Asesor Técnico del “Proyecto Sandy Shorelines (SSP por sus siglas en inglés)”. Con la publicación de esta guía, el SSP completó el COMPONENTE 5 y cumplió su Objetivo 6.

Tabla de Contenidos

| | |
|------------------------|------|
| Agradecimientos..... | iv |
| Lista de tablas | vii |
| Lista de Figuras | viii |
| Prologo | xiii |

Capítulo 1

| | |
|---|----------|
| Introducción y propósito de la guía..... | 1 |
|---|----------|

Capítulo 2

| | |
|--|----------|
| Definición de ‘Playa’ | 3 |
| 2.1 Las Playas del “Gran Caribe”..... | 5 |
| 2.1 Delimitación física de un perfil de playa en el caso del Gran Caribe..... | 8 |
| 2.2 Tipos de playas del Gran Caribe según la morfología de la costa y la composición de la arena..... | 10 |
| 2.3 Comportamiento dinámico de una playa. Herramienta para la correcta interpretación de las causas de la erosión de las playas | 14 |
| 2.4 La playa como parte de los ecosistemas marino-costeros del Gran Caribe..... | 19 |
| Síntesis | 20 |

Capítulo 3

| | |
|---|-----------|
| Erosión en las Playas del Caribe | 22 |
| 3.1 Extensión e intensidad de la erosión. | 22 |
| 3.1.1 Panorama de la erosión costera en el Caribe..... | 22 |
| 3.1.2 Distribución geográfica y variaciones..... | 23 |
| 3.1.3 Impactos económicos y ambientales de la erosión..... | 25 |
| 3.2 Erosion vs. accretion..... | 25 |
| 3.3 Natural and anthropogenic causes of erosion..... | 27 |
| 3.3.1 Factores naturales de la erosión..... | 27 |
| 3.3.2 Causas antropogénicas de la erosión..... | 29 |
| 3.4 Identificación de los ciclos y fenómenos de erosión | 31 |
| Síntesis | 34 |

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Monitoreo de la Erosión Costera | 35 |
| 4.1 Indicadores de los procesos de erosión..... | 36 |
| 4.1.1 Indicadores que deben observarse..... | 36 |
| 4.1.2 Indicadores que deben medirse..... | 39 |
| 4.2 Parámetro meteorológico marino..... | 40 |
| 4.3 Acciones antropogénicas. | 42 |
| 4.4 Procedimiento de selección de los rangos de la red de monitoreo. | 42 |
| 4.5 Métodos de medición y muestreo de campo | 43 |
| 4.5.1 Topografía. | 43 |
| 4.5.2 Batimetría..... | 49 |
| 4.5.3 Sedimentología. | 51 |
| 4.5.4 Hidrometeorología..... | 53 |
| 4.5.5 Frecuencia de las observaciones. | 56 |
| 4.5.6 Resumen de los métodos de campo y ejemplo de protocolo. | 56 |
| 4.6 Digital tools for information processing | 59 |
| 4.7 Puntos clave para los responsables de la toma de decisiones..... | 64 |

Capítulo 5

| | |
|--|----|
| Visión General de los Modelos Numéricos y su Papel en la Comprensión y Mitigación de la Erosión Costera | 65 |
| 5.1 Introducción..... | 65 |
| 5.2 Cómo funcionan los modelos numéricos. | 65 |
| 5.3 Modelación numérica de las olas..... | 69 |
| 5.4 Modelación numérica de las corrientes..... | 71 |
| 5.5 Modelación numérica del transporte de sedimentos y de la erosión costera. ... | 73 |
| 5.6 Numerical Modelling in Support of Projects Design..... | 75 |
| Síntesis | 76 |

Capítulo 6

| | |
|---|----|
| Medidas de Protección y Rehabilitación de las Playas del Caribe | 77 |
| 6.1 Procedimiento de evaluación de las causas de la erosión y propuestas de solución..... | 77 |

| | |
|--|----|
| 6.2 Consideraciones jurídicas..... | 79 |
| 6.3 Soluciones para mitigar la erosión costera..... | 79 |
| 6.3.1 Soluciones duras o infraestructuras grises..... | 79 |
| 6.3.2 Soluciones blandas o basadas en la naturaleza..... | 84 |
| 6.3.3 Ingeniería basada en la naturaleza..... | 84 |
| 6.3.4 Métodos de restauración de ecosistemas..... | 87 |
| 6.3.5 Estrategias de gestión costera..... | 90 |
| 6.3.6 Soluciones híbridas..... | 92 |
| 6.3.7 Análisis coste-beneficio..... | 93 |

Capítulo 7

| | |
|---|----|
| Lecciones Aprendidas en el Desarrollo del Proyecto “Sandy Shorelines/Costas Arenosas” | 94 |
| 7.1 Componente 1. Establecimiento de puntos focales para los países participantes..... | 94 |
| 7.2 Componente 2. Creación de capacidad institucional y recursos humanos | 95 |
| 7.3 Componente 3. Establecimiento de la red regional de monitoreo de la erosión..... | 96 |
| 7.4 Componente 4. Elaboración de 3 proyectos de rehabilitación de playas como “estudios de caso” | 97 |

Capítulo 8

| | |
|---|-----|
| Recomendaciones para los Responsables de la Toma de Decisiones | 100 |
| APÉNDICE. Erosión de las Playas del Caribe | 107 |
| 7.5 Apéndice A: Fuentes de datos oceanográficos para realizar estudios metoceanicos..... | 107 |
| 7.6 Apéndice B: Modelos numéricos oceanográficos utilizados para comprender los procesos de erosión y diseñar proyectos de protección de playas. | 107 |
| Referencias | 114 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Tabla que muestra los países participantes e instituciones de puntos focales..... | xv |
| Tabla 2: Síntesis de métodos y herramientas de monitoreo | 57 |
| Tabla 3: Soluciones para la erosión costera por categoría | 80 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Terminología de un perfil de playa, Shepard (1973)..... | 6 |
| Figura 2: Terminología de un perfil de playa (Shore Protection Manual, 1984). | 6 |
| Figura 3: Terminología de un perfil de playa. Curso de posgrado del proyecto “Sandy shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022). | 7 |
| Figura 4: Ilustración de la terminología del perfil de playa. Curso de posgrado de “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022)..... | 8 |
| Figura 5: Ilustración de la terminología del perfil de playa. Curso de posgrado de “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022)..... | 8 |
| Figura 6: Playa apoyada en un acantilado. Playa El Holandés. Península de Guahanacabibes, Cuba. Curso de postgrado del proyecto “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022)..... | 9 |
| Figura 7: Playa de suave pendiente con formaciones herbáceas y arbóreas en su parte interior. Postgrado del proyecto “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022). Playa en Surgidero de Batabanó, provincia de Artemisa, Cuba | 7 |
| Figura 8: Playa lineal del Caribe insular con unos 20 km de longitud. Playa de Varadero en la Península de Hicacos, Cuba. | 10 |
| Figura 9: Playa encajonada entre dos salientes rocosos. Playa de Las Cuevas, Trinidad y Tobago. | 11 |
| Figura 10: Playa apoyada por estructura artificial. Punta Cancún. Playa de Cancún, Quintana Roo, México..... | 11 |
| Figura 11: Esquema simplificado del funcionamiento de un sistema de playas. Curso de postgrado del proyecto “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022)..... | 15 |

| | |
|---|----|
| Figura 12: Un escarpe en la playa causado por una tormenta ocasional en la Costa Dorada (David J. Morgan) | 16 |
| Figura 13: Desplazamiento hacia tierra del escarpe activo como evidencia clara de la tendencia erosiva de una playa. Granville, Cedros, Trinidad .. | 16 |
| Figura 14: Vista en planta de la secuencia de cambios en la morfología de la playa y su área submarina en un proceso de acreción (gráfico izquierdo) y en un proceso erosivo (gráfico derecho) (Short (1999), basado en Short (1979); Wright y Short (1984); Sunamura. | 17 |
| Figura 15: Barra transversal con corrientes de retorno al lado para unirse a la orilla y formar un perfil reflectivo. | 18 |
| Figura 16: Erosión catastrófica y daños a las infraestructuras en Puerto Rico a causa del huracán María | 23 |
| Figura 17: Algunos componentes de un presupuesto sedimentario, tomados del Departamento de Nueva Gales del Sur de Conservación de Tierras y Aguas 2001, Gestión de Dunas Costeras: Un Manual de Técnicas de Gestión y Rehabilitación de Dunas Costeras, Unidad Costera, DLWC, Newcastle | 26 |
| Figura 18: Factores que afectan la erosión costera y el transporte de sedimentos, de Splinter y Coco (2021). | 28 |
| Figura 19: Interrupción del transporte de sedimentos a lo largo de la costa a causa de estructuras costeras | 29 |
| Figura 20: La relación entre los muros de contención y la pérdida de playas. | 30 |
| Figura 21: Ciclo típico de erosión y acreción de la playa en un caso sin pérdida permanente de arena. Adaptado de ‘State of New South Wales and Office of Environment and Heritage 2018’ | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 22: Patrón típico de erosión de una playa con tendencia a la erosión a largo plazo. Tomado de https://www.environment.nsw.gov.au/resources/coasts/coastal-dune-mngt-manual.pdf | 34 |
| Figura 23: Perfil de la playa y características morfológicas de Kraus, 2005 (Adaptado de Kraus, 2005) | 37 |
| Figura 24:Forzamientos meteoromarinicos en relación con su escala temporal (adaptado de BRGM) | 40 |
| Figura 25: Diferentes niveles del mar considerando forzamientos atmosféricos y marinos (adaptado de BRGM)..... | 41 |
| Figura 26: Sitios monitoreados en Antigua y Barbuda (Proyecto Costas Arenosas/Sandy Shorelines)..... | 44 |
| Figura 27: Equipo básico para el seguimiento de perfiles: GPS portátil..... | 45 |
| Figura 28 Imágenes de Perfilado de Playas con Sistemas GNSS: Taquímetro y Receptor Base GNSS..... | 47 |
| Figura 29: Levantamiento topográfico mediante fotogrametría con dron | 47 |
| Figura 30: Seguimiento con cámaras fijas; Jamaica (Proyecto Costas Arenosas/Sandy Shorelines)..... | 48 |
| Figura 31: Seguimiento batimétrico avanzado en barco | 31 |
| Figura 32: Diferentes tipos de arena: biotrital, volcánica, aluvial (I-D) | 52 |
| Figura 33: Monitoreo de olas: boyas fijas..... | 53 |
| Figura 34: Ejemplo de plataforma pública de pronóstico de olas (captura de pantalla de www.windy.com tomada el 21 de marzo de 2024)..... | 59 |
| Figura 35: Control de las mareas: mareógrafos..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 36: DSAS genera transectos que se lanzan perpendicularmente a la línea base de referencia en intervalos especificados por el usuario a lo largo de la costa. DSAS mide la distancia entre la línea base y cada intersección de la línea de costa a lo largo de un transecto, y combina la información de fecha y la incertidumbre posicional para cada línea de costa..... | 65 |
| Figura 37: Procesamiento de datos de perfiles de playa: a partir del estudio de campo (izquierda) o de la extracción del MDE (derecha) | 61 |
| Figura 38: Análisis temporal de la cuadrícula topográfica: sustracción de la elevación de una fecha a otra para obtener la erosión y la acumulación de cada píxel (BRGM)..... | 62 |
| Figura 39: Series cronológicas con superposición de posiciones de la línea de costa (colores relacionados con los perfiles), viento y olas (de arriba a abajo)..... | 63 |
| Figura 40: Diferencias entre mallas estructuradas y no estructuradas © 2001-2024 FVCOM @ MEDML. Designed by Dr. Chen..... | 67 |
| Figura 41: Ejemplo de modelación numérica de olas realizada por Inversiones Gamma en su ejecución del proyecto ejecutivo de restauración de playa en Bonasse Beach en Cedros Bay, Trinidad y Tobago. Se muestran las alturas de las olas (tonos de azul) y la dirección de las olas. | 71 |
| Figura 42: Ejemplo de salida de un modelo de circulación costera utilizado por Inversiones Gamma en su ejecución del proyecto ejecutivo de restauración de la playa de Bonasse Beach en la bahía de Cedros, Trinidad y Tobago..... | 73 |
| Figura 43: Ejemplo de modelación de transporte de sedimentos y cambios morfológicos realizado por Inversiones Gamma para el proyecto ejecutivo de restauración de la playa de Runaway Bay Beach en Antigua y Barbuda. Tomado del informe de Morales Diaz et al. (2022). | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figure 44: Metodología para la rehabilitación y protección de playas (adaptada de Torres-Hugues & Córdova-López (2010))..... | 78 |
| Figura 45: Ejemplo de espolones costeros | 80 |
| Figura 46: Dique de contención de cara curva..... | 82 |
| Figura 47: Rompeolas sumergido | 83 |
| Figura 48: Rompeolas artificial..... | 83 |
| Figura 49: Alimentando una playa con dragado | 86 |
| Figura 50: Geotubos en zona de playa | 87 |
| Figura 51: Restauración de dunas..... | 88 |
| Figura 52: Un científico marino llevando a cabo un proyecto de restauración de coral en un ecosistema de arrecifes dañados..... | 89 |
| Figura 53: Guía paso a paso del proceso de planificación espacial marina (adaptado de Ehler y Douvere, 2013)..... | 91 |
| Figura 54: Marco para evaluar los impactos de las alternativas de gestión de la erosión (adaptado de Porro et al., 2020)..... | 93 |
| Figura 55: Left. Dune designed to protect the hotel from extreme erosive events and sea level rise. IberoStar Hotel. Varadero Beach, Cuba. July 2015. Right. A few days after Hurricane Irma in September 2017. (Juanes J. L.2017) | 98 |
| Figure 56: Caribbean WaveWatch 3 modelo de olas© Copyright - Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology | 110 |

PROLOGO

La Asociación de Estados del Caribe (AEC) organizó el Primer Simposio de la Comisión del Mar Caribe en la ciudad de Puerto España, República de Trinidad y Tobago, los días 23 y 24 de noviembre de 2015. Al mismo asistieron distinguidos expertos de dieciocho países de la AEC y representantes de organizaciones regionales e internacionales.

El evento se celebró bajo el lema “Desafíos, Diálogos y Cooperación para la Sostenibilidad del Mar Caribe” y se centró en tres problemas del medio marino con impacto negativo en las comunidades costeras y la economía de la región: el crecimiento no controlado de especies invasoras (en particular el pez león), la llegada del sargazo y la erosión costera.

Entre otros aspectos, los participantes del evento estuvieron de acuerdo en que era esencial contar con financiación internacional para promover una investigación más amplia sobre los temas del simposio. En tal sentido, la Secretaría de la AEC continuó las acciones para identificar y realizar acuerdos con países e instituciones que habían expresado su voluntad de contribuir con el apoyo financiero de proyectos en los temas abordados.

Con el fin de analizar varias propuestas de proyectos, la Comisión del Mar Caribe celebró la primera reunión de su subcomisión científica y técnica en mayo de 2016, en la que se aceptó el avance del proyecto “Evaluación del impacto del cambio climático en las costas arenosas del Caribe: alternativas para su control y resiliencia”. Se abrevió como “Sandy Shorelines”, y fue aprobado en la VII Cumbre de Jefes de Estado y de Gobierno de la AEC en La Habana, Cuba, en junio de 2016.

En respuesta a la voluntad expresada por el Gobierno de la República de Corea de cooperar con la financiación de proyectos de la AEC, en septiembre de 2016 se presentó el proyecto “Sandy Shorelines” a representantes de la Agencia de Cooperación Internacional de Corea (KOICA) en la sede de la AEC en Puerto España, iniciándose el proceso de ejecución del proyecto.

El objetivo general del proyecto reflejaba el interés expresado en el I Simposio de la Comisión del Mar Caribe: “Mejorar la resiliencia de las comunidades costeras al cambio climático y a la subida del nivel del mar, mediante el establecimiento de una red de vigilancia de la erosión costera y la aplicación de las mejores prácticas de conservación

y rehabilitación de playas”.

The following specific objectives were included in the elaboration of the project:

En la elaboración del proyecto se incluyeron los siguientes objetivos específicos:

1. Actualizar la evaluación de la intensidad, el alcance y las causas de la erosión en la región del Caribe.
2. Establecer una red regional de vigilancia de la erosión costera.
3. Desarrollar proyectos de rehabilitación de playas en sectores prioritarios de interés económico y social.
4. Brindar asesoría y supervisión para la ejecución de proyectos de rehabilitación de playas.
5. Contribuir a la creación de capacidades institucionales y de recursos humanos para las mejores prácticas jurídicas y de ingeniería en el control de la erosión.
6. Redactar un manual de rehabilitación de playas con criterios científicos y de ingeniería que responda a las características especiales de las playas tropicales de la región del Caribe.
7. Elaborar recomendaciones para la aplicación de las mejores prácticas normativas y de ingeniería en el manejo del proceso erosivo.
8. Proveer un sistema mejorado de monitoreo de la erosión de playas para la práctica y futuras aplicaciones en la investigación para entender las causas de la erosión.

Basándose en los objetivos propuestos, las tareas del proyecto se organizaron en seis componentes:

COMPONENTE 1. Establecimiento de puntos focales para los países participantes.

COMPONENTE 2. Desarrollo de capacidades institucionales y recursos humanos.

COMPONENTE 3. Establecimiento de la red regional de monitoreo del proceso de erosión.

COMPONENTE 4. Desarrollo de 3 proyectos de rehabilitación de playas.

COMPONENTE 5. Elaboración del Manual de Rehabilitación de Playas para el Caribe.
 COMPONENTE 6. Conferencia Regional de Preservación de Playas.

El primer resultado metodológico del proyecto se obtuvo en el Componente 1 cuando los Puntos Focales se prepararon y completaron la propuesta del “Perfil de Proyecto para la Elaboración del Plan Nacional para el Proceso de Erosión Costera” que refleja el procedimiento organizativo para la realización de las tareas a nivel de país.

Los países participantes y las instituciones nacionales que actúan como Puntos Focales formaron parte del proyecto “Evaluación del impacto del cambio climático en las costas arenosas del Caribe: alternativas para su control y resiliencia”.

Tabla 1 Tabla que muestra los países participantes e instituciones de puntos focales

| Países participantes | Instituciones que sirven de Puntos Focales |
|-----------------------------|--|
| Antigua y Barbuda | Oficina de Pesca Point Wharf. Ministerio |
| Costa Rica | Universidad Nacional de Costa Rica |
| Cuba | Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR) Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente |
| República Dominicana | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales |
| Guatemala | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales |
| Haití | Oficina Nacional de Evaluaciones Medioambientales (BNEE) |
| Jamaica | Agencia de Planificación y Medio Ambiente (NEPA) |
| Panamá | Ministerio de Ambiente |
| Trinidad y Tobago | Instituto de Asuntos Marinos (IMA) |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y PROPÓSITO DE LA GUÍA

La Región del Gran Caribe (RGC), tal y como se define en el Convenio para la Protección y el Desarrollo del Medio Marino (PNUMA 1983), se extiende desde la costa noreste de Brasil hasta el Cabo Hatteras, frente a la costa de Carolina del Norte (Estados Unidos). Es una de las regiones geopolíticamente más complejas del mundo, compuesta por 28 países independientes (entre continentales y pequeños estados insulares en desarrollo - PEID) y 16 territorios de ultramar de estados metropolitanos (Mahon et al., 2010), con diferencias de tamaño y nivel de desarrollo socioeconómico. El legado colonial de los países europeos incluye las cinco lenguas oficiales de la región (inglés, español, francés, neerlandés y portugués) (Fanning & Mahon, 2017), así como elementos culturales que tanto indígenas como otros grupos humanos trajeron a América.

Gran parte de la economía de la región del Gran Caribe se basa en la industria del turismo, en la que las playas de arena desempeñan un papel importante porque se comercializan como un producto atractivo de mar-arena-sol, pero estas se ven potencialmente amenazadas por el impacto de las actividades antropogénicas (Defeo et al., 2009) y el cambio climático que induce la subida del nivel del mar (Spencer et al., 2022), la erosión costera, el aumento de los fenómenos de olas extremas y los huracanes. La erosión costera, definida como un proceso mediante el cual la línea de costa se adapta a las variaciones del nivel del mar, los niveles de energía, el suministro de sedimentos y la topografía existente (Cooper y McKenna, 2007), es una de las mayores amenazas para las zonas costeras del Gran Caribe. Los estudios muestran que el 70% de las playas del Caribe Oriental han registrado un retroceso de la línea de costa desde la década de 1980 con tasas entre - 0,27 m / año y -1,06 m / año (PNUMA, 2003).

Esta guía tiene como objetivo proponer criterios científicos y de ingeniería que respondan a las características especiales de las playas tropicales de la región del Gran Caribe, para el monitoreo de la erosión costera de estas playas, así como el establecimiento de medidas de mitigación del problema. Se espera que esta guía puedan utilizarla la comunidad científica en general, los tomadores de decisiones, y otros actores interesados para ayudar con la situación costera de la región, ya sea a nivel local o internacional.

La guía ha sido elaborada de acuerdo con los contenidos de las clases y conferencias impartidas durante las acciones formativas del COMPONENTE 2, así como los procedimientos y protocolos aplicados en el establecimiento de la red regional de monitoreo del proceso erosivo, COMPONENTE 3, y los conceptos y metodologías aplicados en los tres proyectos ejecutivos de rehabilitación de playas correspondientes al COMPONENTE 4.

Los temas desarrollados en cada capítulo incluyen los resultados de una cuidadosa revisión bibliográfica que conlleva a la actualización del estado del estudio, pero siempre bajo la valoración crítica de lo que es realmente aplicable y conveniente en el contexto de las características ambientales y socioeconómicas de la región del Gran Caribe. En este sentido, se presta especial atención a los aportes realizados en este campo por la destacada especialista de la región, la Dra. Gillian Cambers, con su reconocido trabajo sobre la erosión de las playas de las pequeñas islas del Caribe. Teniendo en cuenta que muchos temas abordados en la guía se desarrollan con mayor profundidad en manuales y libros especializados, se ha decidido incluir referencias comentadas a estos textos para simplificar la extensión de la guía.

En el Capítulo 6, las lecciones aprendidas a través del desarrollo del Proyecto de Costas Arenosas están concebidas para resaltar todos aquellos elementos que, durante el desarrollo del proyecto, sirvieron para identificar limitaciones e insuficiencias en la concepción de regulaciones y el diseño de acciones de ingeniería para el control de la erosión y la afronta de los efectos del cambio climático. Estos elementos deben ser objeto de atención en futuras acciones costeras.

Finalmente, en el Capítulo 7, se presentan recomendaciones para los tomadores de decisiones, un procedimiento metodológico propuesto con la secuencia lógica de acciones de investigación y monitoreo, definición de soluciones, diseño de acciones, supervisión de la ejecución de obras y la evaluación de su efectividad. De esta manera, se completa un ciclo en la acción costera, siguiendo los preceptos de la Gestión Integrada de Zonas Costeras.

Capítulo 2

DEFINICIÓN DE 'PLAYA'

La palabra playa surgió de la necesidad que tenía el hombre de diferenciar en la zona costera los espacios formados por la acumulación de materiales sueltos, donde la suave pendiente y la débil consistencia del suelo facilitaban sus movimientos hacia y desde el mar.

Además de convertirse en los lugares de embarque y desembarque de los primeros navegantes y pescadores, las playas eran zonas apropiadas para la recolección de alimentos y objetos de origen marino con múltiples usos.

Más recientemente, las playas se reconocen como el lugar de recreo y ocio preferido de muchas personas, convirtiéndose en un recurso natural de gran valor para la industria turística, que destaca de forma particular en la región del Gran Caribe.

A lo largo de los años el concepto técnico de playa ha sufrido pocos cambios y en la literatura especializada se refieren a ella como la franja de contacto entre la tierra y el mar en la que se produce la deposición de materiales sueltos de diferentes orígenes donde predomina la arena con partículas que, por su tamaño, se sitúan en un rango de 1,0 mm y 0,062 mm, según la clasificación de Wentworth, Shore Protection Manual, (1984), ampliamente utilizada en todo el mundo. Los depósitos de arena que se forman en las orillas de ríos y lagos también se consideran playas y se usan en diversas actividades económicas y sociales, aunque en esta guía sólo se hace referencia a las costas marinas arenosas.

Como datos de interés, se estima que las costas arenosas representan entre el 34%-40% (170.000 km) de la longitud total de las costas, (Hardisty, 1990) y (Bird, 1996), aunque esencialmente cubren el 100% de las costas de Holanda, el 60% de las de Australia y el 33% de las de Estados Unidos (Short, 1999, en Shwartz, 2005), por citar sólo algunos ejemplos de países con extensas costas arenosas.

2.1. Las Playas del “Gran Caribe”

En la definición de “Gran Caribe” de julio de 2023 que aparece en la página web de la Asociación de Estados del Caribe (AEC), se expresa claramente que es un concepto político que incluye los territorios limítrofes del Mar Caribe y otros estados insulares con características históricas, sociales y culturales similares, conectando las Antillas con países de América Central, América del Norte y América del Sur.

Según este concepto, el “Gran Caribe” está compuesto por 25 estados miembros y 12 estados asociados, sumando un total de 37 estados que en conjunto tienen una longitud de costa estimada en 25,738 km, lo que representa solo el 1.6% de las costas mundiales, según datos proporcionados por el “World Factbook” de la CIA (CIA World Factbook, s.f.)(<https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/coastline/>).

A pesar de la pequeña extensión de las costas del “Gran Caribe” en comparación con el resto del mundo, la región es reconocida internacionalmente por las cientos de playas que posee con condiciones naturales excepcionales para la actividad turística. Cabe destacar que, con solo el 1.6% de las líneas costeras del mundo, 6 de las mejores 20 playas (30%) se encuentran en la región, según una selección de los “Premios Traveler’s Choice” otorgados por Trip Advisor en 2023.

Ya en el informe “Diagnóstico de Procesos de Erosión en Playas Arenosas del Caribe” (Martí, 2003), se advirtió que “a pesar de la expansión del turismo en las playas, los procesos de erosión ocurren con más frecuencia, causando daños severos a las instalaciones hoteleras y deterioro ambiental de la costa.” Este informe mencionado se refiere a investigaciones sobre el proceso de erosión en varios países de la zona iniciadas en los años 80, durante las cuales se elaboraron los primeros inventarios de las playas de la región.

En 1996 y a través del proyecto “Estabilidad de las Costas y Playas de las Islas del Caribe” (COSALC) auspiciado por el Sea Grant College de la Universidad de Puerto Rico (UPR-SGCP) y con el apoyo de la UNESCO, la Dra. Gillian Cambers estableció un Programa de Monitoreo de las Playas de los Pequeños Estados Insulares del Caribe Oriental que facilitó el registro de decenas de playas y la evaluación del comportamiento del proceso erosivo en las mismas, (Cambers,2005, en Shwartz, 2005). Los resultados de estos monitoreos fueron esenciales para demostrar la magnitud y extensión del efecto erosivo de los huracanes entre 1990 y 1999 en la región.

La preparación de la red de monitoreo de las variaciones morfológicas y sedimentológicas de las playas en el presente proyecto “Sandy Shorelines” ha requerido la actualización y ampliación de las estaciones de monitoreo de los países participantes, que en el caso de las islas pequeñas han utilizado como referencia las redes anteriores establecidas por la Dra. Cambers.

En el caso de la República Dominicana, Jamaica, Costa Rica y Cuba, también se han utilizado las redes de monitoreo que habían establecido para proyectos iniciados en los años 80 del siglo pasado, siguiendo un proceso continuo de actualización y ampliación. Por ejemplo, sólo en Cuba, con una longitud de costa de 5.735 km el inventario alcanza ya las 500 playas con una gran diversidad tanto desde el punto de vista morfológico como sedimentológico.

En realidad, determinar el número de playas depende de los criterios utilizados para su delimitación física. Por ejemplo, no existe un límite mínimo de longitud para clasificar un sector costero arenoso como playa.

Es común encontrar en el Gran Caribe playas con menos de 100 m de extensión que son bien reconocidas por la población por su uso tradicional como sitios de baño y recreación. Sin embargo, en los numerosos cayos deshabitados de la región existen cientos de pequeños arenales con las mismas características que no presentan ningún uso ni están reconocidos como playa en ningún documento.

Entonces, ¿Cuántas playas hay en el Gran Caribe?

Sin duda, son muchas y muy buenas para el desarrollo de actividades recreativas y de esparcimiento, pero para lograr el uso sostenible de las playas del Gran Caribe es necesario conocer las particularidades que las caracterizan desde el punto de vista físico y ambiental que se explican en las siguientes secciones del presente capítulo.

2.1. Delimitación física de un perfil de playa en el caso del Gran Caribe

En la literatura especializada, existen diversas definiciones para delimitar los límites y componentes de un perfil de playa; sin embargo, hay una similitud fundamental en el tratamiento de los elementos básicos en todas estas definiciones. La Figura 1 muestra la clasificación propuesta por Shepard (1973) que se limita a exponer los elementos del perfil de forma sencilla y es ampliamente utilizada por numerosos autores.

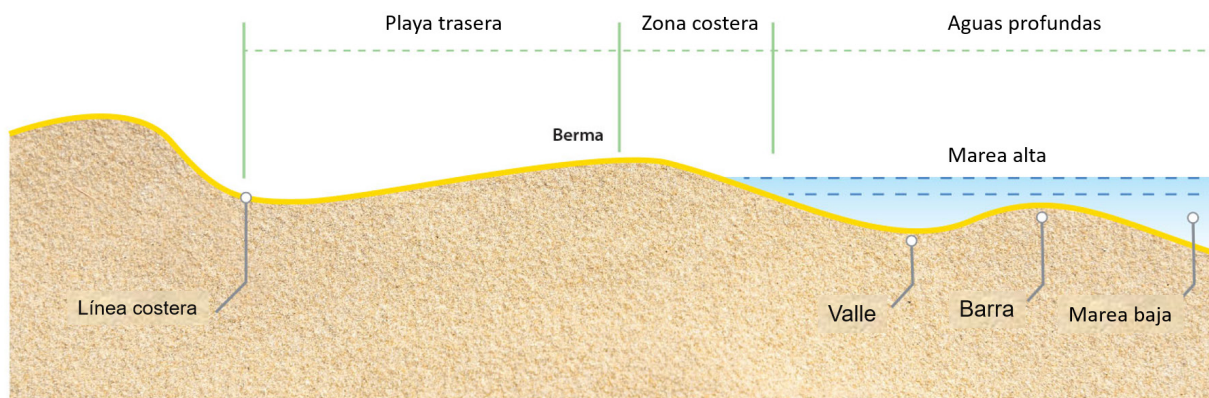


Figura 1: Terminología de un perfil de playa, Shepard (1973).

En el caso de la Figura 2 se muestra la clasificación propuesta en el Shore Protection Manual (1984), que proporciona un mayor detalle de las diferentes partes del perfil en función de su morfología y de la influencia del oleaje y las mareas. También se observa que la parte interior de la playa está limitada por un escarpe donde se fija el límite de la playa con la costa.

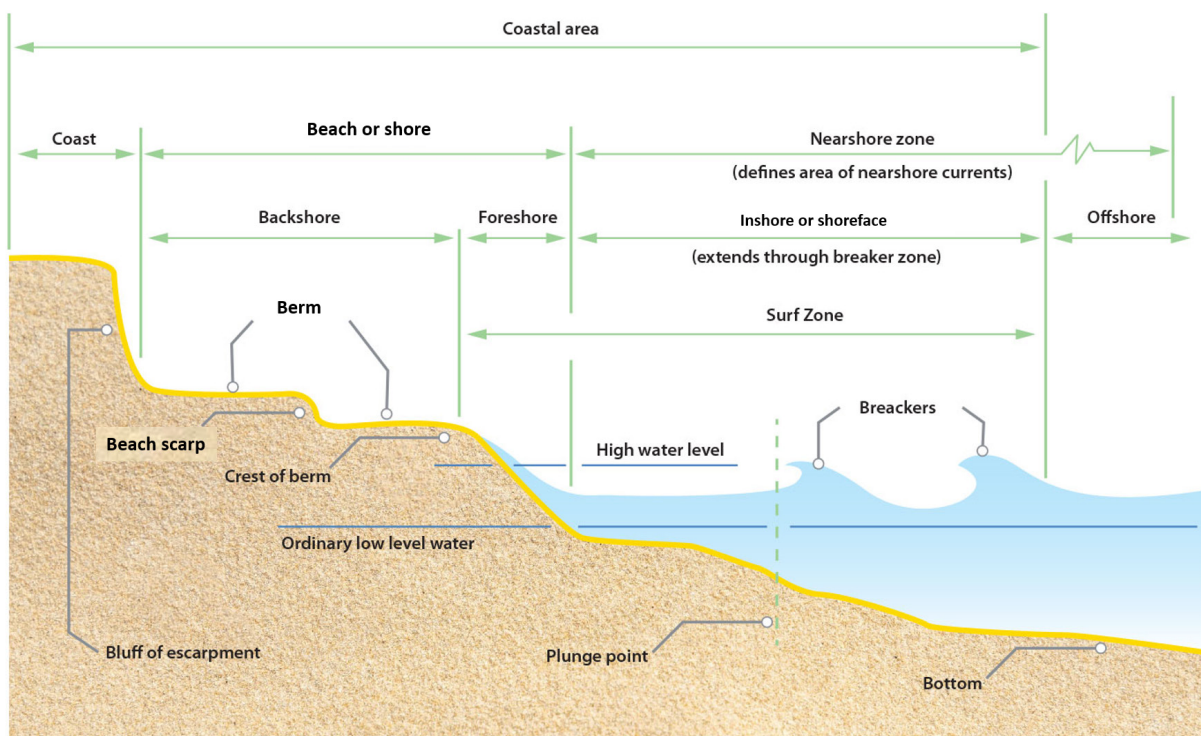


Figura 2: Terminología de un perfil de playa (Shore Protection Manual, 1984).

Nótese que en ninguna de las clasificaciones se hace referencia al caso en que la parte interior de la playa constituye una duna activa que participa en los procesos de erosión y acumulación propios de la dinámica del perfil de playa.

Considerando que el proceso de erosión en muchas playas del Caribe afecta las dunas (GPA, PNUMA, 2003), en el curso de postgrado Procesos Costeros y Criterios Metodológicos para la Recuperación de Playas impartido como parte del componente de formación del proyecto “Sandy Shorelines” (Juanes, 2018, 2021 y 2022) se propone la terminología del perfil de playa que se muestra en la Figura 3.

Esta propuesta defiende la idea de incluir la duna como parte de la terminología del perfil dinámico de la playa, valorando también el papel que juega la vegetación como elemento disipador de energía durante el oleaje extremo y como barrera de contención de la arena transportada por el viento, fenómenos muy bien observados en el Gran Caribe.

Como puede observarse en la Figura 3, el límite hacia tierra del perfil se sitúa al pie de la cara interna de la duna. El límite hacia el mar se define en la posición donde el arrastre de material de playa es prácticamente nulo, lo que ocurre regularmente a profundidades entre 5 m y 10 m.

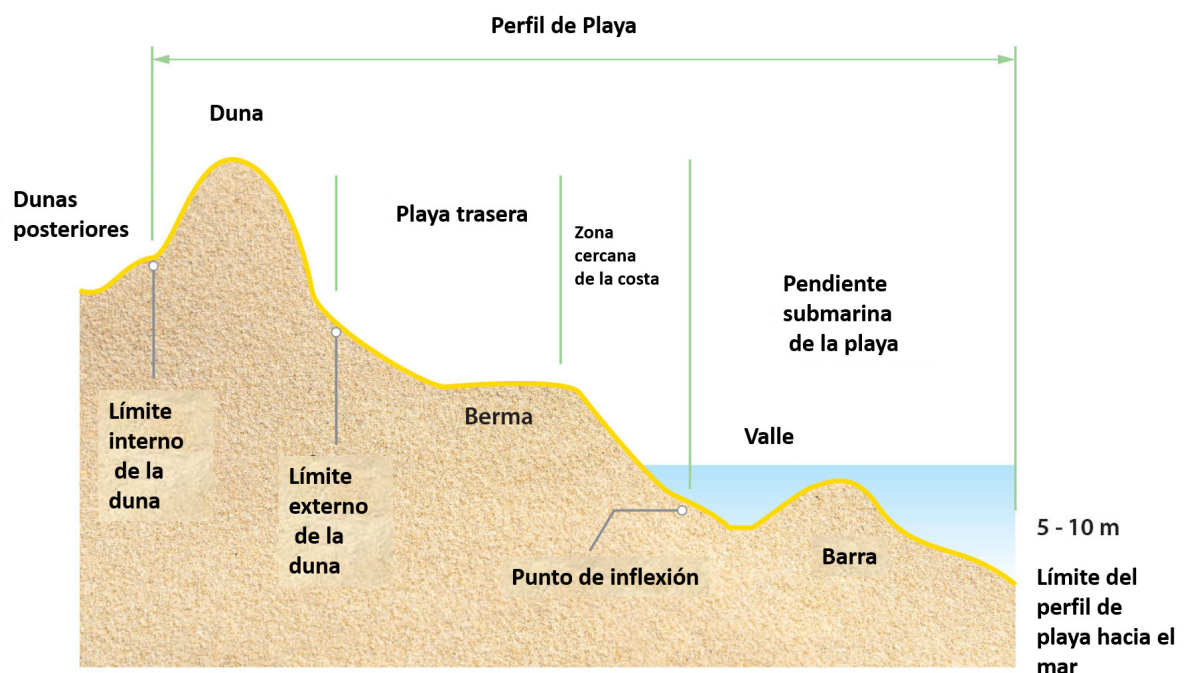


Figura 3: Terminología de un perfil de playa. Curso de posgrado del proyecto “Sandy shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022).



Figura 4 Ilustración de la terminología del perfil de playa. Curso de posgrado de “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022).

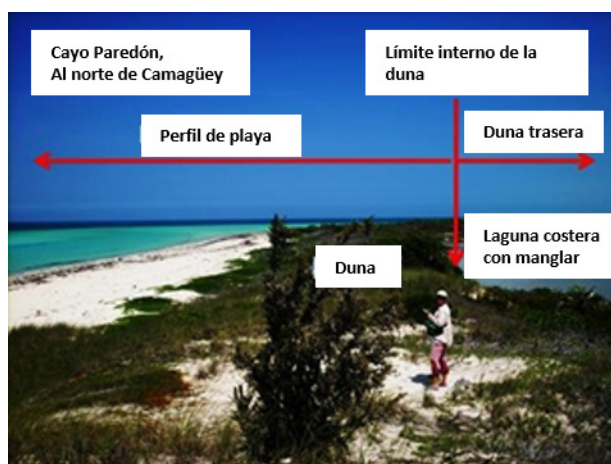


Figura 5 Ilustración de la terminología del perfil de playa. Curso de posgrado de “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022).

En el Gran Caribe, además de playas con dunas en su parte interior, es frecuente observar playas apoyadas en acantilados que marcan el límite natural del perfil hacia tierra.

También existen numerosas playas con suaves pendientes cuya parte interior está cubierta por formaciones herbáceas y arbóreas que se extienden hacia el mar en función del comportamiento del oleaje y el viento (Figura 7).

La importancia práctica de establecer una definición para los límites de la playa, considerando las complejidades morfodinámicas de varios tipos de perfiles, se debe a la necesidad de criterios técnicos que garanticen una adecuada gestión de la playa. Con frecuencia, se observa que los instrumentos legales para la gestión costera en los países del Gran Caribe carecen de definiciones precisas para los límites de la playa. Cuando existen definiciones, a menudo priorizan criterios de propiedad de la tierra sobre las características morfodinámicas del perfil. Queda pendiente para los países de la región la tarea de desarrollar e implementar un estándar efectivo para la protección del perfil morfodinámico de las playas, un tema que será abordado más detalladamente en el próximo capítulo.



Figura 6 Playa apoyada en un acantilado. Playa El Holandés. Península de Guahanacabibes, Cuba. Curso de postgrado del proyecto “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022)



Figura 7 Playa de suave pendiente con formaciones herbáceas y arbóreas en su parte interior. Postgrado del proyecto “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022). Playa en Surgidero de Batabanó, provincia de Artemisa, Cuba.

2.2 Tipos de playas del Gran Caribe según la morfología de la costa y la composición de la arena.

En la literatura especializada se explica cómo la morfología de las costas arenosas es el resultado de la combinación de procesos geológicos e hidrodinámicos y del transporte de sedimentos que dan lugar a playas lineales, encajadas y apoyadas en un extremo. Las playas lineales pueden extenderse decenas de kilómetros y se forman en llanuras costeras donde el lecho rocoso subyacente no influye en su formación; estas playas son el resultado del arrastre de sedimentos que entran en la costa desde tierra o mar y se forman principalmente en los continentes.

En el Gran Caribe continental se puede reconocer con estas características un largo sector de costas arenosas en la Riviera Maya en el estado de Quintana Roo, México, con cerca de 300 km de longitud. Aunque en el Caribe insular hay pocas playas lineales que alcancen varios kilómetros de longitud, se puede destacar el ejemplo de la playa de Varadero en Cuba con 20 km de extensión (Figura 8).

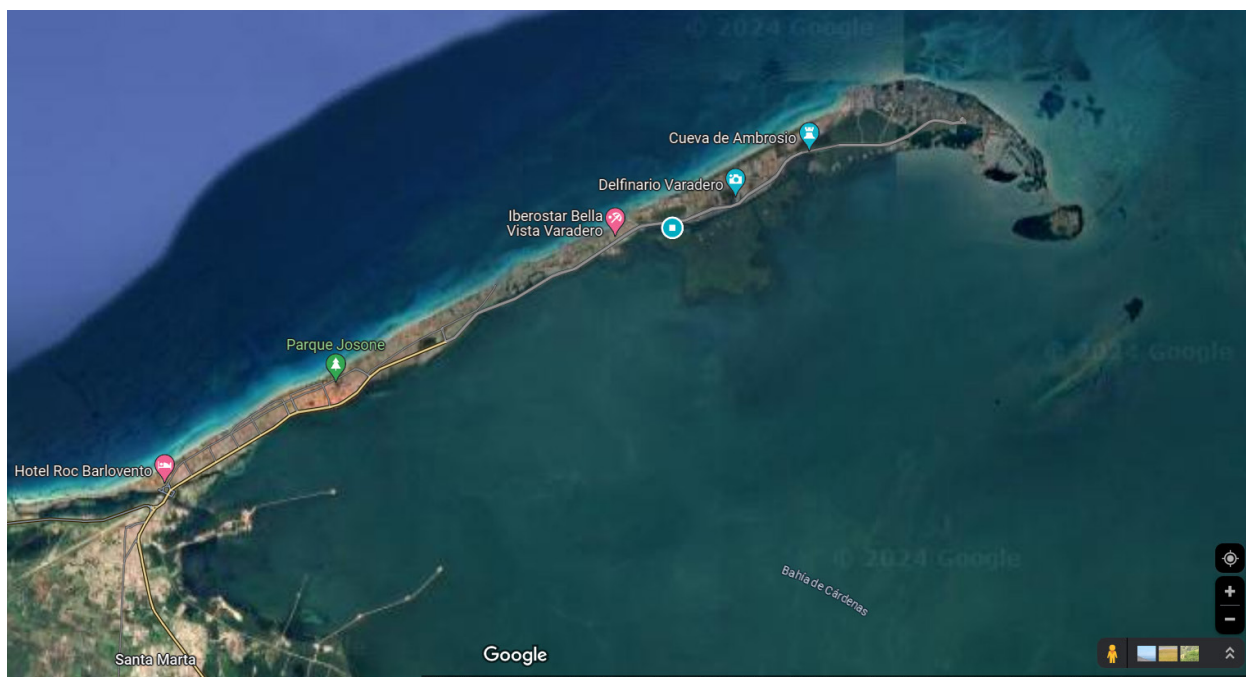


Figura 8 Playa lineal del Caribe insular con unos 20 km de longitud. Playa de Varadero en la Península de Hicacos, Cuba.

Sin embargo, el complejo origen geológico de las costas continentales y las islas de origen volcánico del arco de las Antillas provoca una morfología accidentada que facilita la formación de numerosas playas encajonadas entre dos salientes rocosos con una

configuración en planta de concha o cala. La playa de Las Cuevas en Trinidad y Tobago es un buen ejemplo de este tipo de playa (Figura 9)

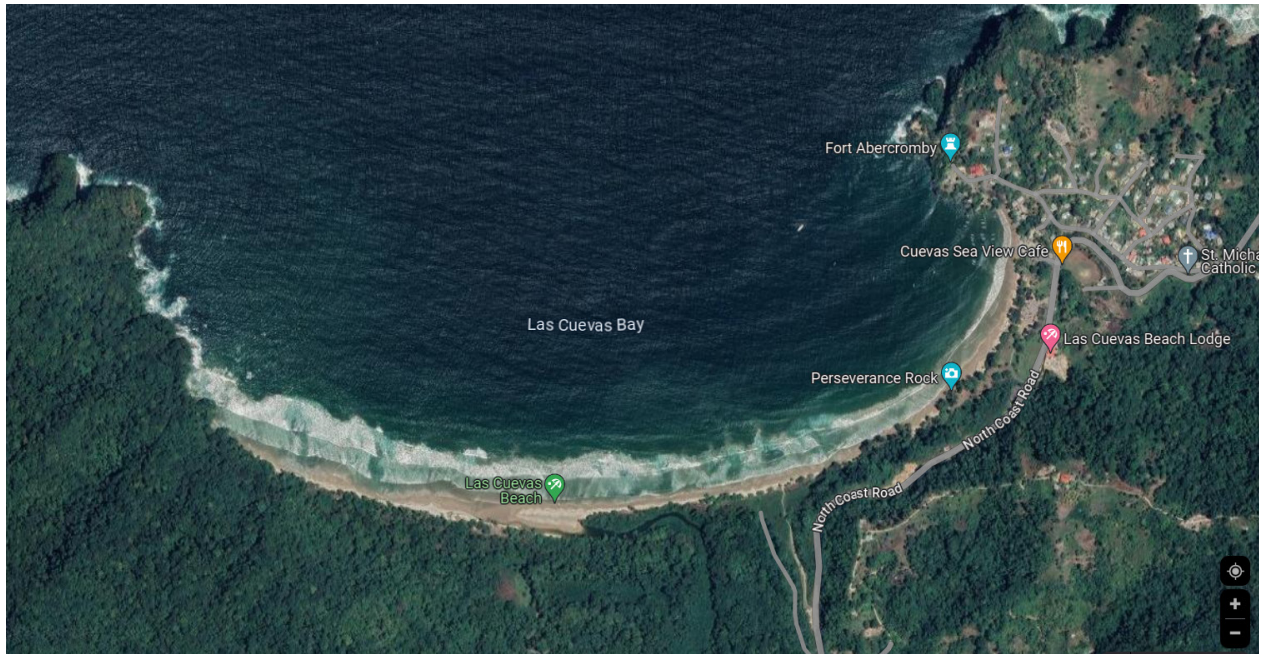


Figura 9 Playa encajonada entre dos salientes rocosos. Playa de Las Cuevas, Trinidad y Tobago.

Las playas apoyadas tienen soporte en un extremo, que suele ser un saliente rocoso, aunque el soporte puede producirse por la existencia de estructuras artificiales (Figura 10)



Figura 10 Playa apoyada por estructura artificial. Punta Cancún. Playa de Cancún, Quintana Roo, México

Por otra parte, la clasificación de las playas en función de la composición de la arena se realiza atendiendo tanto a su granulometría como a la procedencia del material.

Las playas formadas por sedimentos del tamaño de la arena (2-0,062 mm) son las más abundantes en todo el mundo, aunque también las hay de grava (4-2 mm), guijarros pequeños (64-4 mm), guijarros grandes (256-64 mm) y cantos rodados (1024-256 mm), según la clasificación de Wentworth antes mencionada.

Las evaluaciones presentadas por diferentes autores sobre los índices volumétricos que acompañan a cada una de las fuentes de entrada de sedimentos en el océano a nivel mundial muestran que los ríos proporcionan el mayor ingreso de arena a las costas.

La segunda fuente de ingresos la constituye la abrasión de los acantilados; otras contribuciones como la abrasión del talud submarino, los glaciares, el transporte eólico, las erupciones volcánicas y la producción biogénica y química de carbonatos, presentan volúmenes globales considerablemente inferiores, aunque para ciertas zonas del planeta se convierten en los principales ingresos.

La ubicación del Gran Caribe en la franja húmeda del planeta hace que las altas tasas de precipitación en las costas continentales produzcan importantes aportes de sedimentos terrígenos a través de los ríos y consecuentemente la formación de deltas, barras y playas arenosas. En el caso del Caribe insular, las descargas fluviales son menores debido a la corta extensión de las cuencas, pero en épocas torrenciales puede haber aporte de arena, e incluso grava, guijarros y cantos rodados. Por otra parte, el relieve accidentado de las islas ha provocado la formación de sectores de costas escarpadas cuya abrasión también genera ingresos de material arenoso terrígeno.

La arena terrígena abunda en todo el mundo porque el granito es la roca principal que forma el núcleo de los continentes y, a medida que se erosionan los minerales más débiles y menos resistentes, como el feldespato, se desintegran en sedimentos finos dejando atrás los granos más duros de cuarzo (o sílice) del tamaño de la arena junto con porcentajes más pequeños de minerales pesados más resistentes a la abrasión.

Otras fuentes terrígenas son las rocas sedimentarias y metamórficas, que contienen porcentajes variables de material arenoso. La erosión y la meteorización de todas estas rocas proporcionan sedimentos que van desde cantos rodados hasta lodo. Sin embargo, los procesos de erosión y transporte se producen de forma selectiva, de modo

que los finos se transportan más fácilmente en suspensión, las arenas se desplazan por arrastre y salinización a lo largo del fondo y las gravas más gruesas, los guijarros y los cantos rodados se mueven bajo el efecto de las descargas fluviales asociadas a lluvias torrenciales.

La arena, una vez que llega a la costa, se deposita rápidamente formando barras y deltas en las desembocaduras de los ríos. En el caso de la arena cuarzosa, la elevada dureza de sus granos permite transportarla bajo el efecto de la corriente longitudinal sin grandes cambios en sus propiedades mecánicas, formando playas de decenas de kilómetros de longitud.

Otra fuente importante de arena para las costas son los restos esqueléticos carbonatados de los organismos marinos que viven desde las aguas poco profundas hasta la plataforma interior. Aunque los restos carbonatados se rompen y erosionan más fácilmente por procesos físicos, la ubicación de los ecosistemas productores de arena garantiza un suministro continuo, ya que las mareas y las corrientes transportan la arena y el material más grueso hasta la costa. De hecho, las costas formadas por arenas carbonatadas dominan amplias zonas de las costas tropicales y templadas del mundo (Short, 2002), incluido el Gran Caribe, donde hay importantes aportes de arenas carbonatadas marinas asociadas a barreras de arrecifes de coral y praderas marinas.

Otra fuente de arena de interés en las aguas tropicales del Caribe es la de origen químico producto de la precipitación de carbonato cálcico en la columna de agua formando partículas esferoidales de menos de 2 mm de diámetro y alto grado de pureza que se conocen como oolita.

La formación de oolita se produce cuando las aguas más frías del mar abierto cargadas de carbonato cálcico en solución penetran en las aguas poco profundas y cálidas de la plataforma provocando la precipitación de carbonato.

El Gran Banco de las Bahamas es la mayor reserva de arena oolítica del mundo y el Caribe también cuenta con una extensa zona de formación oolítica en la plataforma sureste del Golfo de Batabanó, en Cuba, y aunque en menor medida, la formación oolítica también se ha identificado en otros litorales de la región.

Como resultado de la acumulación de arena oolítica se forman las excelentes playas de arena blanca de las Bahamas y las que se extienden a lo largo de la costa sur del archipiélago de Los Canarreos, en Cuba.

En general, se observa que el Gran Caribe posee una variedad de playas con particularidades morfodinámicas y sedimentológicas que las hacen muy diferentes entre sí, y constituyen el principal recurso natural para el desarrollo de la industria turística.

Debe entenderse que la correcta preservación de las playas del Caribe es, además de una acción para la protección del medio ambiente, una acción para la sostenibilidad del turismo en la región.

2.3. Comportamiento dinámico de una playa. Herramienta para la correcta interpretación de las causas de la erosión de las playas

Las playas constituyen un sistema dinámico que se caracteriza por el intercambio permanente de arena entre los depósitos acumulados en su parte emergente (berma y duna) y las barras de arena del talud sumergido, en función del comportamiento del oleaje.

Al mismo tiempo, el sistema de playas está en la búsqueda permanente del equilibrio entre la arena que entra en él a través de las diferentes vías terrígenas y marinas y la arena que sale del sistema por transporte longitudinal, transporte mar adentro, transporte eólico, destrucción de partículas e incluso por la actividad minera del hombre.

Tanto las entradas como las salidas están condicionadas al comportamiento de los factores hidrodinámicos que condicionan el transporte de arena, principalmente oleaje, mareas y corrientes inducidas. En la Figura 11 se muestra un esquema simplificado del funcionamiento del sistema de playas.

Si en un periodo de varios años la magnitud de los ingresos al sistema es la misma que la de los egresos, significa que el sistema conserva su equilibrio sedimentario y el perfil de la playa mantiene un equilibrio dinámico.

Cuando el equilibrio del sistema se altera por causas naturales o antrópicas con el aumento desproporcionado de los vertidos, se produce la pérdida de arena en el perfil y aparecen los signos de erosión que marcan la tendencia erosiva en el comportamiento de la playa a mediano y largo plazo.

Los signos de erosión como escarpes en el perfil de la playa pueden aparecer como consecuencia del oleaje provocado por temporales ocasionales sin que ello signifique

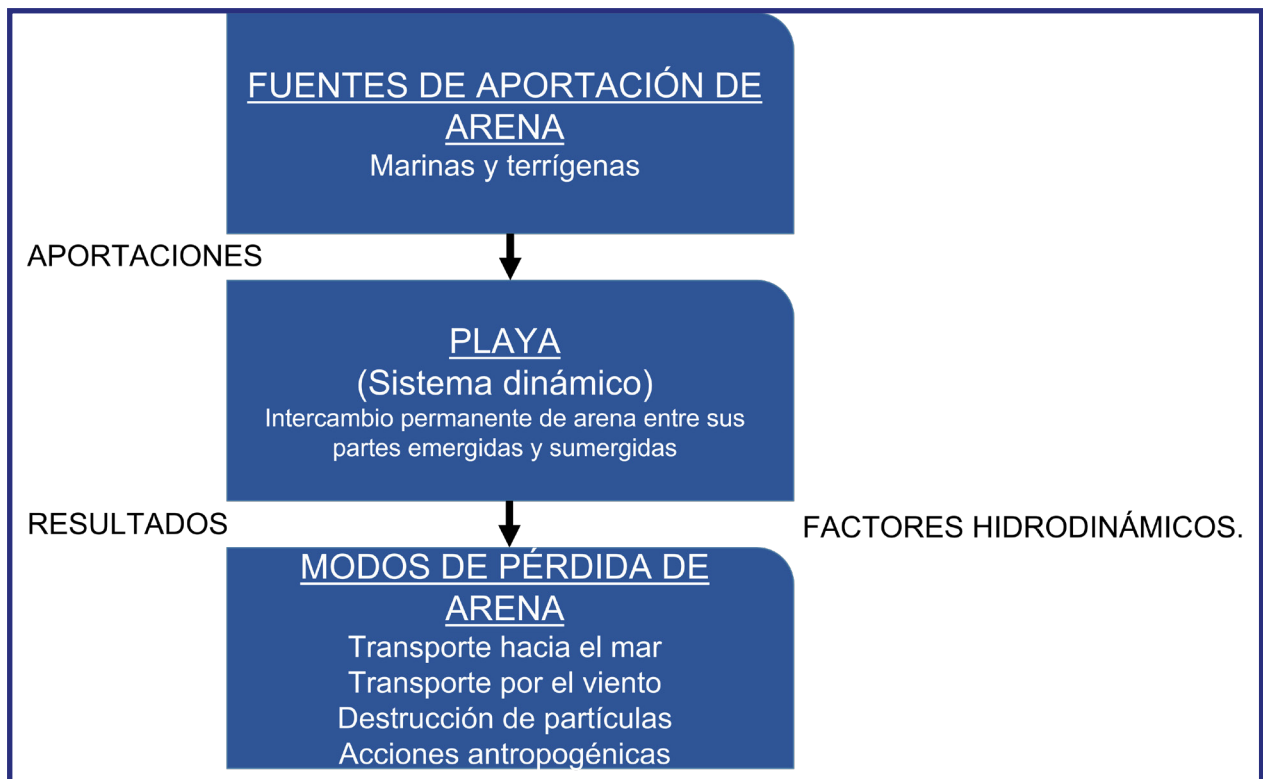


Figura 11 Esquema simplificado del funcionamiento de un sistema de playas. Curso de postgrado del proyecto “Sandy Shorelines”. Juanes (2018, 2021 y 2022)

necesariamente que la playa presente una tendencia erosiva a mediano y largo plazo (Figura 12). Sin embargo, el continuo desplazamiento hacia tierra del escarpe activo en el frente de la duna y la caída de formaciones arbóreas con décadas de existencia es una clara evidencia de la tendencia erosiva de una playa (Figura 13).

Numerosas investigaciones sobre los procesos dinámicos de las playas han propuesto la modelación de la secuencia del comportamiento del perfil y la disposición en planta de la morfología de la playa para una ola dominante de erosión o acreción y con una amplitud de marea no superior a 2m. Short (1999), basado en Short (1979); Wright y Short (1984); Sunamura, (1988) y Lippmann y Holman (1990), proponen la secuencia mostrada en la Figura 14.

El modelo de Short (1999) muestra las diferentes etapas por las que transita la playa desde un perfil disipativo de baja energía de oleaje a un perfil reflectivo de alta energía. Como se muestra en la parte superior de la columna izquierda de la Figura 14 el proceso de transformación comienza con un perfil disipativo en el que la playa presenta una zona de rompiente y una línea de costa y barra regulares en toda su extensión. Con el aumento de la energía de las olas, se producen cuatro etapas intermedias con el desplazamiento de la barra hacia la orilla.



Figura 12: Un escarpe en la playa causado por una tormenta ocasional en la Costa Dorada (David J. Morgan)



Figura 13 Desplazamiento hacia tierra del escarpe activo como evidencia clara de la tendencia erosiva de una playa. Granville, Cedros, Trinidad.

También hay que señalar que teniendo en cuenta la altura y el periodo del oleaje, la pendiente de la playa y las características granulométricas de la arena, Short (1999) propuso un nomograma que permite evaluar de forma numérica la tendencia de la playa hacia una morfología disipativa, intermedia o reflectiva.

En el caso del Gran Caribe, la abundancia de playas con ingresos de sedimentos biogénicos dificulta la evaluación de las causas que pueden provocar déficits de ingresos al sistema o aumentar sus pérdidas.

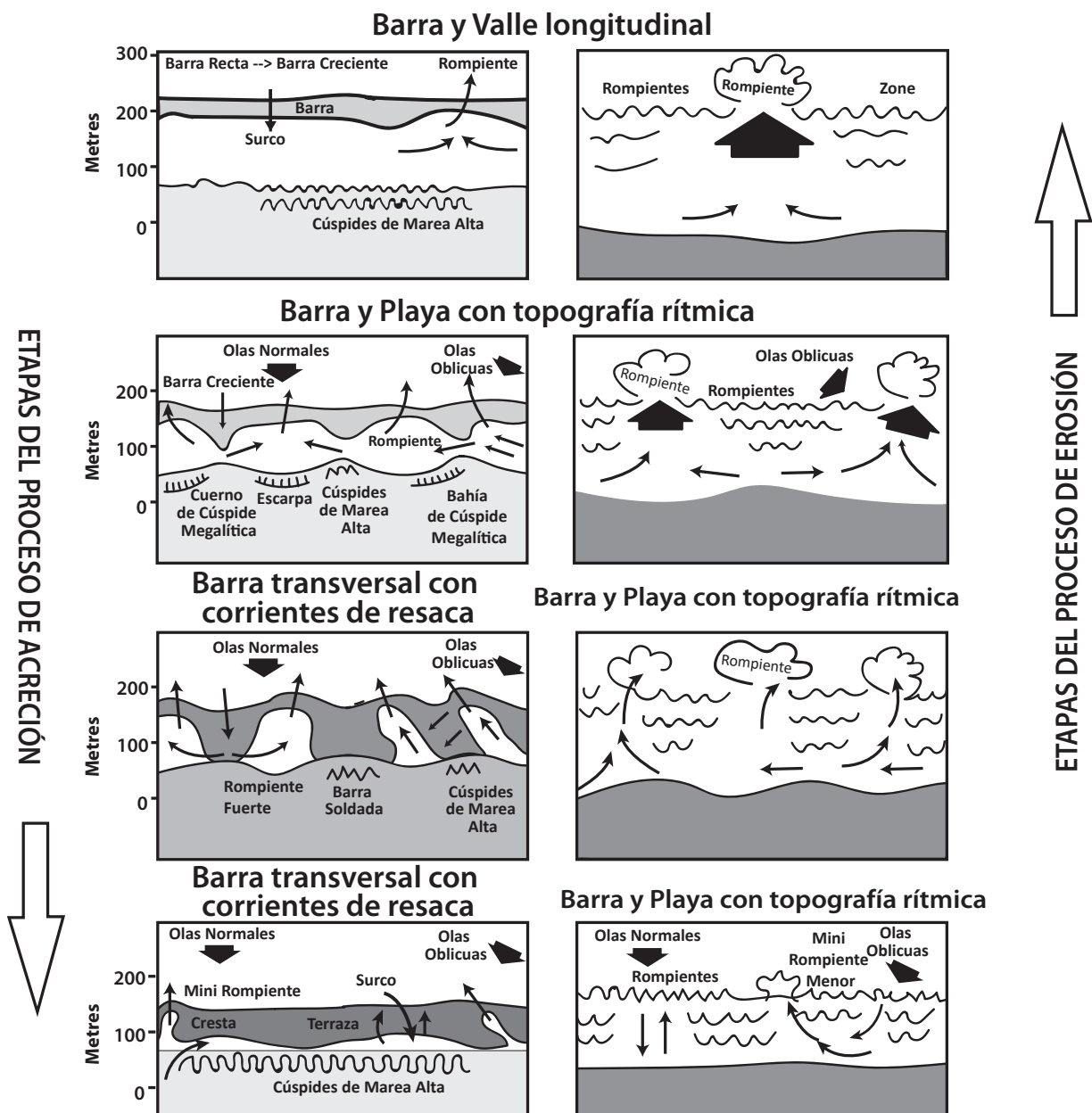


Figura 14 Vista en planta de la secuencia de cambios en la morfología de la playa y su área submarina en un proceso de acreción (gráfico izquierdo) y en un proceso erosivo (gráfico derecho) (Short (1999), basado en Short (1979); Wright y Short (1984); Sunamura



Figura 15 Barra transversal con corrientes de retorno al lado para unirse a la orilla y formar un perfil reflectivo.

No es habitual en los proyectos tradicionales de ingeniería costera buscar las causas de la erosión en los factores que afectan la producción de arena biogénica. Por ejemplo, al paso de un evento meteorológico, se calcula la arena perdida en la playa para conocer el volumen necesario para su reposición aplicando la nutrición artificial de playas, pero no se investiga cuánto disminuirán los nuevos ingresos naturales debido a los efectos sobre el ecosistema productor de arena.

Del mismo modo, es habitual señalar la subida del nivel del mar asociada al cambio climático como causa de erosión, teniendo en cuenta lo que supone en el aumento de la energía de las olas, pero poco se sabe de los efectos que puede provocar el aumento de la temperatura y la acidificación de las aguas en los organismos marinos que producen arena.

Tampoco se evalúan suficientemente como causas de los déficits de aporte natural de arena en las playas biogénicas otros efectos producto de la actividad humana en el medio marino, como la contaminación del agua, el uso de artes de arrastre y los daños causados a los arrecifes de coral.

2.4. La playa como parte de los ecosistemas marino-costeros del Gran Caribe.

Cuando se trata de investigar los ecosistemas marinos y costeros (sobre todo en el Gran Caribe), se presta mucha más atención a los arrecifes de coral, las praderas marinas y los manglares que a las playas de arena; esto se explica teniendo en cuenta la extensión, la biodiversidad y los servicios que ofrecen al hombre estos otros ecosistemas.

En la medida en que las playas han adquirido mayor atención por sus servicios ambientales como recurso para el desarrollo del turismo, más allá de la minería irracional o de la función histórica de varadero para las embarcaciones de los pescadores, también ha ido creciendo el interés por conocer sus funciones como parte de los ecosistemas costeros.

Brown y McLachlan (1984) explican que los estudios sobre el ecosistema de las playas comenzaron mucho más tarde que los que se habían realizado en otros ecosistemas, incluso en costas rocosas.

Ya en la actualidad se han descrito muchas de las especies de flora y fauna que consiguen sobrevivir en este entorno dinámico gracias a los mecanismos de adaptación que poseen, tanto en la zona de rotura del talud submarino, como en la propia playa emergida. También hay que señalar que los biólogos consideran que la duna, con su vegetación y fauna terrestres, forma parte del ecosistema de la playa.

Pero no es objetivo de esta guía profundizar en la descripción de las particularidades del ecosistema de la playa a través del estudio de las especies que lo habitan o de los mecanismos de la cadena trófica o del flujo de energía.

Como se mencionó anteriormente, muchas playas en la región están compuestas por arenas biogénicas, formadas a través de la destrucción mecánica de restos calcáreos de algas, moluscos, foraminíferos y corales, entre otros organismos.

En este caso, resulta de especial interés destacar la interdependencia que existe entre los ecosistemas marinos y costeros como un único sistema, de forma que su contribución al proceso de formación de playas biogénicas se haga más visible.

De acuerdo con los resultados de Chave, et. al (1972) citados por Zafianov (1978),

es muy similar el cálculo de la producción potencial de la mayoría de los tipos de corales, algas verdes halimedes y penicillus, algas rojas, micro y macro moluscos y foraminíferos, lo que lleva a la conclusión de que su magnitud es del orden de 10^4 g de CaCO_3 / m^2 / año, (10 kg / m^2 / año).

Llama la atención que estos organismos presentan diferencias en la duración de su ciclo vital del orden de dos magnitudes y una diferencia de masa entre ellos del orden de cinco veces, y sorprende cómo, pese a estas diferencias, la producción potencial de CaCO_3 de los mismos es muy similar. Sólo en el caso del coral acropora es superior, con un valor de $105\text{g}/\text{m}^2/\text{año}$.

Aunque para las fuentes terrígenas se han establecido métodos que garantizan la cuantificación de los volúmenes de entrada en el balance sedimentario, en el caso de las fuentes biogénicas las estimaciones se obtienen en un marco experimental y no aparecen en los manuales procedimientos específicos para su cálculo.

Síntesis

Considerando que el proceso de erosión en muchas playas del Caribe afecta las dunas (GPA, PNUMA, 2003), el proyecto “Sandy Shorelines” propone la terminología del perfil de playa que se muestra en la Figura 3 del apartado 1. Esta propuesta defiende la idea de incluir la duna como parte de la terminología del perfil dinámico de la playa valorando también el papel que juega la vegetación como elemento disipador de energía durante el oleaje extremo y como barrera de contención de la arena arrastrada por el viento, fenómenos muy bien observados en el Gran Caribe. La importancia práctica de disponer de una definición de los límites de la playa en función de sus particularidades morfodinámicas responde a la necesidad de disponer de criterios técnicos que aseguren la correcta gestión de las playas.

Según sus características morfodinámicas y sedimentológicas, el Gran Caribe presenta una gran variedad de playas. En las zonas continentales predominan las playas de arenas terrígenas alimentadas principalmente por ríos y acantilados con una ubicación precisa de los sitios de entrada de sedimentos desde tierra a la costa. En las islas predominan las playas formadas por arenas carbonatadas biogénicas alimentadas por praderas marinas y barreras arrecifales cuya localización es dispersa en la plataforma submarina con una ubicación imprecisa de la entrada de sedimentos desde el mar a la costa. Se debe estudiar especialmente esta particularidad de las playas biogénicas a la hora de evaluar alternativas de ingeniería para el control de la erosión.

Es tarea de los centros de ciencias marinas del Gran Caribe, profundizar en las investigaciones de las tasas de producción de arena de los ecosistemas marinos y los procesos que forman las playas biogénicas.

Capítulo 3

EROSIÓN EN LAS PLAYAS DEL CARIBE

La erosión y la acreción costeras son procesos dinámicos y naturales que dan forma a las costas de los océanos y mares del mundo. En la región del Caribe, estos procesos tienen especial importancia debido a la dependencia del turismo y a la biodiversidad única presente en los ecosistemas costeros. El objetivo de este capítulo es ofrecer una perspectiva amplia de los procesos básicos de erosión y acreción que tienen lugar en las playas del Caribe. El análisis exhaustivo de estos procesos puede ayudar a dilucidar los factores que contribuyen a los cambios observados en los entornos costeros, abriendo el camino a estrategias eficaces de mitigación y gestión.

El Caribe, con sus impresionantes playas, sus diversos ecosistemas marinos y sus vibrantes culturas, es una región que cautiva la imaginación de muchos. Sin embargo, estas mismas características lo hacen especialmente susceptible a los impactos de la erosión y la acreción costeras. En este capítulo nos adentraremos en la complejidad de las causas naturales y antrópicas que impulsan estos procesos, así como en los ciclos estacionales de erosión que influyen aún más en la dinámica de las costas de la región. Este conocimiento es crucial para el desarrollo y la aplicación de soluciones sostenibles que preserven el medio ambiente costero del Caribe y los medios de subsistencia que dependen de él.

3.1. Extensión e intensidad de la erosión.

3.1.1. Panorama de la erosión costera en el Caribe

La erosión costera es un problema importante que afecta la región del Caribe y que ya ha causado importantes daños medioambientales y económicos. La región del Caribe es vulnerable a la erosión costera debido a una serie de factores naturales y antropogénicos. Los factores naturales incluyen la energía de las olas, el viento y las variaciones del nivel del agua, mientras que los factores antropogénicos incluyen el desarrollo del litoral, la extracción de arena y las actividades de dragado. Estas actividades pueden causar daños importantes al entorno costero natural y tener un impacto perjudicial en las comunidades locales (Figura 16).



Figura 16 Erosión catastrófica y daños a las infraestructuras en Puerto Rico a causa del huracán María

3.1.2. Distribución geográfica y variaciones

La distribución espacial de la erosión costera en el Mar Caribe no es uniforme, ya que en ella influyen diversos factores como la geología, la energía del oleaje, la subida del nivel del mar, la actividad humana y los fenómenos de temporales. La erosión costera en el Caribe puede caracterizarse por los siguientes rasgos:

Las Antillas Mayores, que incluyen islas como Cuba, La Española, Jamaica y Puerto Rico, experimentan distintos grados de erosión costera. Las costas septentrionales y orientales están más expuestas al océano Atlántico y, por tanto, son más propensas a la erosión causada por la acción de las olas y las mareas de tempestad.

Las Antillas Menores, una cadena de islas más pequeñas que se extienden desde las Islas Vírgenes hasta Trinidad y Tobago, también se ven afectadas por la erosión costera. Las costas orientales, expuestas al océano Atlántico, son más susceptibles a la erosión debido a la acción de las olas y las tormentas.

Costas centroamericanas: Las costas caribeñas de países centroamericanos como Belice, Costa Rica y Panamá también se enfrentan a la erosión costera, sobre todo en zonas con llanuras costeras bajas y playas arenosas.

Costas sudamericanas: Las costas caribeñas de países sudamericanos como Colombia y Venezuela también experimentan erosión costera, con intensidad variable en función de las condiciones geológicas y oceanográficas locales.

Al comparar la erosión costera en el Mar Caribe con otras regiones del mundo, es importante tener en cuenta los factores que contribuyen a la erosión, como:

- Subida del nivel del mar. El aumento global del nivel del mar afecta a todas las zonas costeras, pero el Caribe es especialmente vulnerable debido a sus islas bajas y llanuras costeras.
- Tormentas. El Caribe es propenso a los huracanes y las tormentas tropicales, que causan una erosión importante debido a las mareas de tempestad, las fuertes lluvias y la acción de las olas. Otras regiones, como las costas atlánticas y del Golfo de Estados Unidos, el sudeste asiático y las islas del Pacífico, también sufren erosión costera debido a las tormentas.
- Actividad humana. El desarrollo costero y los cambios del uso del suelo pueden exacerbar la erosión costera. Esto es cierto no sólo en el Caribe, sino también en otras regiones como el Mediterráneo, la costa del Mar del Norte de Europa y la costa atlántica y del Golfo de Estados Unidos.
- Geología. La geología subyacente de una región desempeña un papel importante a la hora de determinar la susceptibilidad de las costas a la erosión. Por ejemplo, las costas rocosas, como las del Mediterráneo y Australia, pueden ser más resistentes a la erosión que las arenosas o fangosas, como las del Caribe y el Sudeste Asiático.

En resumen, la erosión costera en el Mar Caribe es espacialmente diversa y está influenciada por una serie de factores. Aunque existen similitudes con otras regiones del mundo, la intensidad y el alcance de la erosión costera pueden variar en función de las condiciones locales y regionales.

3.1.3. Impactos económicos y ambientales de la erosión.

La erosión costera de las playas del Caribe plantea importantes desafíos económicos y medioambientales (Cambers, 1998; Cambers, 2009). Desde el punto de vista económico, el Caribe depende en gran medida del turismo, siendo las playas vírgenes uno de los principales atractivos para los visitantes. A medida que la erosión costera degrada estas playas, la industria turística se enfrenta a una posible disminución de los ingresos, lo que afecta las economías locales y las oportunidades de empleo. Además, la pérdida de tierras costeras a causa de la erosión puede afectar las infraestructuras, incluidos el transporte, las comunicaciones y la vivienda, con los correspondientes costes de reconstrucción y reubicación. Desde el punto de vista medioambiental, la erosión costera perturba ecosistemas frágiles, en particular los sistemas de dunas costeras y los manglares, que sirven de hábitats cruciales para diversas especies y actúan como barreras naturales contra tormentas e inundaciones. Además, la erosión de las zonas costeras puede provocar la intrusión de agua salada en las fuentes de agua dulce, lo que afecta negativamente la calidad del agua y su disponibilidad tanto para el consumo humano como para la agricultura.

3.2. Erosion vs. accretion.

La erosión costera y la acreción de arena son dos procesos naturales opuestos que pueden darse en las playas del Mar Caribe. La erosión costera se refiere a la pérdida gradual de sedimentos de la playa debido a factores naturales y/o antropogénicos. Con el tiempo, la playa puede hacerse más estrecha o incluso desaparecer. Por otro lado, la acreción de arena se refiere a la acumulación gradual de sedimentos en una playa. Esto puede ocurrir de forma natural por la deposición de arena procedente de fuentes marinas o por intervenciones humanas como los proyectos de alimentación de playas. La acumulación de arena puede ayudar a mitigar el impacto de la erosión costera e incluso puede provocar la expansión de la playa con el tiempo. Aunque ambos procesos pueden darse en las playas del Mar Caribe, la erosión costera suele ser mucho más común y puede acarrear pérdidas económicas, sobre todo para las comunidades que dependen del turismo como principal fuente de ingresos. En cambio, la acumulación de arena puede tener efectos positivos en el entorno de la playa y la comunidad circundante.

Un concepto importante que ayuda a esclarecer los procesos de erosión costera es el balance de sedimentos (Figura 17). En el contexto de los sistemas costeros, el balance

de sedimentos se refiere al equilibrio entre las entradas (suministro de sedimentos) y salidas (eliminación de sedimentos) de arena y otros sedimentos a lo largo de una costa. Este equilibrio viene determinado por procesos naturales como la acción de las olas, las corrientes litorales, las mareas y la descarga de los ríos, así como por actividades humanas como la alimentación de las playas, la extracción de arena y la construcción. Es importante destacar que la arena no simplemente desaparece de un sistema costero a menos que se extraiga con fines como la construcción, o se pierda en aguas profundas donde la acción de las olas ya no puede transportarla de vuelta a la playa sumergida. Cuando la arena se extrae o queda atrapada en aguas profundas, el balance de sedimentos se vuelve negativo, lo que provoca un déficit que puede agravar la erosión costera. Por lo tanto, mantener un balance sedimentario equilibrado es esencial para preservar la estabilidad y resistencia de los entornos costeros y mitigar los impactos de la erosión costera. Todas las causas de erosión afectan de alguna manera el balance de sedimentos, creando un déficit de arena en un lugar concreto durante un periodo de tiempo determinado.

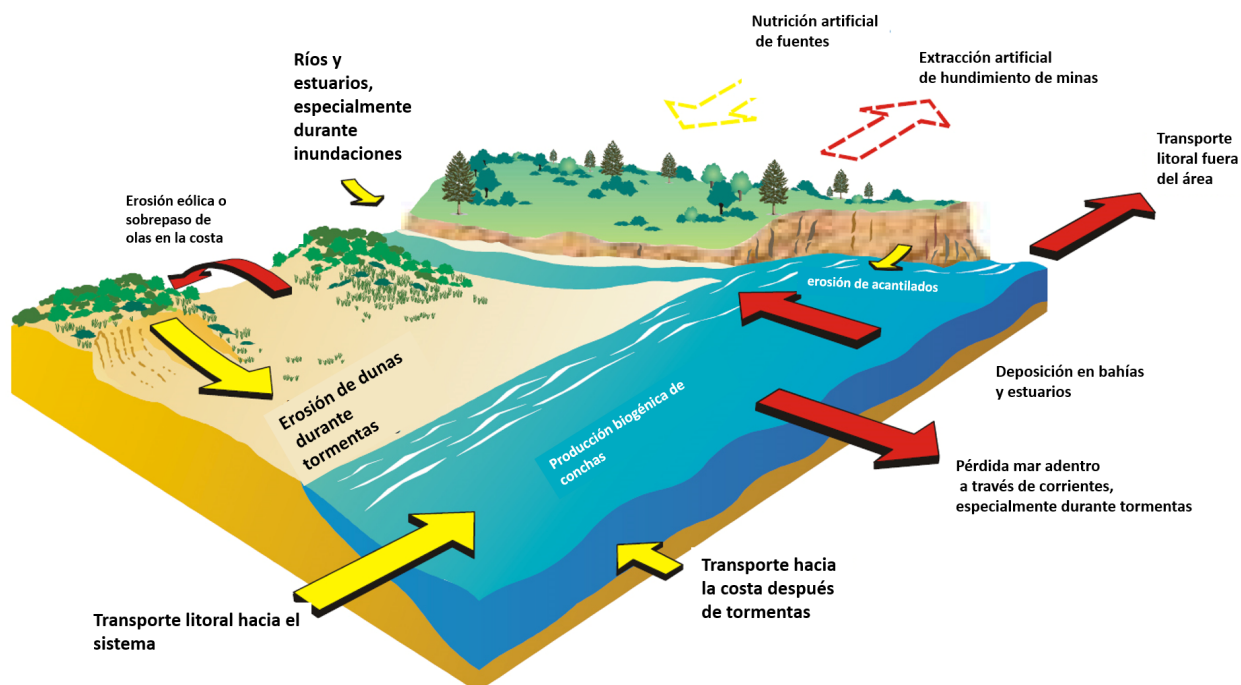


Figura 17 Algunos componentes de un presupuesto sedimentario, tomados del Departamento de Nueva Gales del Sur de Conservación de Tierras y Aguas 2001, *Gestión de Dunas Costeras: Un Manual de Técnicas de Gestión y Rehabilitación de Dunas Costeras*, Unidad Costera, DLWC, Newcastle.3.3 Causas naturales y antropogénicas de la erosión.

3.3. Natural and anthropogenic causes of erosion.

La erosión costera es un proceso natural que se produce debido a diversos factores geológicos y medioambientales. Sin embargo, la actividad humana ha acelerado considerablemente la erosión costera en los últimos años, causando importantes daños medioambientales y económicos. Existen causas naturales y antropogénicas de la erosión costera que es necesario abordar para mitigar sus impactos. En el Mar Caribe, las fluctuaciones del nivel de las mareas son relativamente pequeñas y el transporte de sedimentos suele estar dominado por las olas generadas por el viento. En las páginas siguientes repasaremos algunas causas naturales y antropogénicas de la erosión.

3.3.1. Factores naturales de la erosión.

Entre las causas naturales de la erosión costera figuran la migración a largo plazo de sedimentos, los fenómenos meteorológicos extremos como los huracanes y la variabilidad a largo plazo del clima de olas. Estos factores naturales pueden causar fluctuaciones en la cantidad de sedimentos depositados o retirados de las playas, provocando erosión en algunas zonas.

Las olas y las corrientes son importantes causas naturales de la erosión costera en el Caribe. La acción de las olas remodela constantemente el litoral transportando arena y sedimentos a lo largo de la costa, un proceso conocido como deriva litoral. Las fuertes corrientes pueden remover grandes volúmenes de sedimentos de las playas, provocando la erosión. Las playas del Caribe expuestas al Océano Atlántico experimentan una mayor energía de las olas, lo que puede aumentar la tasa de erosión.

El Caribe es propenso a huracanes y tormentas tropicales, que traen consigo vientos intensos, lluvias torrenciales y mareas de tempestad. Las mareas de tempestad son el resultado de la combinación de una baja presión atmosférica y fuertes vientos, lo que provoca una subida del nivel del mar que puede inundar las zonas costeras, erosionando las playas y desestabilizando los accidentes geográficos costeros. Los huracanes también pueden generar grandes olas que contribuyen a una erosión importante y al transporte de sedimentos a lo largo de la costa.

A escalas de tiempo más largas, la dinámica del relieve costero también afecta los procesos naturales de erosión costera. Las características geológicas y geomorfológicas de una costa influyen en su susceptibilidad a la erosión. Por ejemplo, los sedimentos

1



• Water Levels

- Astronomical Tides
- storm Surge
- Annual to Inter-annual variability (e.g. ENSO)
- Sea Level Rise

2



• Waves

- Storms
- Seasonal Variability
- Annual to Inter-Annual variability (e.g. ENSO)
- Sea Level Rise

3



• Sediment Supply

- Cross Shore
- Long Shore
- Offshore loss/ Supply
- Rivers

4



• Human Impact

- Coastal Squeeze
- Engineering
- Construction (Sand Mining)

Figura 18: Factores que afectan la erosión costera y el transporte de sedimentos, de Splinter y Coco (2021).

blandos, como la arena y el barro, son más vulnerables a la erosión que las costas rocosas. En el Caribe, la diversidad de formas del relieve costero, desde playas arenosas y dunas hasta acantilados y manglares, da lugar a tasas de erosión variables en toda la región.

3.2.2. Causas antropogénicas de la erosión.

Las estructuras artificiales pueden ser una causa importante de erosión de las playas si se diseñan de forma incorrecta o si tienen consecuencias imprevistas. Las estructuras artificiales como espigones, rompeolas, diques y revestimientos que se construyen perpendiculares o paralelos a la orilla, como se muestra en la Figura 19, pueden interrumpir el transporte natural de sedimentos y causar erosión en determinadas zonas (Silva et al., 2018).

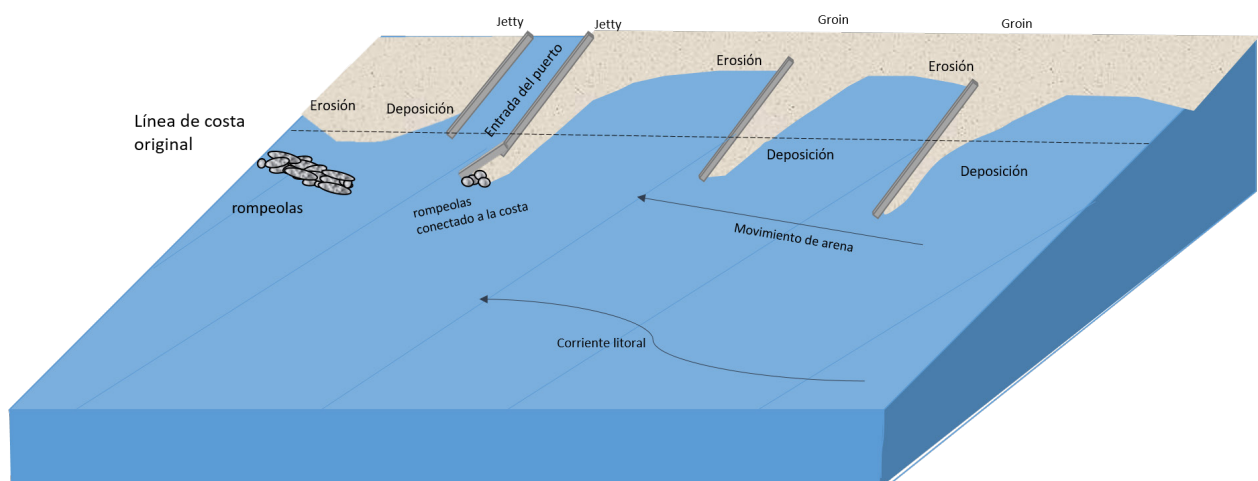


Figura 19 Interrupción del transporte de sedimentos a lo largo de la costa a causa de estructuras costeras, de <https://anerosion.weebly.com/coastal-processes.html>

Los diques y otras estructuras paralelas a la costa pueden provocar una reflexión excesiva de las olas, dificultando el crecimiento natural de la playa y provocando su erosión (Figura 20). Además, pueden interrumpir el intercambio natural de sedimentos entre la playa y el sistema de dunas. Otras estructuras de endurecimiento de la costa, como los revestimientos, también pueden impedir la migración natural de la playa e interrumpir los procesos naturales, lo que conduce a la erosión (Nicholls et al., 2018).

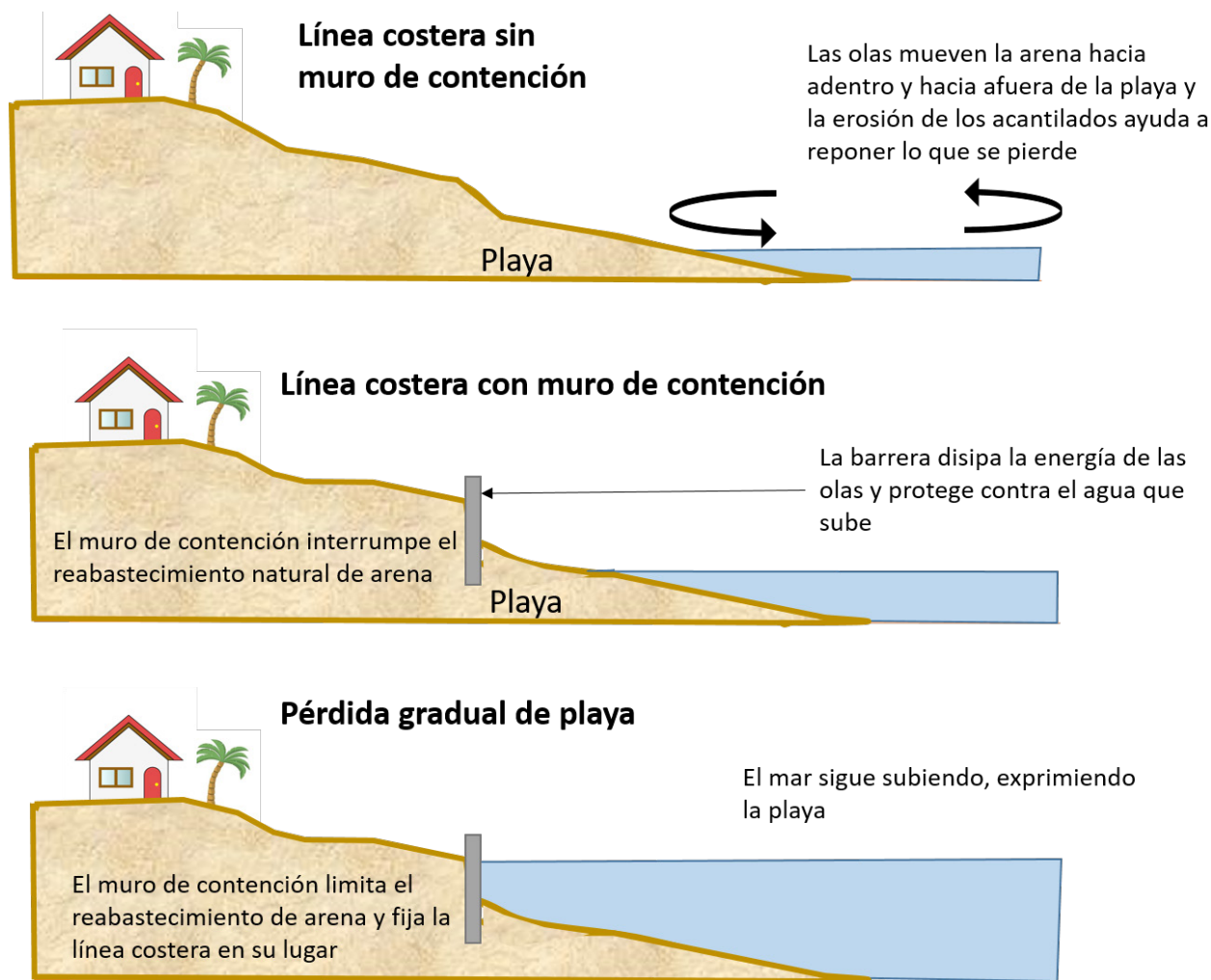


Figura 20 La relación entre los muros de contención y la pérdida de playas. Desde <https://www.surfrider.org/coastal-blog/entry/seawalls-are-stealing-our-sandy-beaches>

La interrupción a gran escala de las fuentes de sedimentos debido a la actividad humana es también una preocupación importante. Las actividades mineras y de construcción pueden destruir dunas de arena, eliminando una fuente crucial de sedimentos y poniendo en peligro la barrera natural que protege la costa de la erosión. La canalización de los ríos y la construcción de presas pueden disminuir la carga de sedimentos que transportan los ríos a la costa, provocando déficits de sedimentos y agravando la erosión costera. Además, las actividades de dragado pueden desestabilizar el lecho marino, interrumpir el transporte de sedimentos y aumentar la turbidez, provocando la erosión de las playas y la degradación de los hábitats costeros.

Una de las causas más comunes y evitables de la erosión es la destrucción antropogénica de las barreras costeras. Las actividades humanas como la deforestación y el relleno de humedales pueden destruir los manglares, mientras que la sobrepesca, las prácticas

pesqueras destructivas y la contaminación pueden dañar los arrecifes de coral. Estas barreras naturales proporcionan protección contra las olas y las tormentas, pero cuando se destruyen, dejan las costas más vulnerables a la erosión (Mumby et al., 2018). Hay ejemplos concretos en el mar Caribe de zonas de arrecifes de coral degradados que provocan una erosión más grave (Reguero et al., 2018). También hay estudios cuantitativos que muestran la importancia económica de los arrecifes para proteger las propiedades y la economía costeras (Storlazzi et al., 2021).

El cambio climático está exacerbando la erosión costera al aumentar la frecuencia e intensidad de las tormentas, contribuir a la subida del nivel del mar y alterar los patrones meteorológicos. Estos factores pueden acelerar las tasas de erosión en el Caribe y otras regiones costeras, amplificando los impactos de las causas naturales y antropogénicas de la erosión. El aumento mundial del nivel del mar, impulsado principalmente por el cambio climático, es otro factor que contribuye a la erosión costera en el Caribe. A medida que sube el nivel del mar, la línea de costa retrocede hacia tierra, provocando la inundación y erosión de las zonas costeras. Las islas bajas y las llanuras costeras del Caribe son especialmente vulnerables a los efectos de la subida del nivel del mar. La erosión provocada por el cambio climático es también una preocupación creciente. Con el aumento del nivel del mar y la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, es probable que la erosión costera se convierta en un problema aún más importante en el futuro (Reguero et al., 2015). Las comunidades costeras tendrán que desarrollar estrategias de adaptación para hacer frente a los impactos del cambio climático en dichas zonas.

3.4. Identificación de los ciclos y fenómenos de erosión

La erosión y la acreción de las playas se producen en distintas escalas de tiempo, lo que refleja la complejidad de los sistemas costeros y sus interacciones con los fenómenos oceanográficos. Estas escalas de tiempo pueden clasificarse en general en episódicas, estacionales/anuales y a largo plazo/crónicas.

Episódica - acontecimientos extremos:

- Huracanes: Los ciclones tropicales pueden provocar una rápida y grave erosión de las playas debido a las mareas de tempestad, las lluvias torrenciales y el fuerte oleaje. Los impactos de los huracanes en las playas pueden ser tanto efímeros como duraderos, dependiendo de la intensidad de la tormenta y de la resistencia del sistema costero (Figura 21 y Figura 22).

- **Marejadas invernales:** En algunas regiones, las tormentas invernales generan potentes marejadas que pueden causar erosión episódica de las playas. Estos fenómenos pueden provocar cambios temporales en la morfología de la playa, como la formación de escarpes o la retirada de arena de la playa superior.

Respuesta estacional / anual al clima de oleaje anual:

- **Clima de oleaje estacional:** Las playas pueden experimentar cambios estacionales en respuesta a las variaciones de energía y dirección de las olas a lo largo del año. Por ejemplo, el aumento de la energía de las olas durante los meses de invierno puede causar erosión, mientras que unas condiciones de oleaje más tranquilas durante el verano pueden favorecer la acreción y la recuperación de la playa. En algunas regiones, los patrones estacionales del viento pueden influir en el movimiento de sedimentos a lo largo de la costa. Estos cambios estacionales del transporte de sedimentos pueden dar lugar a periodos alternos de erosión y acreción.

A largo plazo / Crónica - respuesta al aporte de sedimentos a largo plazo, tectónica, etc.:

- **Aporte de sedimentos a largo plazo:** Las playas pueden experimentar erosión o acreción a largo plazo en función del equilibrio entre las entradas de sedimentos (por ejemplo, descarga fluvial, erosión de acantilados) y las salidas (por ejemplo, transporte de sedimentos, pérdida mar adentro). Los cambios en el aporte de sedimentos debido a procesos naturales o a actividades humanas pueden provocar una erosión o acreción crónica a lo largo de años o décadas.
- **Tectónica:** La actividad tectónica puede influir en la erosión y la acreción de las playas a largo plazo, provocando cambios en la elevación del terreno o alterando el balance regional de sedimentos. Por ejemplo, el levantamiento tectónico puede hacer que una costa sea más resistente a la erosión, mientras que el hundimiento puede hacerla más vulnerable a la subida del nivel del mar y a la erosión.
- **Aumento del nivel del mar:** La subida del nivel del mar a largo plazo, impulsada por el cambio climático, puede provocar una erosión costera crónica a medida que la línea de costa retrocede hacia tierra. Este proceso puede ser especialmente marcado en las zonas costeras bajas y en las islas pequeñas.

Comprender las diferentes escalas de tiempo de la erosión y la acreción de las playas es esencial para una gestión costera eficaz y para el desarrollo de estrategias de adaptación que protejan a las comunidades y ecosistemas costeros de los impactos de la erosión costera. En el Capítulo 4 se analizan en detalle las técnicas de seguimiento que permiten cuantificar estos cambios en la anchura de las playas.

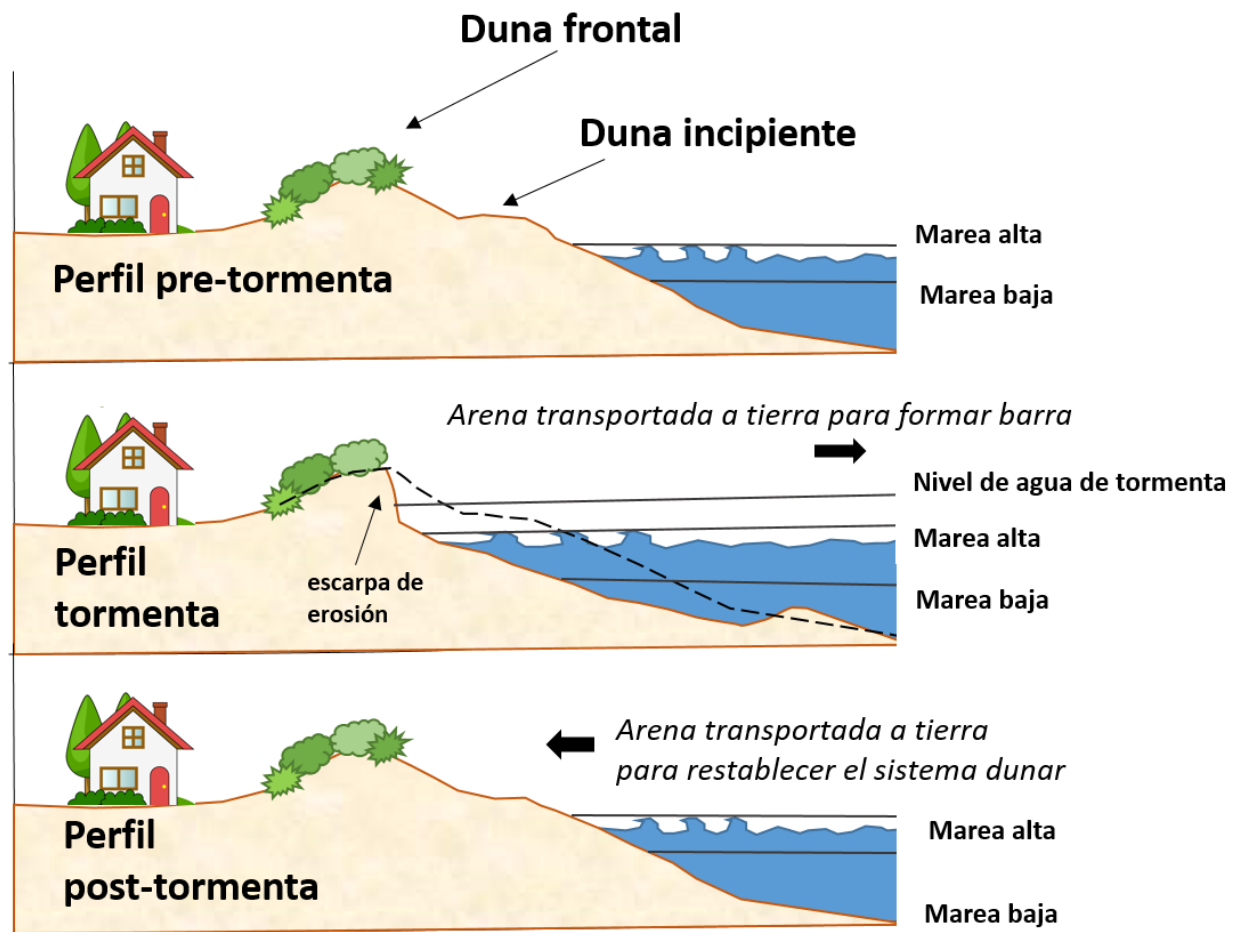


Figura 21 Ciclo típico de erosión y acreción de la playa en un caso sin pérdida permanente de arena. Tomado de <https://www.environment.nsw.gov.au/resources/coasts/coastal-dune-mngt-manual.pdf>

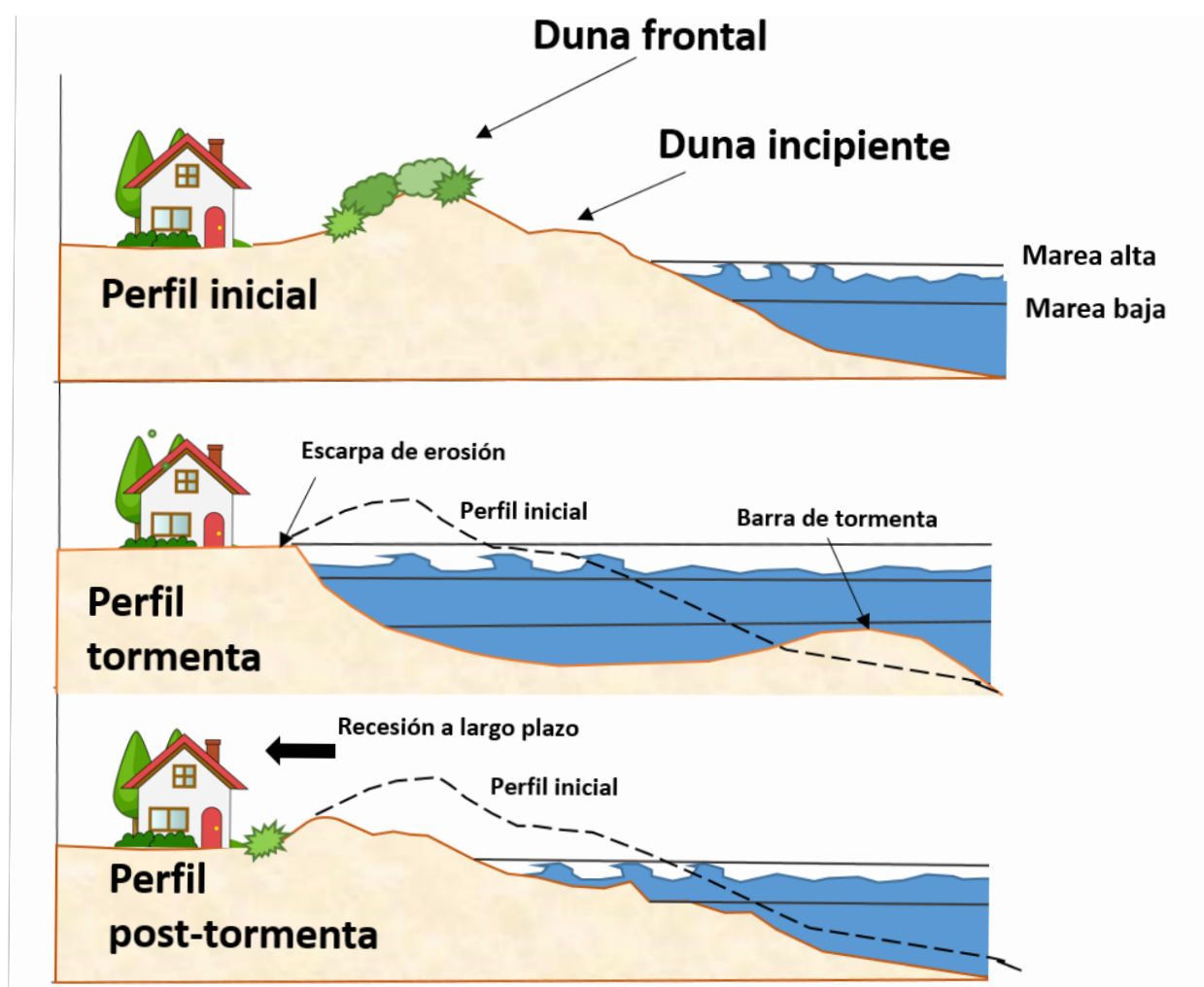


Figura 22 Patrón típico de erosión de una playa con tendencia a la erosión a largo plazo. Tomado de <https://www.environment.nsw.gov.au/resources/coasts/coastal-dune-mngt-manual.pdf>

Síntesis

En conclusión, la erosión costera es un proceso complejo que puede tener importantes repercusiones medioambientales y económicas. Aunque las causas naturales de la erosión no pueden evitarse totalmente, las causas antropogénicas pueden y deben mitigarse. Las estrategias para hacer frente a las causas antropogénicas de la erosión deben dar prioridad a la protección de las barreras naturales, reduciendo la interrupción de las fuentes de sedimentos y limitando el uso de estructuras que endurezcan la línea de costa. Además, las comunidades deben desarrollar estrategias de adaptación para hacer frente a los impactos del cambio climático en las zonas costeras. Tomando medidas para mitigar las causas antropogénicas de la erosión costera, podemos ayudar a proteger nuestras costas y preservar nuestros recursos naturales.

Capítulo 4

MONITOREO DE LA EROSIÓN COSTERA

El monitoreo periódico de la erosión es un requisito esencial para la gestión y la prevención de este fenómeno, ya que permite comprender mejor la dinámica en juego a diferentes escalas de tiempo y espacio, y orientar las medidas de mitigación que deben aplicarse.

De hecho, es importante distinguir los ciclos estacionales, anuales o incluso plurianuales de los impactos de eventos y las tendencias a largo plazo (cambio climático), tal y como se describe en el Capítulo 3. Además, las observaciones deben distinguir los efectos en los distintos compartimentos de la playa (Capítulo 2) para ofrecer una visión integrada del sistema de playas.

Un ejemplo típico es la desaparición parcial o total de una playa tras una tormenta o ciclón. Sin monitoreo ni observación, puede resultar tentador para un gestor poner en marcha obras de ingeniería costera para detener el fenómeno. Sin embargo, las observaciones pueden indicar que la arena se ha almacenado en parte en forma de barras en la parte sumergida de la playa y que puede volver, gracias a marejadas menos energéticas. Por tanto, esta información permite a los responsables evitar 1) inversiones costosas cuando no son necesarias, 2) bloquear la dinámica hidrosedimentaria e impedir el retorno natural de la arena, 3) favorecer cuando sea posible soluciones de protección suaves basadas en la naturaleza (revegetación de la parte superior de la playa, por ejemplo).

Así pues, este capítulo pretende detallar los diferentes métodos de observación y medición para poner en marcha una red de monitoreo o un observatorio de la erosión costera. El Capítulo 6 se centrará en la red de monitoreo establecida en el Gran Caribe en el marco del proyecto “Sandy Shorelines”.

1. indicadores morfológicos que reflejen la dinámica actual
2. forzamientos hidrometeorológicos que deben seguirse para comprender las relaciones causa-efecto

3. criterios de selección de las playas que se incluirán en la red de vigilancia
4. métodos y herramientas de medición y muestreo sobre el terreno
5. herramientas digitales para el tratamiento de los datos de medición y observación
6. métodos de análisis e interpretación de la información obtenida

El resumen destinado a los responsables de la toma de decisiones sintetizará la información esencial para la puesta en marcha de una red de monitoreo.

4.1. Indicadores de los procesos de erosión.

Aquí se discuten los indicadores observables en el paisaje, así como los marcadores que deben medirse y controlarse a lo largo del tiempo para traducir la dinámica actual (los métodos de observación se detallan en 4.3).

4.1.1. Indicadores que deben observarse.

Aquí se discuten los indicadores observables en el paisaje, así como los marcadores que deben medirse y controlarse a lo largo del tiempo para traducir la dinámica actual (los métodos de observación se detallan en 4.3).

Playas:

En primer lugar, la pendiente indica el carácter reflectivo o disipador de la playa (Wright y Short, 1984). Si la playa está expuesta a condiciones energéticas, es decir, a una agitación importante (oleaje), su pendiente es más pronunciada y se dice que es reflectiva. La pendiente puede aumentar después de un evento determinado o tener un perfil permanentemente empinado, dependiendo de su exposición puntual o crónica a las olas. Las playas con una pendiente suave se consideran disipativas porque están menos expuestas a las olas (normalmente el fondo de la bahía).

En el Gran Caribe, las playas más reflectivas tienden a estar en la costa expuesta al Océano Atlántico más que al Mar Caribe, donde las condiciones son más tranquilas (costa occidental de las islas en particular).

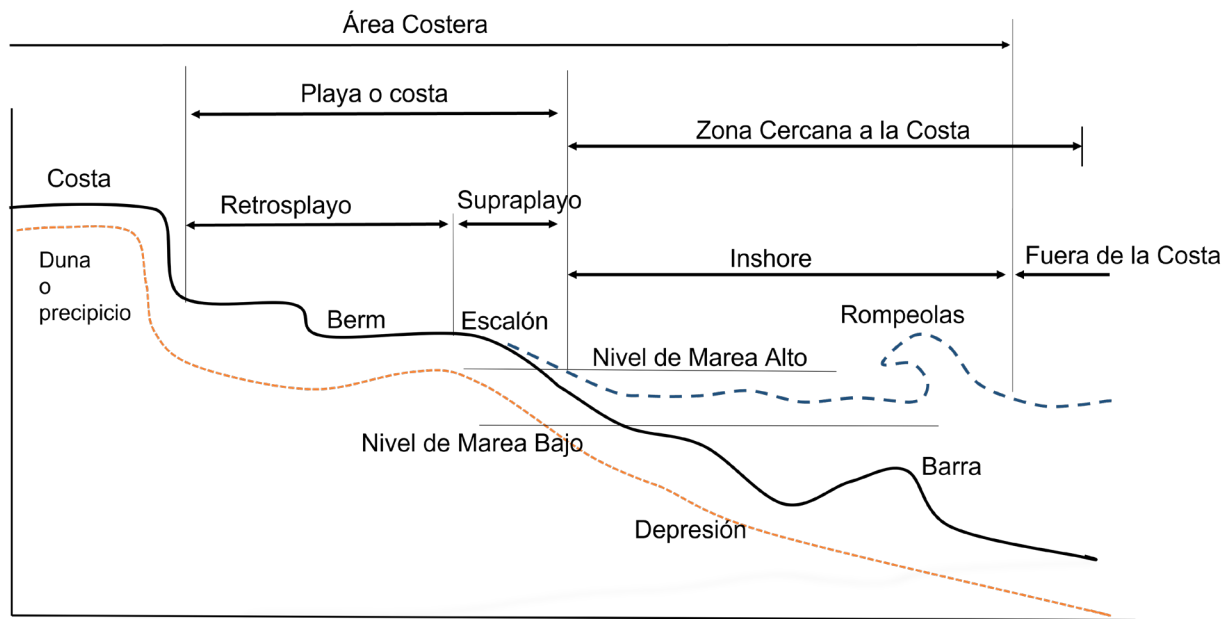


Figura 23 Perfil de la playa y características morfológicas de Kraus, 2005

Dependiendo de la anchura de la playa, la parte más empinada puede encontrarse sólo en la zona del chorro de la orilla, donde las olas mueren con una parte superior de la playa más plana. En las playas estrechas, la acción de las olas puede afectar la mayor parte de la pendiente de la playa.

En las playas reflectivas, pueden aparecer en la zona de chorro de la orilla unas ondulaciones denominadas medias lunas de playa. Son otro marcador para identificar la exposición a niveles elevados de energía de forzamientos hidrodinámicos (olas). Las crestas también pueden aparecer y desaparecer por el paso del oleaje.

También hay que tener en cuenta varios marcadores específicos de las tormentas. En efecto, tras el paso de una tormenta o un ciclón, suele aparecer una berma superior en la playa debido a la erosión creada por las olas y el transporte de arena de la playa aérea a la playa submarina. Al pie de este escarpe o más abajo en la playa cuando la tormenta es menos fuerte, suele haber una correa de tormenta, es decir, el depósito de vegetación, algas u otros residuos que dejan las olas. La presencia de varios niveles de depósitos (varias correas) permite distinguir la cronología del temporal o la secuencia de varios episodios de oleaje. Por último, la aparición de areniscas de playa al nivel de la zona de chorro de los bancos indica una pérdida de espesor de sedimentos que puede ser puntual en el tiempo o más a menudo tendencial. En efecto, estas formaciones de arena indurada se forman de forma natural a aproximadamente 1 m de profundidad bajo el efecto químico del calor y la humedad (Vousdoukas et al., 2007).

Este tipo de formación es más frecuente en contextos tropicales.

En la cima de la playa, el límite vegetación-arena, cuando existe, constituye finalmente un marcador para el monitoreo de la dinámica a largo plazo del sitio. En el Caribe, y más ampliamente en los trópicos, suele estar formado de plantas rastreras del tipo ipomea (*Ipomea pes-caprae*). La vegetación desempeña la función de fijar la arena, y su desaparición o eliminación puede explicar en parte los fenómenos de erosión observados.

Alto de Playa:

Algunas playas del Gran Caribe pueden estar bordeadas en su parte terrestre por un sistema de dunas más o menos desarrollado, tal y como se comenta en el Capítulo 2.

El pie de la duna es entonces el marcador más interesante para observar el retroceso potencial. También, las olas de una tormenta pueden cortar el frente dunar y formar un microacantilado cuyo escarpe depende de la altura de la duna de borde.

La línea de vegetación dunar del lado de la playa, al igual que la de las playas, también puede aportar información sobre la tendencia de la evolución.

Costa:

La pendiente en la parte submarina de la playa es generalmente más suave que en la parte aérea, pero se observan morfologías típicas.

Es el caso, en particular, de las barras frontales. Estas barras pueden ser permanentes o temporales, desplazarse con respecto a la costa, dividirse o cortarse en función de las condiciones del oleaje. También pueden crearse tras el paso de una tormenta que haya provocado el transporte de arena desde la playa aérea.

En las llamadas playas de coral, la orilla está marcada por la presencia de un arrecife periférico, a veces duplicado por una barrera de arrecifes. Si estos arrecifes no son móviles como los bancos de arena, puede ser interesante observar su sedimentación o su posible degradación. En efecto, aunque las reservas de arena sean en parte fósiles (heredadas de periodos geológicos de menor nivel del mar), los arrecifes de coral siguen siendo hoy en día los proveedores de arena bioclástica de la playa y su degradación pone en peligro la producción de arena (Perry y Hepburn, 2008; Perry et

al., 2011). La degradación de los arrecifes puede ser natural (choque mecánico de las olas o consumo por organismos vivos como los peces loro), pero en el Caribe se debe con demasiada frecuencia a la mala calidad del agua en relación con el tratamiento insuficiente o inexistente de las aguas residuales de origen humano (Rosado-Torres et al., 2019).

También es importante tener en cuenta la presencia de un paso, ya que puede “drenar” la arena durante una tormenta, pero dificultar su retorno a la playa terrestre debido a la presencia obstructora del arrecife.

4.1.2. Indicadores que deben medirse.

Para estudiar la evolución del área de distribución considerada, es posible utilizar las morfologías observadas como indicadores de su estado y sus cambios. Las herramientas de medición de estos indicadores se presentan en la sección 4.4.

Los indicadores longitudinales constituyen lo que se denomina línea de costa. En la parte inferior de la playa, suele utilizarse el límite del chorro de la orilla o el de las medias lunas de playa o la correa de mar. En la parte superior de la playa, se utiliza la línea de vegetación o el pie de la duna. Este seguimiento longitudinal puede permitir observar el transporte relacionado con la deriva litoral (Capítulo 3) y los ciclos estacionales, o incluso los fenómenos de “rotaciones” típicos de las playas de bolsillo (Capítulos 2 y 3).

Sin embargo, el retroceso de la línea de costa no indica necesariamente erosión porque la cantidad de arena puede seguir siendo la misma y es importante seguir la dinámica transversal de la playa a través de los perfiles de playa. Este indicador transversal consiste en registrar la pendiente de la playa, potencialmente desde la duna hasta la parte sumergida. Es necesario implantar al menos 3 en una playa para observar las inclinaciones y reproducir los sondeos siempre sobre el mismo eje.

Por último, el indicador más completo es el que da cuenta de la morfología de la playa en tres dimensiones. Para ello, pueden elevarse nubes de puntos para constituir cuadrículas de modelos digitales del terreno. El cruce de las cuadrículas en distintas fechas permite identificar con precisión las zonas de pérdida y depósito. En cuanto a los perfiles, son posibles diferentes técnicas para cubrir las partes aérea y subacuática.

4.2. Parámetro meteorológico marino.

Para interpretar y explicar las tendencias observadas, es necesario tener en cuenta los forzamientos meteorológicos marinos (Figura 24) que están en su origen (Capítulo 2).

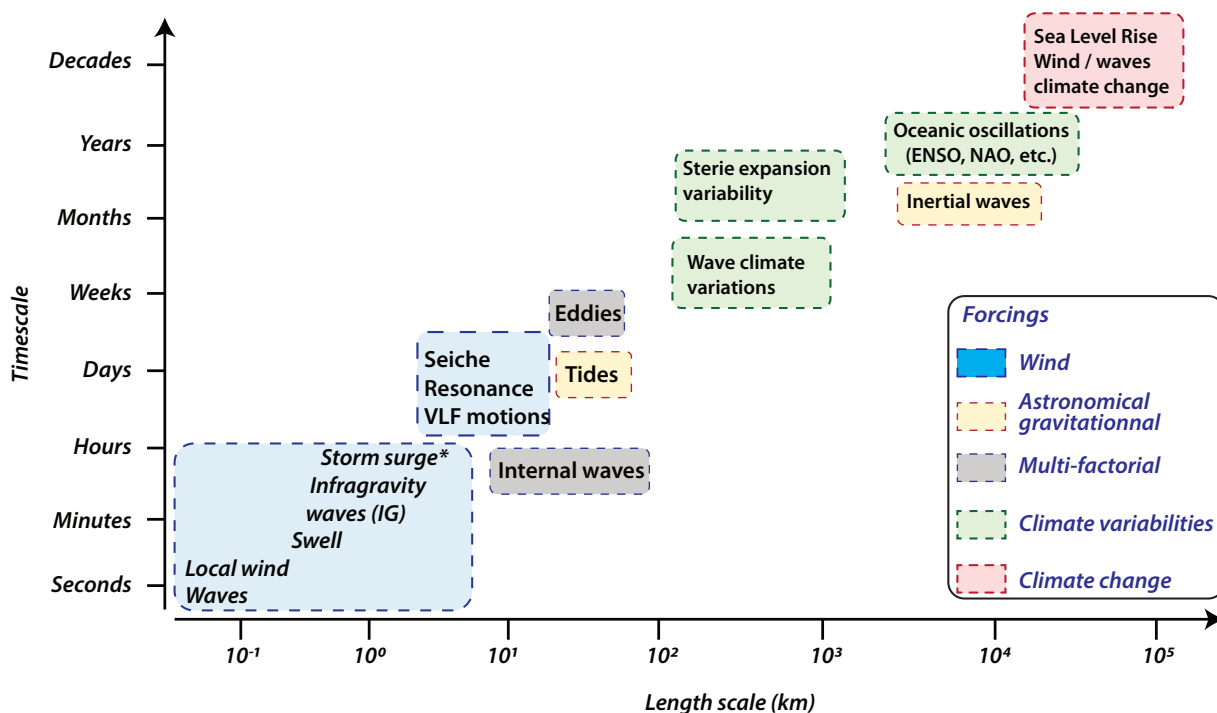


Figure 24 Meteo-marine forcings regarding their timescale (BRGM)

Olas

Por ello, es importante medir o recopilar información sobre las condiciones del oleaje durante el periodo considerado.

Los datos de las olas se desglosan en tres parámetros principales: altura H (metros), periodo T_p (segundos) y dirección Dir (grados) y que pueden desglosarse en valores denominados "importantes" (H_s o $H_{1/3}$ que corresponden a la media del tercio de las olas más fuertes) o valores máximos o de pico (H_{max} o H_p). La altura y el periodo de las olas nos informan de la energía asociada. La orientación indica la incidencia del oleaje en relación con el rango considerado y la dirección del transporte de sedimentos por la deriva litoral (Capítulo 3).

El espectro de frecuencias (en Hertz) de la ola también puede ser un parámetro interesante para el análisis posterior de las diferentes longitudes de onda y sus respectivos papeles (olas de infragravitación en zonas de lagunas, por ejemplo).

Niveles del agua

El nivel del agua o del mar también es un posible parámetro que monitorear, especialmente si las olas no explican los cambios observados.

El nivel se expresa en metros relativos a una referencia, denominada hidrográfica 0, diferente de la referencia vertical terrestre. Por tanto, es necesario especificar el sistema de referencia en el que se considera.

El nivel del mar está en función de las mareas astronómicas, de los ciclos estacionales asociados, por ejemplo, a las grandes corrientes oceánicas o a las variaciones de temperatura y salinidad de las masas de agua (Figura 25). La marejada ciclónica también puede influir en el nivel del agua. Está relacionada con el descenso de la presión barométrica, la acción del viento marino o la rompiente de las olas (Capítulo 3).

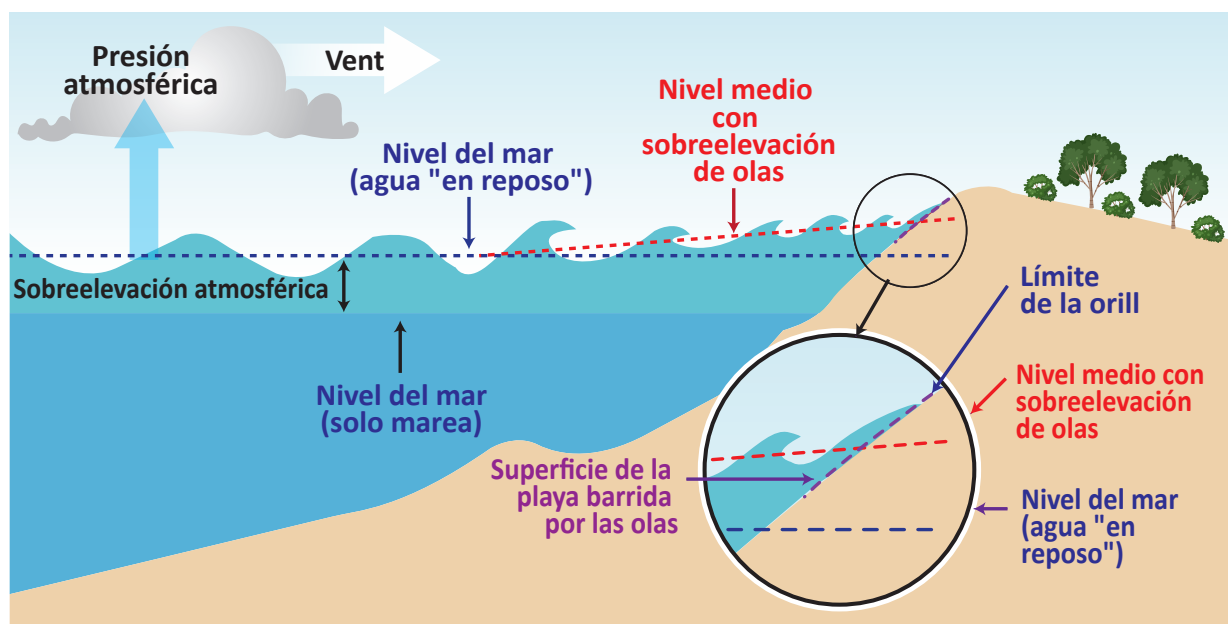


Figura 25 *Diferentes niveles del mar considerando forzamientos atmosféricos y marinos (BRGM)*

Corrientes

Se pueden medir las corrientes (velocidad en m/s y dirección en grados) si se trata de precisar el transporte hidrosedimentario en la zona sumergida de la playa, especialmente en bahías o lagunas donde los efectos de paso pueden complicar las circulaciones.

Viento

Los parámetros meteorológicos suelen utilizarse menos. La acción del viento es morfológica sobre la parte superior de la playa y las formaciones dunares por el fenómeno de la deflación, es decir, el transporte de arena por el viento (Capítulo 3).

Al igual que las corrientes, el viento se considera en velocidad (m/s) y dirección (grados) y se mide en media horaria o diaria e instantánea (incluidas las rachas).

4.3. Acciones antropogénicas.

Para comprender los cambios morfológicos observados sobre el terreno, es necesario finalmente integrar las eventuales acciones antropogénicas sobre la playa para distinguirlas de las dinámicas naturales.

En efecto, las obras de recarga artificial, la instalación de estructuras o el tráfico importante pueden influir directamente en los volúmenes de arena, el transporte de sedimentos; o indirectamente como el pisoteo de la vegetación en la movilidad de la arena (Pilkey & Cooper, 2014, Hesp et al., 2010).

Esta información (volúmenes, planos, fechas, etc.) debe recabarse de la comunidad local.

4.4. Procedimiento de selección de los rangos de la red de monitoreo.

Hay varios criterios de representatividad que permiten seleccionar las playas que deben integrarse en una red de monitoreo regional o nacional.

En primer lugar, se puede considerar necesario tener en cuenta un criterio geográfico para abarcar las distintas regiones o sectores de un territorio. Para una isla del Caribe, se pueden considerar diferentes fachadas. Para un archipiélago, puede tratarse de diferentes islas.

Además, sería interesante integrar un criterio morfológico para distinguir diferentes tipos de playas (con o sin arrecifes de coral, dunas; playas de bolsillo, playas abiertas, bahías; compuestas de arena volcánica, biodetríticas; bordeadas por acantilados, playa urbana, etc.).

También pueden constituir criterios hidrodinámicos la exposición o no al oleaje, la presencia de una laguna sensible a las variaciones del nivel del agua y de las corrientes.

Por último, pero no por ello menos importante, la combinación de fenómenos de erosión conocidos y la presencia de elementos humanos (edificios, actividades turísticas o pesqueras) o patrimoniales (zona de culto, lugar histórico, espacio natural protegido) permite identificar los lugares sensibles y vulnerables que deben ser objeto de un seguimiento prioritario.

Hay más lugares monitoreados en Antigua, donde se concentran los problemas y la población. Esta red, especialmente densa para el tamaño del territorio, cubre las dos islas principales y las distintas fachadas. Se siguen varios tipos de playa, algunas naturales, otras con complejos turísticos y otras en entornos urbanos.

4.5. Métodos de medición y muestreo de campo

Este capítulo presenta los métodos que se aplican sobre el terreno y la frecuencia de los seguimientos que se realizan para elaborar un protocolo de observación.

4.5.1. Topografía.

El método principal consiste en controlar los indicadores mencionados registrando sus variaciones morfológicas de una fecha a otra mediante métodos topográficos.

Seguimientos básicos

La forma más fácil es hacer las llamadas fotografías “de paisaje”. Es decir, siempre desde el mismo punto de vista y con la misma influencia. Para interpretar los cambios (menos o más arena normalmente), es útil disponer de un punto de referencia invariable, como un árbol, un muro bajo, etc. En ausencia de un marcador existente, es posible instalar un pilote que idealmente esté graduado para poder interpretar las variaciones delante o detrás del pilote, pero también en altitud (altura de la arena sobre el pilote).

Este método se utiliza en particular en el proyecto de ciencia participativa CoastSnap, que permite a cualquier persona hacer una foto en un soporte y subirla a través de una aplicación

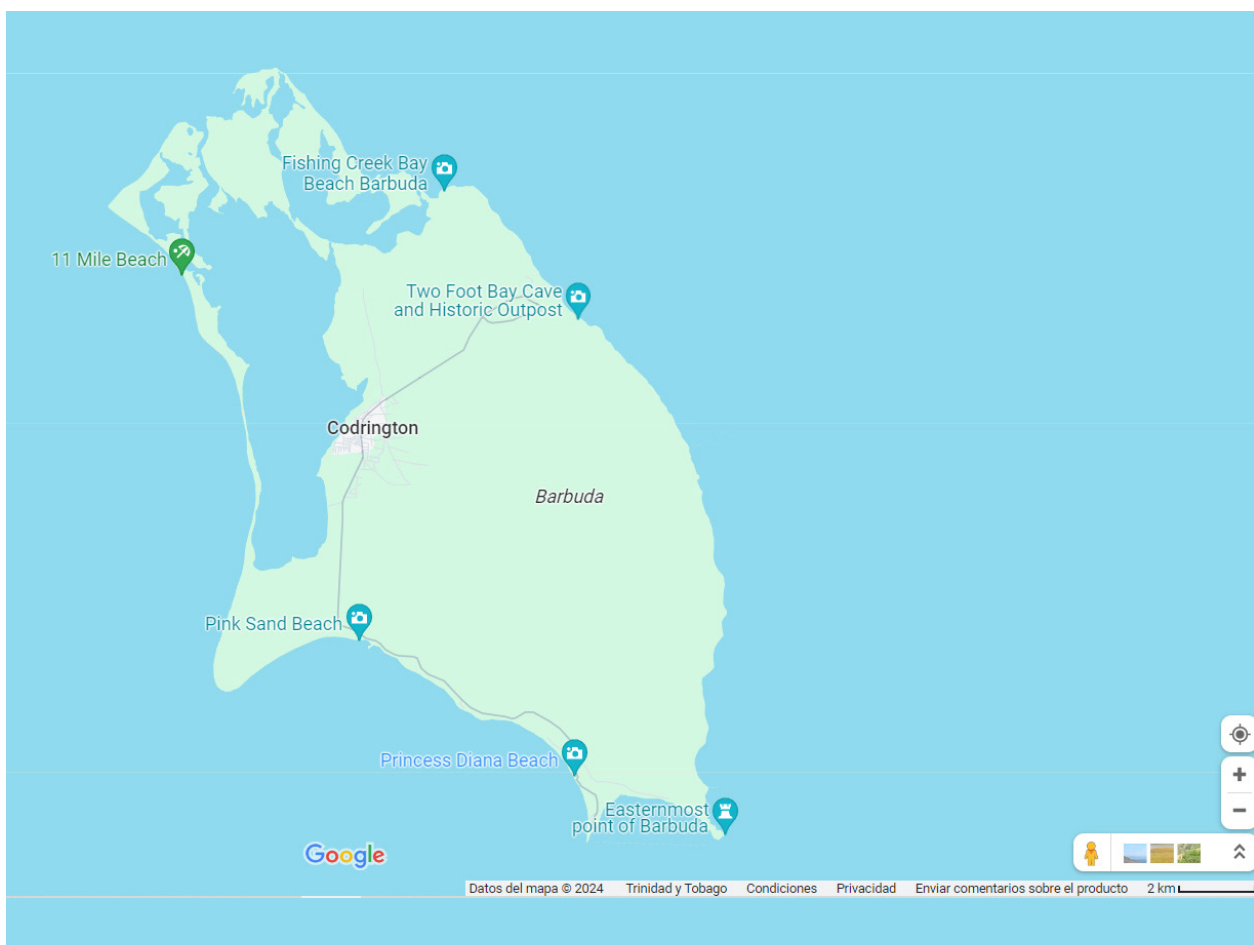
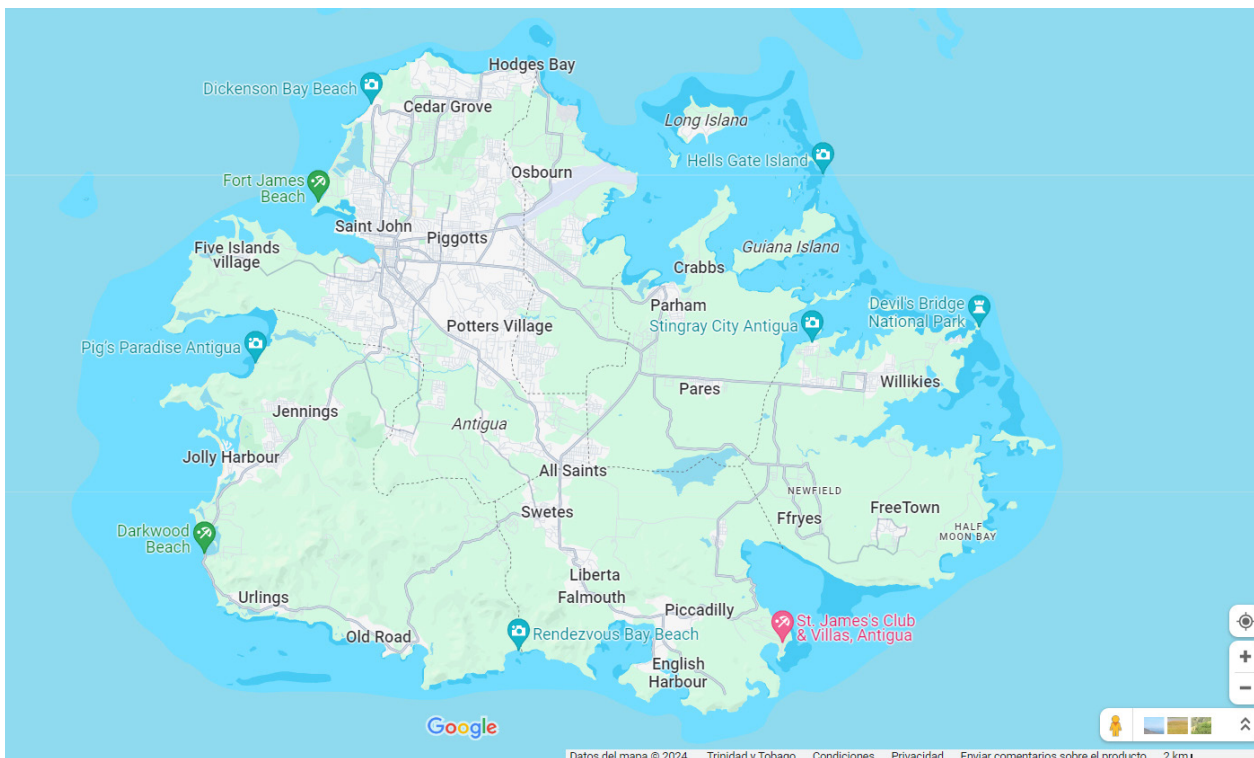


Figura 26 Sitios monitoreados en Antigua y Barbuda (Sandy Shorelines)

El inconveniente de este método es que no permite cuantificar de forma precisa y directa las evoluciones.

Por lo tanto, es importante poder complementar este enfoque paisajístico midiendo los perfiles de las playas. El método “hágalo usted mismo” o “DIY” (por sus siglas en inglés) consiste en utilizar un marco graduado (Figura 27). Este material puede fabricarse a partir de 2 tubos de PVC verticales y graduados a los que se conecta un tubo horizontal (perpendicular) y deslizante. El tubo horizontal puede sustituirse por una cuerda, pero como es flexible, entonces es más difícil garantizar su horizontalidad. La diferencia de altura entre los dos tubos verticales puede medirse y representarse gráficamente. Es habitual partir de la parte superior de la playa, por ejemplo, de un hito existente o de un pilote colocado a tal efecto, y descender hacia el mar por el lado perpendicular de la playa.



Figura 27 Equipo básico para el seguimiento de perfiles: GPS portátil

El GPS portátil puede permitir por fin registrar la posición de la línea de costa en el fondo de la playa o el límite de la parte superior de la playa (Figura 27). Estos aparatos, utilizados habitualmente para hacer senderismo o de guía, tienen una precisión suficiente en el plano (coordenadas X, Y del orden de un metro) para este tipo de indicador, pero insuficiente en altitud (coordenada Z) para realizar perfiles de playa.

Es esencial anotar cuál es el marcador registrado para la línea de costa (línea agua-arena, media luna, berma, línea de vegetación, pie de duna, etc.) para poder registrar lo mismo de una fecha a otra y disponer de un conjunto de datos comparable.

Seguimientos avanzados

Para llevar a cabo un seguimiento más preciso, se recomienda utilizar instrumentos topográficos como los que se emplean en las obras: catalejo de obra, taquímetro, teodolito y, sobre todo, GPS diferencial (o sistema GNSS). El principio es instalar cada vez una estación de referencia en un punto cuyas coordenadas X, Y y Z se conozcan y levantar los puntos circundantes a partir de esta referencia. El punto conocido puede ser un punto de elevación referenciado por un topógrafo o un organismo nacional. Si está alejado, es necesario implantar un punto de referencia en el rango a partir del punto conocido.

Los catalejos de construcción, los taquímetros y otros teodolitos utilizan una medición local. En efecto, la estación mide la posición de un objetivo a partir de un telescopio de aumento o de un rayo láser. Los sistemas GNSS, en cambio, utilizan la posición que envían los satélites. Se utiliza en modo “diferencial” porque calcula la diferencia de posición de la estación móvil con respecto a la estación de referencia (Figura 28). Este modo diferencial permite obtener una precisión del orden de 10 cm en altitud y del orden de 1 centímetro en plano. Los sistemas GNSS más recientes permiten recuperar una corrección enviada en 3G/4G desde antenas situadas en el territorio. Utilizando este método, ya no es necesario instalar una estación de referencia para alcanzar una precisión decimétrica. Sin embargo, el coste de abonarse al sistema de estación fija puede ser importante.





Figura 28 *Imágenes de Perfilado de Playas con Sistemas GNSS: Taquímetro y Receptor Base GNSS*

Por tanto, estos instrumentos permiten recoger perfiles de playa, pero también nubes de puntos sobre toda la superficie terrestre para crear un modelo 3D.

No obstante, la forma más eficaz de crear un modelo 3D es realizar un levantamiento fotogramétrico utilizando un dron equipado con una cámara (Figura 29). Si se colocan objetivos de cronometraje en el suelo y se dispone de un sistema GNSS a bordo o en tierra (modo diferencial: estación fija en tierra y sensor móvil en el dron) para georreferenciar las imágenes, sí es posible cuadricular el alcance según un plan de vuelo y una altitud determinada para crear después un ortomosaico y un modelo digital de la superficie. Sin embargo, el uso del dron puede limitarse a realizar fotografías sin correcciones en la misma lógica que el monitoreo del paisaje. El dron puede requerir, según la normativa nacional vigente, un permiso o licencia de piloto y puede estar sujeto a autorizaciones de vuelo.



Figura 29. *Levantamiento topográfico mediante fotogrametría con dron:*

Los sistemas de cámaras fijas situados en la playa también permiten tomar imágenes y enderezarlas para que sean comparables y medibles (Figura 30). La ventaja de esta técnica es poder aumentar la frecuencia de adquisición, por ejemplo, cada hora, y enviar las imágenes por Internet o red móvil a un servidor. Se han desarrollado sistemas autónomos de bajo coste a partir de un teléfono móvil protegido por una carcasa impermeable y alimentado por un pequeño panel solar (Valentini & Balouin, 2020). Otros sistemas más elaborados incluyen la construcción de una torre o mástil, como el instalado en la playa de Hellshire, en Jamaica, en el marco del proyecto “Sandy Shorelines” (Capítulo 6). Esto permite extraer automáticamente la línea de costa a partir de un gran conjunto de imágenes. También se pueden seguir otros indicadores morfológicos, de vegetación o hidrodinámicos a partir de tratamientos ad hoc (imágenes promediadas, perfiles de imágenes, etc.). Este tipo de tratamiento también puede realizarse a partir de fotografías procedentes de la ciencia participativa (véase el dispositivo CoastSnap).



Figura 30
*Seguimiento con
cámaras fijas; Jamaica
(Sandy Shorelines)*

Los datos Lidar (detección y medición de luz) son muy útiles para tener una referencia de elevación. Estos datos, que suelen obtenerse desde un avión o un helicóptero, son muy caros y apenas pueden reproducirse cada año. Actualmente existen en el mercado sistemas miniaturizados para drones. También existen equivalentes terrestres fijos (sobre trípode) o móviles (a pie o en automóvil). Se trata de una medición telemétrica, es decir, una medición de la distancia entre el sensor y el punto del suelo a partir de un haz de luz. De este modo, se adquiere directamente una nube de puntos para obtener una representación tridimensional del terreno.

Por último, puede ser necesaria la utilización de ortofotografías u ortoimágenes de origen aéreo o por satélite, sobre todo para los lugares de difícil acceso. Algunos sensores ofrecen imágenes de muy alta resolución, como el satélite Pléiades (píxel de 0,5 m), que permiten seguir visualmente y registrar la línea de costa o de vegetación. En cambio, es más complicado extraer información suficientemente precisa sobre la altitud.

4.5.2. Batimetría

La batimetría es la ciencia que mide la profundidad del agua y el relieve submarino; es en cierto modo “la topografía del fondo marino”.

Al igual que la parte terrestre, existen métodos específicos que permiten seguir la evolución de la morfología de la playa submarina.

Seguimientos básicos

La toma de fotografías de paisajes submarinos puede proporcionar, en primer lugar, información sobre la naturaleza del fondo marino (rocoso, arenoso, etc.), así como sobre la pérdida o ganancia de arena en determinadas zonas (presencia/ausencia de barras litorales, encenagamiento o deterioro del arrecife periférico tras un temporal, etc.). Para ello, lo más sencillo es utilizar un dispositivo estanco. Seguir una zona con un marco de referencia invariable (por ejemplo, un paso) permite observar mejor las evoluciones.

En cuanto a las mediciones batimétricas, la forma más sencilla es utilizar una ecosonda portátil para realizar una medición puntual de la profundidad a lo largo de un perfil desde una embarcación. El principio de la ecosonda consiste en calcular el tiempo de emisión y recepción de una onda sonora que se refleja en el fondo. Las coordenadas

de localización X, e Y se pueden tomar con un GPS portátil y la Z con la sonda simultáneamente. El cumplimiento del eje del perfil batimétrico por parte del piloto debe hacerse mediante un sistema de guiado náutico (trazado en el GPS portátil o en el GPS de la embarcación), o al menos a partir de un doble amargo en tierra (dos marcas terrestres en el mismo eje). Si el pilotaje está a la vista, es necesario por tanto realizar el perfil desde el mar hasta tierra. Por último, la sonda portátil debe mantenerse en posición vertical para realizar la medición, a fin de no distorsionar el valor. Si es necesario, se pueden promediar dos o tres valores (en caso de agitación por la masa de agua). Para poder comparar los datos a lo largo del tiempo, es necesario recalibrar la medición en función del nivel del agua y de la marea.

Seguimientos avanzados

Las ecosondas más elaboradas permiten un seguimiento más preciso. Se trata de sistemas de uno (una onda) o múltiples rayos (SWIFT de una onda) (Figura 31). Dotadas de un sistema GNSS centimétrico, o incluso de una unidad inercial (corrección de los movimientos debidos al balanceo y al cabeceo), estas sondas se fijan verticalmente en el costado o debajo de la embarcación. Están controladas por un software que gestiona la navegación y la adquisición sincronizada y continua de datos X, Y y Z, ignorando directamente la marea.

Los sistemas de un solo rayo se utilizan a lo largo de perfiles, que pueden trazar intersecciones si se desea cuadrangular una zona y generar una nube de puntos para modelado 3D. Los sistemas de múltiples rayos proceden del mismo modo, pero tienen una franja que se hace más ancha a medida que aumenta la profundidad del agua. Es posible proporcionar una cuadrícula que cubra totalmente un sector en función de la siega.

Estos dispositivos pueden instalarse en barcos de distintos tamaños, así como en embarcaciones ligeras (zodiacs o kayaks, por ejemplo). Ya existen soluciones en drones náuticos, pero se prefieren para zonas protegidas del oleaje.

También puede utilizarse un dron náutico simplemente equipado con una cámara y un sistema GNSS centimétrico para realizar un levantamiento fotogramétrico del fondo y, en última instancia, una nube de puntos, una ortoimagen y un modelo digital de la superficie. Un submarinista también puede tomar fotografías desde la superficie. Al igual que en la fotogrametría aérea, se necesitan objetivos para calibrar la georreferenciación de las imágenes.

La batimetría de un lugar puede, además, observarse a partir de imágenes de video de estaciones fijas en tierra (Holman et al., 2013), drones aéreos (Brodie et al., 2019), satélites mediante tratamientos basados en la línea de rompiente de las olas (para identificar las barras de la preplaya), o principios de óptica marina (el llamado método de inversión batimétrica) (Jagalingam et al., 2015). Sin embargo, estos métodos son menos precisos que la medición directa de la batimetría mediante una sonda.

Por último, hay varios equipos geofísicos marinos que permiten adquirir información sobre la naturaleza del fondo, su morfología, el espesor de los sedimentos e incluso la estructura del lecho marino. Entre ellos se encuentran el sonar lateral, la sonda de sedimentos, la reflexión sísmica, etc.)(Figura 31).

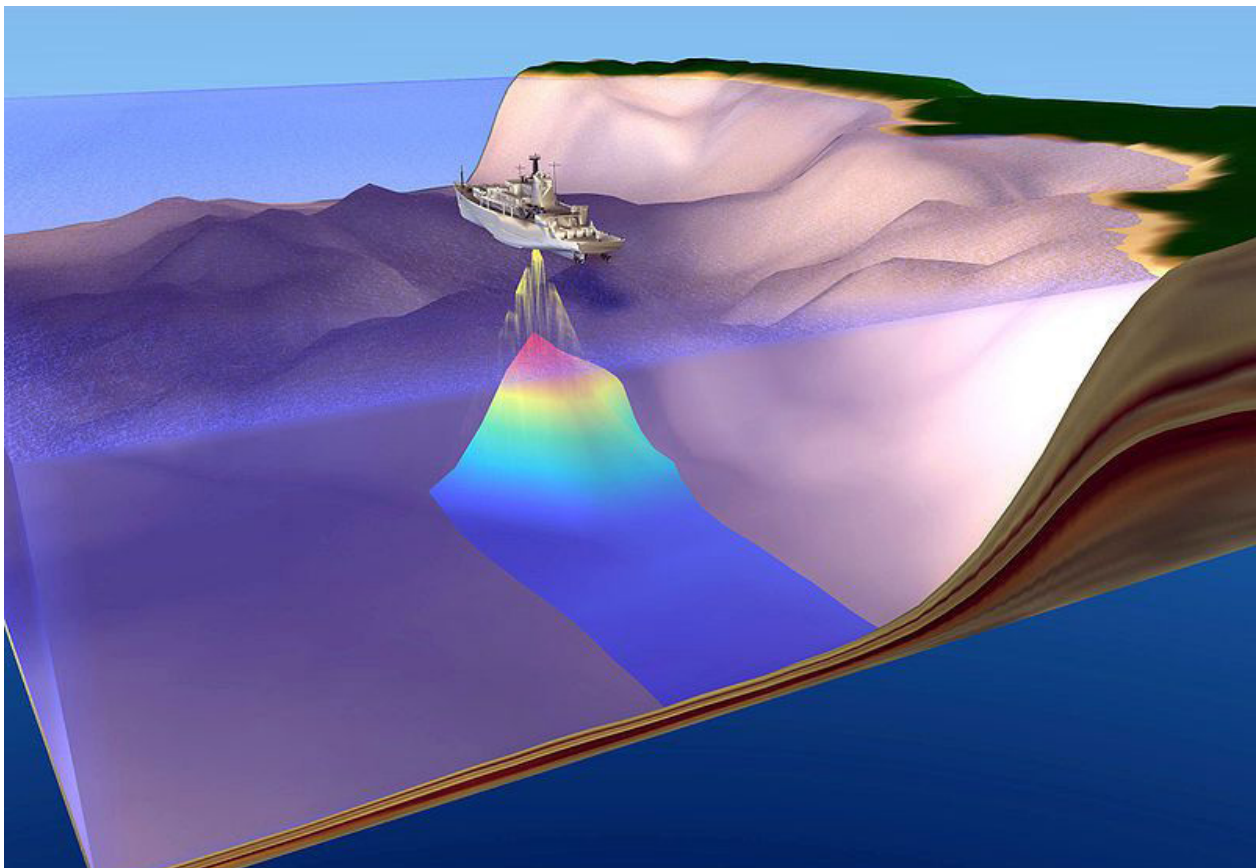


Figura 31. Seguimiento batimétrico avanzado en **barco**

4.5.3. Sedimentología.

El tamaño de las partículas y la naturaleza de los sedimentos también son indicadores de la dinámica de las playas.

Granulometría

La granulometría es la medida del tamaño de los sedimentos. Según el diámetro del grano, se distinguen diferentes clases: arcillas, limos, arenas, guijarros y bloques.

Se observa un gradiente granulométrico en función de la pendiente. Cuanto mayor sea la pendiente, más grueso es el diámetro. El agente de transporte de la arena también condiciona una clasificación granulométrica, ya que las olas pueden transportar granos más pesados que el viento. Por lo tanto, es importante conocer la granulometría de los distintos compartimentos de la playa.

Los métodos de muestreo se realizan, simplemente, con una pala manual, tomando la arena del primer centímetro y guardándola en una bolsa numerada. La mayoría de las veces, el plan de muestreo se realiza a lo largo de los perfiles de la playa. En la parte submarina, se requiere el uso de un contenedor de sedimentos desde una embarcación. Los modelos Van Veen y Shipeck son los más utilizados.

A continuación, hay que secar las muestras en un horno antes de clasificarlas y pesarlas por diámetro utilizando una columna granulométrica (tamiz) o un medidor láser de tamaño de partículas para obtener una curva granulométrica.

Para algunos seguimientos específicos, también se pueden utilizar trampas de sedimentos para cuantificar el tamaño de las partículas a diferentes alturas en función del transporte por las olas o el viento.

Otros análisis sedimentológicos

Es importante tener en cuenta la naturaleza de los sedimentos, con arenas de origen biodetrítico (de coral o conchas), volcánica, de origen aluvial, etc. (Figura 32).



Figura 32 : Diferentes tipos de arena: biodetrital, volcánica, aluvial (I-D)

La composición también puede ser mixta. En el Caribe, puede ser útil conocer la cantidad de material biodetrital para estimar la contribución del arrecife de coral. Para ello, el análisis calcimétrico a base de ácido clorhídrico permite disolver la fracción carbonatada (coral, conchas) y cuantificar su proporción pesándola antes y después.

Por último, el examen con lupa binocular evalúa el índice de redondez de un grano para valorar el tiempo que ha pasado en el agua (análisis morfoscópico). Cuanto más redondo es el grano, más tiempo ha permanecido en el agua.

4.5.2. Hidrometeorología

Los medios de medición de los parámetros meteorológicos marinos pueden ser locales o regionales.

Condiciones de olas y turbelencias

Esta información puede recogerse en primer lugar a partir de boyas de oleaje cuando existan en la fachada en cuestión (Figura 33). Estas boyas, alimentadas continuamente por un panel solar, adquieren y transmiten datos en tiempo real (Hs, Tp, Dir), que pueden consultarse o incluso descargarse, la mayoría de las veces en línea.

A falta de un sistema regional, se puede considerar el uso de una instalación local a menor coste mediante la instalación de un sensor de presión que mida los parámetros Hs y Tp, pero también el espectro de frecuencias de las olas. El inconveniente es que estos sensores no son autónomos y deben elevarse para cargar los datos y cambiar la batería.

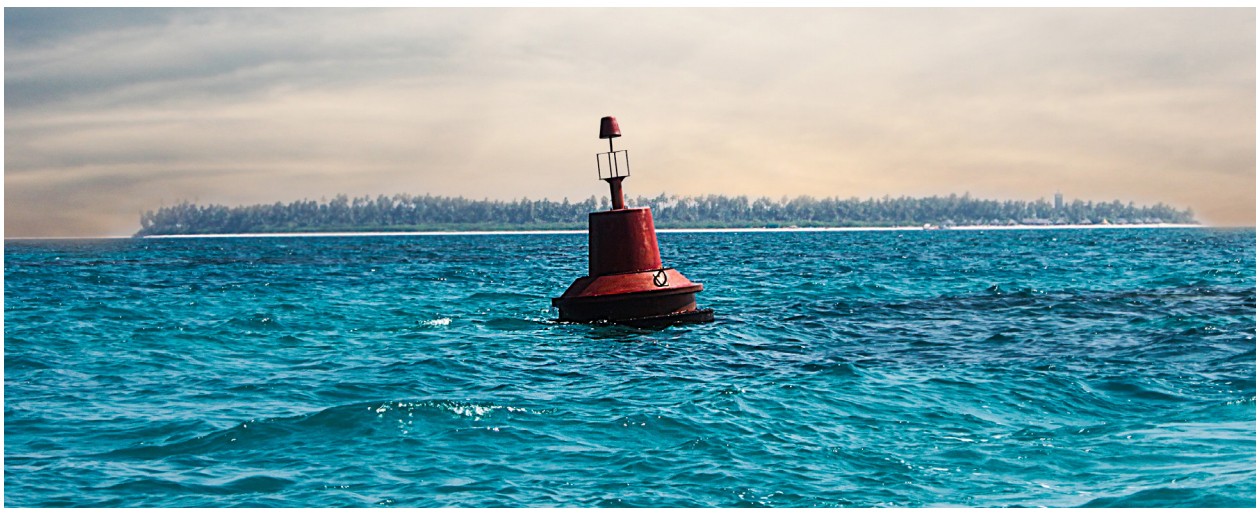


Figura 33 Monitoreo de olas: boyas fijas

Por último, si no se dispone de equipos de medición, sigue siendo posible consultar los sitios web de pronósticos de olas (Figura 34) y descargar sus datos (referencias en el Capítulo 3). En este caso, hay que tener en cuenta que sólo se trata de pronósticos y no de observación y que existe un margen de error relacionado con las simulaciones. No obstante, las principales tendencias estarán bien representadas.

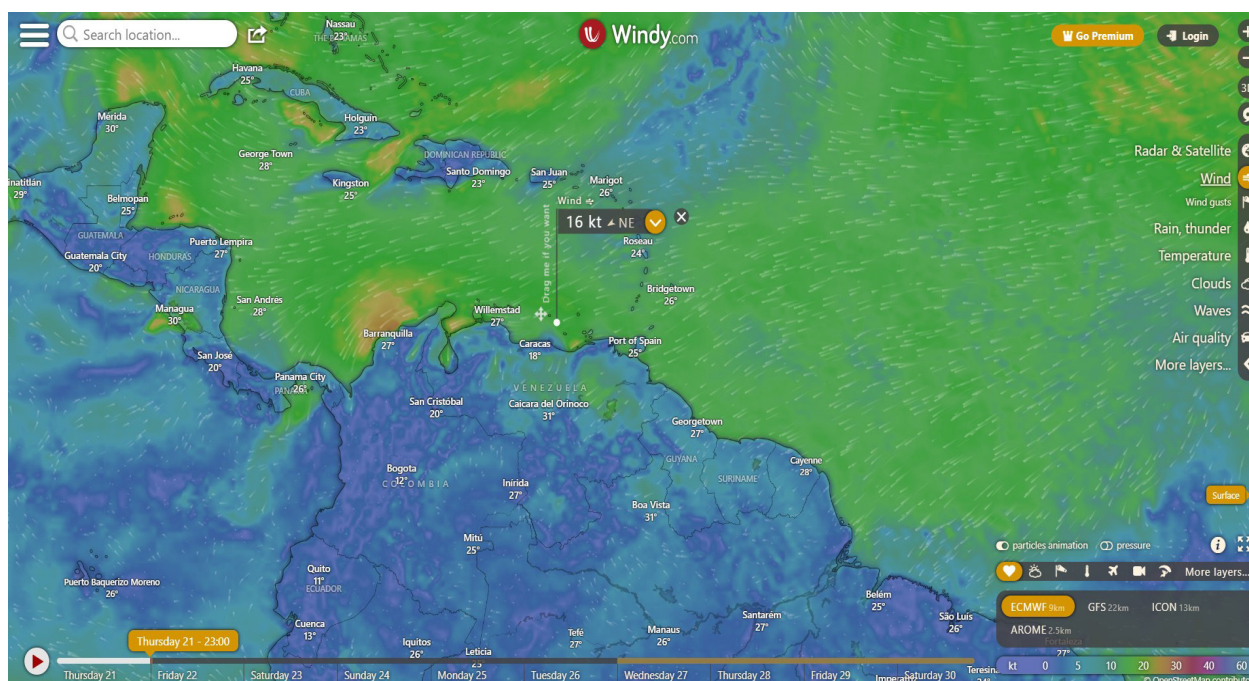


Figura 34 : Ejemplo de plataforma pública de pronóstico de olas (captura de pantalla de www.windy.com tomada el 21 de marzo de 2024).

Niveles del agua

Al igual que los mareógrafos, los mareógrafos regionales pueden medir el nivel del agua (Figura 35). Situados en el interior de los puertos, tienen en cuenta la marea y los ciclos estacionales, pero sólo el componente atmosférico del oleaje de tormenta porque su ubicación está protegida de las olas. Por tanto, sus valores son reducidos en las zonas expuestas.

Los análisis armónicos de las mareas pueden evaluarse fácilmente con varios años de antelación. También existen modelos de predicción del nivel del agua basados en datos históricos de mareógrafos. Estos últimos tienen en cuenta, además de la marea, las variaciones estacionales y la subida del nivel del mar. Los efectos de las marejadas provocadas por eventos no son predecibles con estos modelos (Codiga, 2011).



*Figura 35 Control
de las mareas:
mareógrafos*

Corrientes

Existen pocos dispositivos regionales o modelos de pronóstico y, en la mayoría de los casos, las corrientes se miden local y temporalmente mediante correntímetros en toda la columna de agua o cortándola en rodajas.

También es posible utilizar lanchas neumáticas. Estos dispositivos son similares a boyas a las que se fija un GPS. Estas informan sobre la intensidad y el patrón principal de las corrientes. Pueden ser útiles a escala de célula sedimentaria para determinar los flujos de corriente y sedimentos, o a escala regional para evaluar las principales corrientes superficiales.

Vientos

Las estaciones utilizadas por los servicios meteorológicos suelen recoger estos datos, aunque es posible implantar una a nivel local o realizar mediciones manuales instantáneas. También son habituales los modelos de pronósticos en línea

4.5.5. Frecuencia de las observaciones.

La frecuencia de las observaciones depende de los ciclos a seguir y de los medios disponibles. En primer lugar, es importante poder registrar el seguimiento durante varios años para poder comparar y disociar las ciclicidades (mensuales, anuales o incluso plurianuales) de las tendencias a largo plazo.

En el contexto del Caribe, dentro de un mismo año, es necesario poder calificar la variabilidad estacional con una campaña de campo en cada playa seleccionada antes y después de la temporada de huracanes. También debería poder activarse una campaña complementaria con el paso de un acontecimiento importante (ciclón, tormenta) para medir el retroceso máximo antes de reequilibrar el sistema. Algunos protocolos bastante completos prevén estudios mensuales.

Por último, los sensores instalados de forma permanente permiten un monitoreo “continuo” (cada hora, por ejemplo), ya sea durante una campaña intensiva (un mes en un ciclo lunar de mareas, por ejemplo) o de forma permanente y en tiempo real para las estaciones autónomas con transmisión de datos a distancia.

4.5.6. Resumen de los métodos de campo y ejemplo de protocolo.

Existe una gran variedad de métodos y herramientas para monitorear la dinámica de las playas. Si los seguimientos básicos son relativamente sencillos y poco costosos, todos los métodos más avanzados requieren una formación específica y la consiguiente inversión presupuestaria.

La siguiente tabla resume los distintos métodos, la inversión estimada correspondiente (coste, formación), su rendimiento (índice de fiabilidad, eficacia) y la frecuencia de monitoreo recomendada (Tabla 2: Síntesis de métodos y herramientas de monitoreo.):

Table 2: *Synthesis of monitoring methods and tools*

| Método | Instrumento | Indicador | Coste | Formación externa | Ren-dimiento | Periodicidad de la adquisición |
|-------------------|---------------------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|--------------|---|
| Topografía | Cámara | Seguimiento de paisajes, puntos de referencia fijos | \$300 máx. | No | Débil | Bianual si es necesario viajar; aleatorio si existe un marco de participación pública |
| | GPS portátil | Línea de costa, sondeos X, Y | \$300 máx. | Autodidacta | Débil | Mensual a bianual |
| | Marco graduado DIY | Perfiles de playa | \$50 máx. | Autodidacta | Débil | Mensual a bianual |
| | Nivel del sitio, teodolito, tacómetro | Perfiles de playa | \$300 - \$10 000 | Varios días a varios años | Muy bueno | Mensual a bianual |
| | Sistema GNSS diferencial | Perfiles de playa, nube de puntos | \$6000 a \$20 000 | Varios días a varios años | Muy bueno | Mensual a bianual |
| | Dron de imágenes oblicuas | Seguimiento de paisajes, puntos de referencia fijos | \$1000 máx. | A partir de varios días | Débil | Mensual a bianual |
| | Dron de fotogrametría | Gráfico de dispersión | \$10 000 | Varios días a varios años | Bueno | Mensual a bianual |
| | Cámara de video fija | Gráfico de dispersión, línea de costa | \$300 a \$5000 | Sin formación ad hoc, acompañamiento | Bueno | Continua |
| | LIDAR en tierra o en aire | Nube de puntos | \$5000 min | Varios días a varios años | Muy bueno | Bianual a interanual |
| | Imágenes aéreas y satelitales | Línea de costa, sondeos X, Y | Google Earth Pro (gratis) | Varios días a varios años | Bueno | Bianual a interanual |

| Método | Instrumento | Indicador | Coste | Formación externa | Ren-dimiento | Periodicidad de la adquisición |
|-------------------|---|---|----------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Batimetría | Cámara | Seguimiento de paisajes, puntos de referencia fijos | \$300 máx. | No | Débil | Bianual |
| | Ecosonda portátil | Perfiles de playa | \$300 máx. | Autodidacta | Débil | Mensual a bianual |
| | Sondas de uno y de múltiples rayos | Perfiles de playa, nube de puntos | \$1000 min | Varios días a varios años | Bueno a muy bueno | Mensual a bianual |
| | Dron náutico | Nube de punto | \$2000 min | Varios días a varios años | Bueno | Mensual a bianual |
| | Imágenes de video, dron, satélite | Nube de punto | \$0 – \$10 000 | Varios días a varios años | Bueno | Bianual a interanual |
| | Sonda sísmica, sonda de sedimentos, sónar lateral | Perfiles de playa | \$10 000 min | Varios días a varios años | Bueno a muy bueno | Una elevación de referencia |

| Método | Instrumento | Indicador | Coste | Formación externa | Ren-dimiento | Periodicidad de la adquisición |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Sedimen-tología | Pala, cuchara | Perfiles de playa | \$10 - \$1000 | Autodidacta | Débil | Bianual a interanual |
| | Trampa DIY | Perfiles de playa | \$300 máx. | Autodidacta | Débil | Campaña intensiva |
| Hidrometeo-rología | Sensor de presión | Medición de 1 punto | \$300 - \$1000 | Varios días a varios años | Bueno a muy bueno | Campaña intensiva |
| | Ola | Medición de 1 punto | \$50 000 | Varios días a varios años | Bueno a muy bueno | Continua |
| | Mareógrafo | Medición de 1 punto | \$1000 min | Varios días a varios años | Bueno a muy bueno | Continua |
| | Correntímetro puntual o ADCP | Medición de 1 punto | \$15000 - \$35 000 | Varios días a varios años | Bueno a muy bueno | Campaña intensiva |
| | Estación me-teorológica, anemómetro | Medición de 1 punto | \$300 min | Varios días a varios años | Bueno a muy bueno | Una vez a continua |

Estas estimaciones siguen siendo muy variables porque, para el mismo tipo de equipo, existen gamas para principiantes y profesionales con diferencias considerables. La formación, el rendimiento y la frecuencia recomendada también deben adaptarse al uso y al objetivo deseado.

Por ejemplo, a continuación, se presenta el protocolo de vigilancia aplicado en Guadalupe por el BRGM:

1. Levantamientos estacionales de 2 campañas topo-batimétricas al año, antes/ después de la temporada de huracanes a partir de un sistema GNSS acoplado a una sonda de un rayo (embarcación ligera) en una docena de playas (perfiles, línea de costa, línea de vegetación);
2. Levantamiento fotogramétrico anual mediante dron terrestre en los lugares más sensibles (ortomosaico, cuadrícula);
3. Prospección continua (cada hora) mediante cámara de video autónoma de "bajo costo" en los lugares propensos a varamientos de sargazo (línea de costa);
4. En caso de campaña posterior a un ciclón, inventario de los impactos en todo el lineal (foto del paisaje y dron en los principales lugares de impacto).

4.6. Digital tools for information processing

Una vez recogidos los datos brutos, es necesario procesarlos para hacerlos interpretables.

Procesamiento de datos planares de la línea

Los datos de la línea de costa (u otros indicadores de este tipo, como el límite del pie de duna, la berma, la vegetación, etc.) proceden de estudios sobre el terreno (puntos GPS/ GNSS) o de imágenes (cámaras fijas, drones, aviones, satélites). En ambos casos, es necesario utilizar un Sistema de Información Geográfica (SIG tipo ArcGis, QGis, etc.) o una interfaz de programación (Python, Matlab, etc.) para representar la posición de la línea de costa en un mapa en planta (2 dimensiones).

Para los datos GPS, hay que importar los puntos (coordenadas X, Y) y generar

automáticamente una línea conectándolos. A partir de una imagen, la línea se genera directamente punto por punto mediante fotointerpretación y digitalización (el operador "dibuja" sobre la imagen).

El análisis de la evolución temporal de la línea de costa se realiza superponiendo varias fechas de línea de costa y calculando índices de evolución (distancia, tasas anuales) a lo largo de transectos que intersecan las líneas de costa. La herramienta DSAS desarrollada por el USGS a partir de ArcGis automatiza estas tareas (Figura 36).

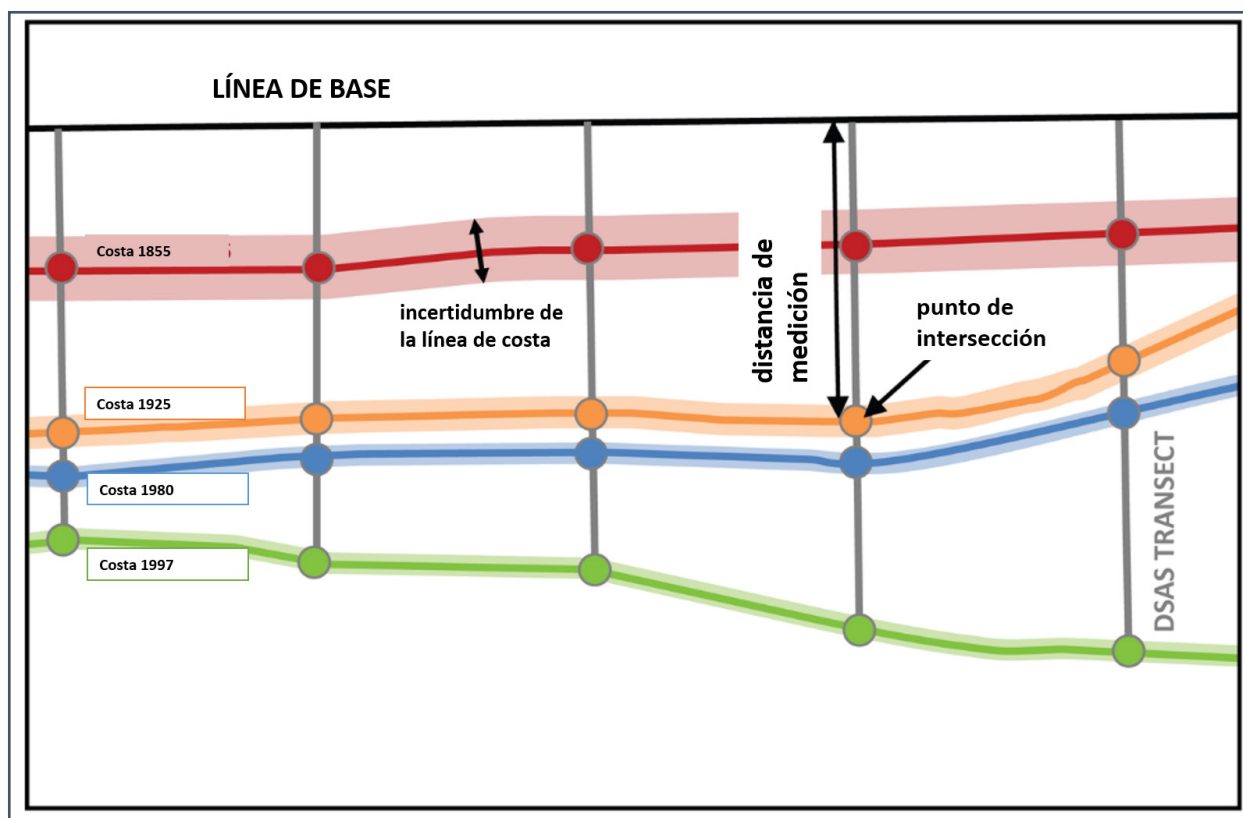


Figura 36: DSAS genera transectos que se lanzan perpendicularmente a la línea base de referencia en intervalos especificados por el usuario a lo largo de la costa. DSAS mide la distancia entre la línea base y cada intersección de la línea de costa a lo largo de un transecto, y combina la información de fecha y la incertidumbre posicional para cada línea de costa.

Procesamiento de datos de perfiles de alcance transversal (2D)

Los perfiles de playa se extraen de campañas de campo o de cuadrículas altimétricas (fotogrametría, LIDAR).

En el caso de los datos topobatimétricos, hay que importar las coordenadas X, Y, Z de cada punto a una hoja de cálculo o a una interfaz de programación y elaborar un gráfico

que represente la pendiente del rango transversal (2 dimensiones) con la distancia en metros desde la cabeza del perfil en la abscisa, y la altitud en metros en la ordenada (Figura 37). Diferentes herramientas permiten generar perfiles de manera automática a partir de las coordenadas de puntos GPS. Los perfiles también pueden extraerse de cuadrículas de elevación existentes a través del módulo de cuadrículas de un SIG o de un software específico para cuadrículas (por ejemplo, Surfer) utilizando la herramienta específica para perfiles (Figura 37).

La superposición del mismo perfil en diferentes fechas permite estimar las evoluciones transversales (pérdida o ganancia de espesor de arena en metros, tránsito a lo largo del perfil). Además, la comparación de varios perfiles de un intervalo permite aprehender las variaciones longitudinales (tránsito de arena de un sector a otro). La ubicación de los perfiles en un mapa también puede realizarse importando las coordenadas X, Y en SIG.

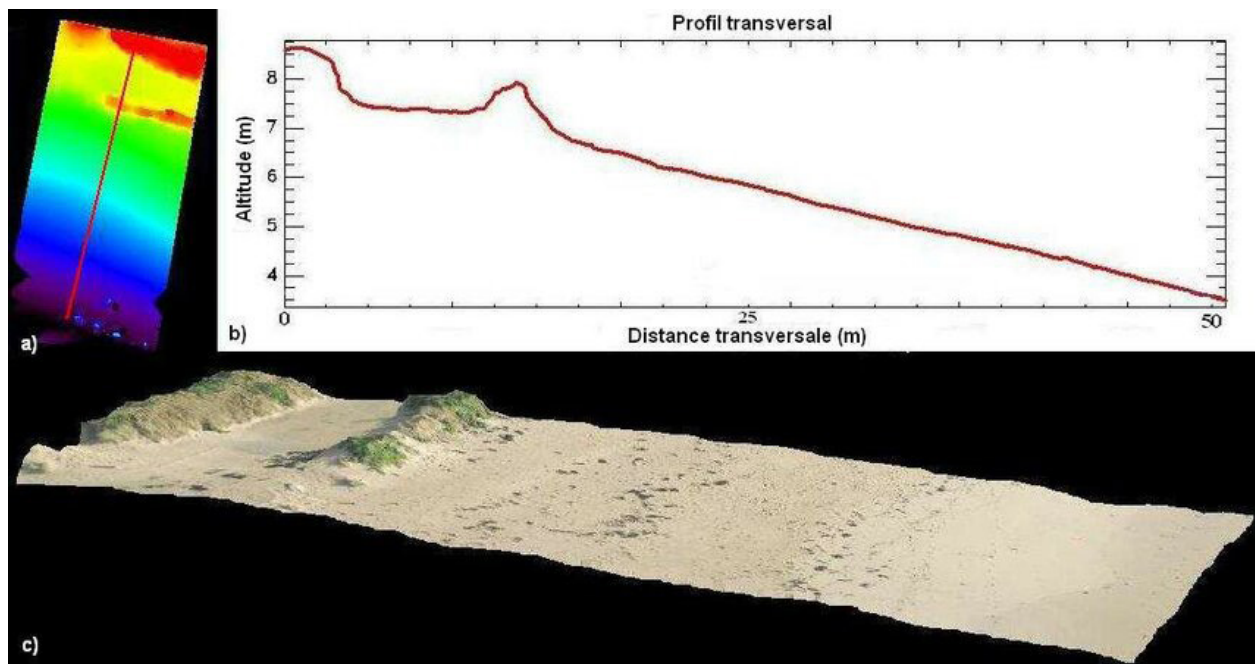


Figura 37 Procesamiento de datos de perfiles de playa: a partir del estudio de campo (izquierda) o de la extracción del MDE (derecha).

Procesamiento de nubes de puntos y cuadrículas (3D)

El principio consiste en mallar un diagrama de dispersión para crear una representación tridimensional del alcance. Las nubes de puntos se crean a partir de datos in situ (GNSS, LIDAR) o imágenes (fotogrametría). La medición directa de la altitud del suelo genera un Modelo Digital de Elevación (MDE), mientras que la extracción a partir de

un mosaico de imágenes se limita a un Modelo Digital de Superficie (MDS) cuyo valor puede ser el de la marquesina o el tejado de un edificio en lugar del suelo.

Es posible crear una malla importando los puntos X, Y, Z en SIG o en un software específico (Surfer, Cloudcompare, etc.). En el caso de la fotogrametría, la creación de un ortomosaico, una nube de puntos y una cuadrícula se realiza con un software específico como Agisoft Metashape.

El análisis temporal se realiza cruzando las cuadrículas para calcular las ganancias o pérdidas de volúmenes (en m³) e identificar los tránsitos correspondientes (Figura 38).

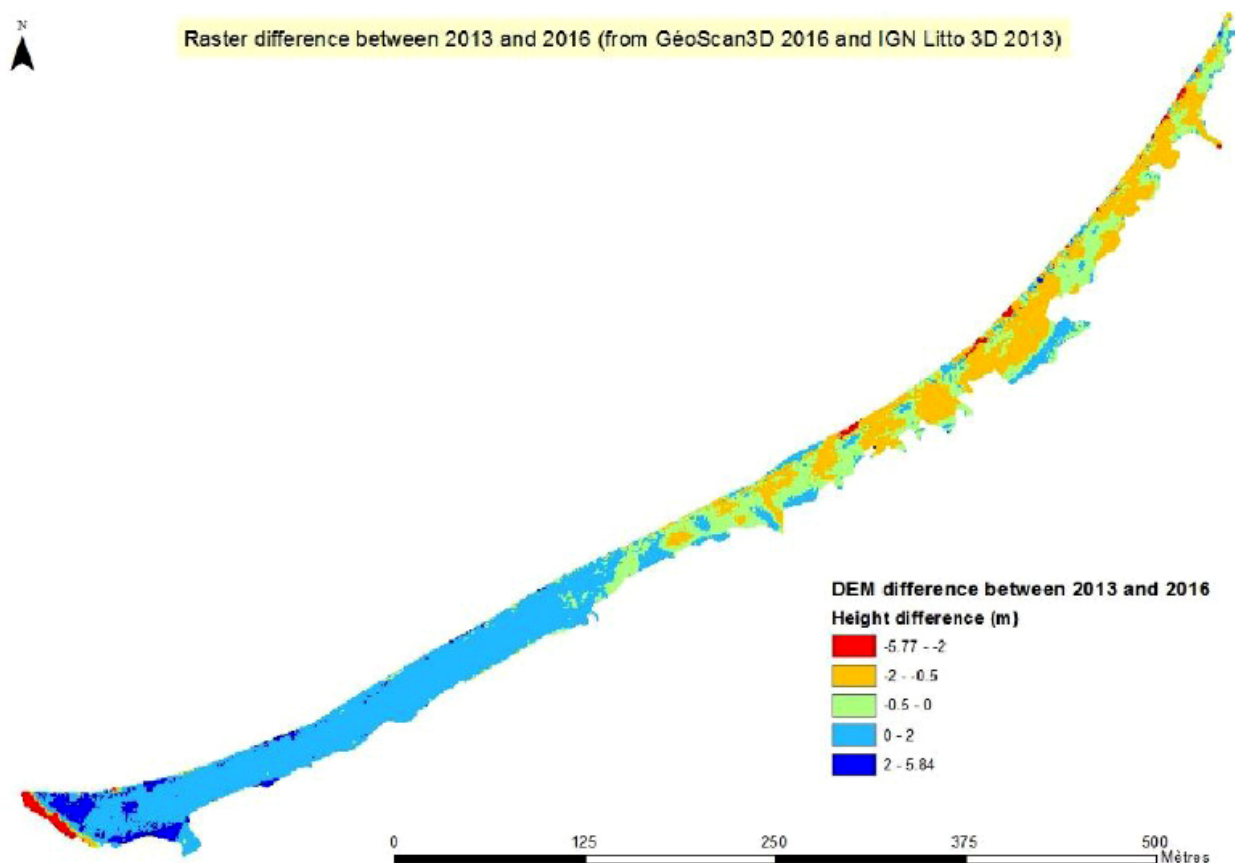


Figura 38 Análisis temporal de la cuadrícula topográfica: sustracción de la elevación de una fecha a otra para obtener la erosión y la acumulación de cada píxel (BRGM).

Tratamiento de datos meteorológicos y marinos

La mayoría de los datos meteorológicos marinos se importan mediante programas y paquetes que pueden automatizarse. Estos permiten extraer parámetros específicos de los datos integrados (promedio, máximo, importante, dirección, etc.). Para el

procesamiento de datos de oleaje, se usa mucho el paquete Wafo (<https://github.com/wafo-project/wafo>), por ejemplo, y es funcional en Matlab y Python. Por supuesto, es posible utilizar una hoja de cálculo para visualizar rápidamente los datos.

La serie cronológica de la altura de las olas (por ejemplo) permite identificar los periodos de temporales morfogénicos y relacionarlos con los morfoindicadores registrados (perfiles, líneas de costa, MDT (Figura 39). Las rosas de oleaje también permiten representar contextualmente el clima (promedio) de oleaje.

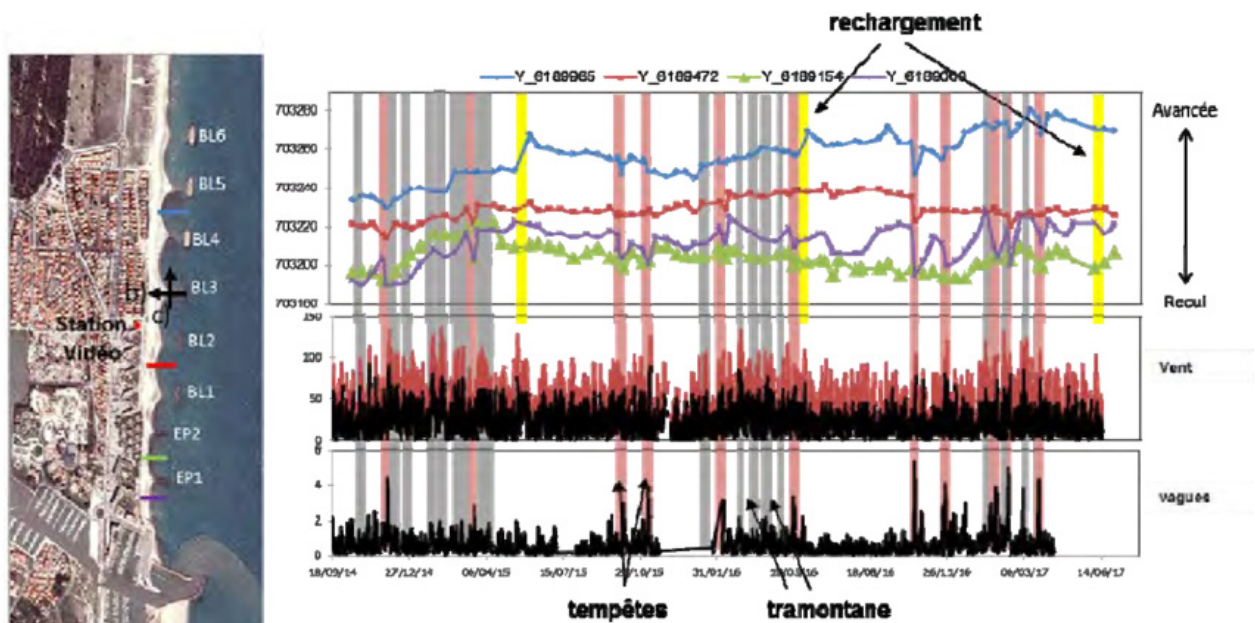


Figura 39 . Series cronológicas con superposición de posiciones de la línea de costa (colores relacionados con los perfiles), viento y olas (de arriba a abajo).

Procesamiento de datos sedimentológicos

Los datos granulométricos son los más utilizados. El modo de tratamiento más sencillo es la representación en forma de curva granulométrica (denominada en S) con el diámetro de los granos en la abscisa y la frecuencia acumulada de los pesos en la ordenada. Esta curva permite evaluar la proporción de clases granulométricas en una muestra según distintos índices estadísticos (media, cuantiles, clases, etc.).

Especialmente, es útil informar sobre la media de distintas formas a lo largo de perfiles o, mejor, en forma de cuadrícula si se dispone de una malla suficientemente tupida. Esta información es especialmente crucial en el contexto de las operaciones de recarga de arena artificial, en las que la arena aportada debe ser lo más parecida posible a la arena local.

4.7. Puntos clave para los responsables de la toma de decisiones

1. Es esencial una red de monitoreo nacional o regional para comprender la dinámica de las playas en su complejidad y ciclicidad.
2. Existen multitud de herramientas y métodos y la inversión debe ser proporcional a la problemática económica y patrimonial de las playas.
3. Es necesaria la formación de personal especializado.
4. La sostenibilidad de un observatorio se plantea a largo plazo.
5. Los seguimientos ayudan a orientar las recomendaciones en materia de gestión y adaptación en el lugar.

Capítulo 5

VISIÓN GENERAL DE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y SU PAPEL EN LA COMPRENSIÓN Y MITIGACIÓN DE LA EROSIÓN COSTERA.

5.1. Introducción

Los modelos numéricos oceanográficos son una herramienta esencial para comprender la dinámica de los sistemas costeros, los procesos de erosión y para diseñar proyectos de protección de playas. Estos modelos utilizan computadoras y algoritmos para resolver ecuaciones matemáticas y simular procesos oceanográficos, y proporcionan predicciones sobre la altura de las olas, las corrientes, el transporte de sedimentos y la erosión costera. Al simular diferentes escenarios, los modelos permiten a los oceanógrafos e ingenieros costeros evaluar los posibles impactos y las causas de la erosión costera y desarrollar estrategias para mitigar sus efectos. En este capítulo se describen brevemente algunos de los modelos que más utilizan los oceanógrafos e ingenieros costeros, como los modelos numéricos de oleaje, los modelos de circulación costera, los modelos acoplados de oleaje/corriente/transporte de sedimentos y los modelos de erosión de playas y rotura de dunas. Con fines educativos, también destacaremos algunos de los trabajos de modelación numérica realizados en los proyectos ejecutivos financiados por la Asociación de Estados del Caribe (AEC) y llevados a cabo por Inversiones Gamma S.A. del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba. Estos proyectos se centraron en la rehabilitación de playas en Viento Frío, Colón, República de Panamá; Runaway Bay, Antigua y Barbuda; y Bonasse, Cedros Bay, República de Trinidad y Tobago. Dado que la modelación numérica es un campo muy avanzado, conviene insistir en que el objetivo de este capítulo no es enseñar a los lectores a utilizar un modelo, sino comprender cómo funcionan y qué cabe esperar de los esfuerzos de modelación.

5.2. Cómo funcionan los modelos numéricos.

Los modelos oceanográficos numéricos son herramientas esenciales de la ingeniería costera, que se utilizan para simular y predecir diversos procesos costeros. Estos modelos ayudan a los ingenieros y oceanógrafos a comprender los procesos físicos que tienen lugar en el océano y las zonas costeras, como la generación y propagación de

las olas, las corrientes inducidas por los vientos, las olas y las mareas, el nivel del mar y las mareas de tempestad, el transporte de sedimentos y la erosión costera. Existen diferentes tipos de modelos numéricos utilizados en ingeniería costera, entre los que se incluyen los modelos hidrodinámicos, que simulan el movimiento del agua en la zona costera; los modelos de oleaje, que simulan la generación, propagación y transformación de las olas; y los modelos de transporte de sedimentos, que simulan el movimiento de los sedimentos en el entorno costero. Estos modelos suelen trabajar juntos, ya que los procesos que simulan están interrelacionados y se afectan mutuamente. Por ejemplo, los modelos de oleaje pueden proporcionar datos a los modelos de transporte de sedimentos, ya que las olas son un motor clave del movimiento de sedimentos. Esto es especialmente cierto en el Caribe, donde las mareas son pequeñas y las olas suelen ser el principal motor del transporte de sedimentos y del cambio de la línea de costa.

Los modelos numéricos pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, y cada uno de ellos puede ser más adecuado en función de la complejidad del problema analizado. En el contexto de la hidrodinámica costera y la erosión de las playas, los modelos 1D, 2D y 3D ofrecen diferentes ventajas. El modelo 1D considera las variaciones a lo largo de una única dimensión horizontal, normalmente el perfil transversal de la costa. Esto es óptimo para simular escenarios en los que las variaciones en la dirección a lo largo de la costa son mínimas o pueden ignorarse, y la atención se centra en los cambios en el perfil de la playa, el transporte de sedimentos o la transformación de las olas a lo largo de un único transecto. El modelo 2D tiene en cuenta las variaciones en ambas dimensiones horizontales, a lo largo y a lo ancho de la costa, y es ideal para simular fenómenos como las corrientes litorales, las corrientes de retorno o los patrones de transporte de sedimentos que presentan variaciones importantes en ambas direcciones horizontales, pero en los que las variaciones verticales pueden promediarse o ignorarse. Por último, los modelos 3D tienen en cuenta las variaciones en las tres dimensiones espaciales y es necesario para simular escenarios complejos en los que las variaciones horizontales y verticales de los parámetros hidrodinámicos son importantes, como la interacción detallada entre las olas, las corrientes y el fondo marino, o el transporte de sedimentos y contaminantes en la columna de agua. La elección de la dimensionalidad del modelo depende, en última instancia, de la naturaleza del problema, de los recursos informáticos disponibles y del nivel de detalle requerido en los resultados de la simulación.

La modelación numérica tiene muchas ventajas, como la capacidad de simular procesos complejos en un entorno controlado, predecir cambios futuros y diseñar medidas eficaces de mitigación de la erosión costera. Sin embargo, también tiene limitaciones, como la

necesidad de datos de entrada precisos, los recursos computacionales necesarios y las simplificaciones y suposiciones que se hacen para representar procesos naturales complejos en un modelo matemático. A veces, estas suposiciones pueden dar lugar a grandes errores, y es importante tener siempre presente que los modelos no son perfectos. Por eso es importante calibrar y validar los modelos con datos oceanográficos y sedimentarios reales. A pesar de estas limitaciones, la modelación numérica es una herramienta indispensable en ingeniería costera, que ayuda a comprender mejor los procesos costeros y a diseñar medidas eficaces para proteger nuestras costas.

Para implementar y ejecutar un modelo numérico de simulación de olas, corrientes y/o transporte de sedimentos para una zona costera, es necesario ejecutar una serie de pasos cruciales. A continuación, se describe cada paso en términos generales:

Determinar el dominio del modelo: En primer lugar, hay que definir el ámbito geográfico de la zona de estudio, así como la resolución de la malla del modelo. En el caso de los modelos costeros, la cuadrícula debe abarcar la zona de interés, desde las aguas relativamente profundas, donde se dispone de datos adecuados para forzar el modelo, hasta la región costera donde se encuentra la playa o la zona de estudio deseada. Se trata de un paso muy importante, ya que definir un dominio inadecuado puede llevar a resultados incorrectos y engañosos debido a los efectos de demarcación. La forma del dominio puede variar en función del tipo de modelo y de si utiliza una malla estructurada, que suele requerir dominios rectangulares, o una malla no estructurada, que permite una mayor flexibilidad a la hora de definir el dominio y puede ajustarse a los contornos de profundidad (Figura 40).

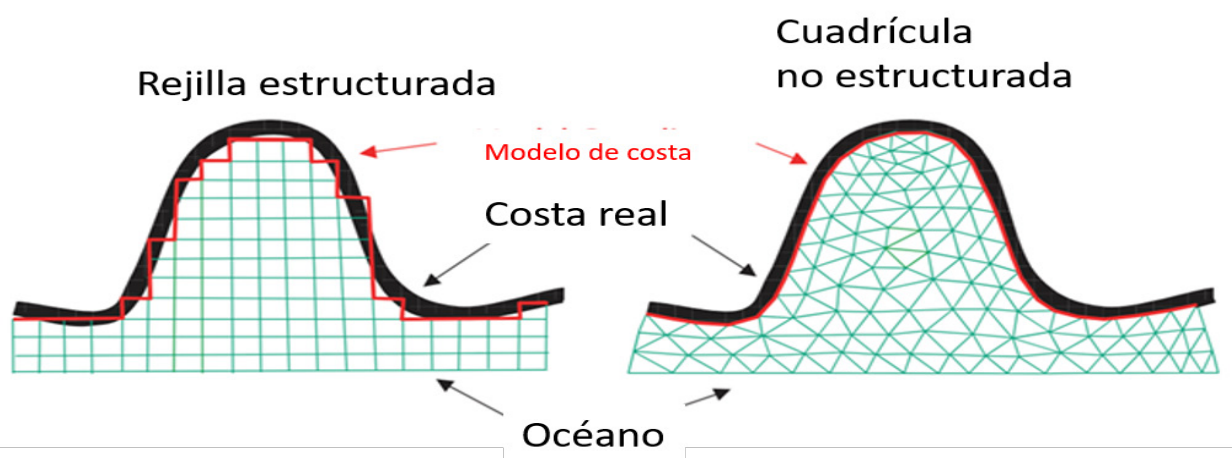


Figura 40 Diferencias entre mallas estructuradas y no estructuradas © 2001-2024
FVCOM @ MEDML. Designed by Dr. Chen

Recopilar datos de entrada: Los modelos oceanográficos necesitan varios conjuntos de datos de entrada, como datos batimétricos, datos eólicos, datos de mareas y condiciones del oleaje en alta mar. Los datos batimétricos utilizados para la cuadrícula o malla del modelo deben ser de alta calidad, idealmente obtenidos a partir de datos LIDAR, y deben resolver las características batimétricas más importantes que afectan las olas y las corrientes en la zona. El dato vertical debe ajustarse cuidadosamente para que coincida con otros conjuntos de datos, especialmente las condiciones de forzamiento del nivel del agua. También son muy importantes las condiciones de oleaje en alta mar para utilizarlas como condiciones de contorno del modelo. Pueden obtenerse a partir de datos de boyas oceanográficas o de modelos regionales de oleaje como WaveWatch III (<https://polar.ncep.noaa.gov/waves>). Estas condiciones de oleaje que dependen del tiempo suelen aplicarse en el límite mar adentro del modelo. La velocidad y dirección del viento también suelen aplicarse como condiciones de contorno de superficie, y pueden obtenerse a partir de sensores meteorológicos terrestres o de boyas, o de modelos numéricos regionales como el GFS, entre otros. Para los modelos de transporte de sedimentos se necesitan datos de entrada como la composición y distribución granulométrica de los sedimentos y la distribución espacial de los hábitats bentónicos.

Procesamiento preliminar los datos: Debe utilizarse todo el procesamiento preliminar de datos, incluidas las transformaciones del sistema de coordenadas, la interpolación de datos en la cuadrícula del modelo y las comprobaciones de coherencia de datos, antes de ejecutar el modelo. Estos datos deben visualizarse cuidadosamente para garantizar que no haya datos de entrada espurios que puedan afectar negativamente a los resultados del modelo.

Configuración del modelo: Esta etapa consiste en seleccionar los parámetros del modelo, como las parametrizaciones físicas, los esquemas numéricos, el paso de tiempo computacional y el rango de frecuencias. La duración de la simulación también es importante y debe determinarse cuidadosamente en función del tipo de modelo, la resolución del modelo y los recursos informáticos disponibles.

Ejecutar el modelo: Tras configurar el modelo y preparar los datos de entrada, se ejecuta la simulación. La mayoría de los modelos modernos se ejecutan utilizando una arquitectura de computación paralela y pueden funcionar en sistemas operativos Linux, Mac o Windows. Los modelos más avanzados y costosos desde el punto de vista computacional suelen ejecutarse en sistemas basados en Linux. Hoy en día, no es necesario poseer un costoso clúster informático, ya que los servicios de computación

basados en la nube, como Amazon Elastic Compute (<https://aws.amazon.com/ec2/>), ofrecen la posibilidad de ejecutar grandes modelos sin ninguna infraestructura informática local.

Procesamiento posterior y análisis de resultados: Una vez finalizada la ejecución del modelo, se procede al procesamiento posterior de los datos de salida. Se utilizan programas informáticos como Python, MATLAB y otros para generar visualizaciones de los resultados, como figuras que muestran la distribución espacial de los contornos de altura de las olas y las corrientes cercanas a la costa para varios pasos cronológicos de simulación y con diferentes niveles de acercamiento.

5.3. Modelación numérica de las olas.

Los modelos numéricos de oleaje simulan la generación, propagación y transformación de las olas mediante ecuaciones matemáticas que describen la física del oleaje. Los modelos utilizan datos de entrada sobre la velocidad del viento, la presión atmosférica, las corrientes oceánicas y la batimetría para predecir la altura, la dirección y el periodo de las olas. Estos modelos son esenciales para comprender el clima de olas y evaluar su posible impacto en la morfología costera. Existen dos tipos de modelos de oleaje: los modelos de oleaje de fase promediada o espectral y los modelos de resolución de fase. Los modelos de oleaje de fase promediada simulan la evolución de la energía de las olas a través de una gama de frecuencias y direcciones, proporcionando información estadística sobre el campo de olas, pero no resuelven las formas de olas individuales o fases. Por otro lado, los modelos de resolución de fase simulan la forma de onda completa de cada ola, capturando las relaciones de fase entre las olas, y son capaces de representar con precisión las interacciones ola-ola, el rompiente de las olas y otros efectos no lineales.

Dos de los modelos de olas más populares son el WaveWatch III y el modelo SWAN. WaveWatch III es un modelo de olas global que proporciona pronósticos de olas con hasta diez días de antelación. El modelo utiliza datos de entrada sobre la velocidad del viento y la presión atmosférica para pronosticar la altura, el periodo y la dirección de las olas. WaveWatch III ha sido desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/viewer.shtml>) y lo utilizan diversas organizaciones, como la Marina estadounidense y el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>). El modelo de olas WaveWatch 3 del Caribe que se encuentra en <http://>

ww3.cimh.edu.bb es una implementación regional del modelo de olas global WaveWatch 3 diseñado específicamente para el Mar Caribe. El modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore, <https://swanmodel.sourceforge.io>) de los Países Bajos es un modelo de oleaje espectral que simula la transformación de las olas desde aguas profundas hasta la zona cercana a la costa. El modelo se utiliza ampliamente para aplicaciones de ingeniería costera, incluidas las evaluaciones de la energía del oleaje, los estudios de erosión costera y el diseño de puertos. La Figura 41 muestra un ejemplo de modelación numérica de oleaje realizado por Inversiones Gamma en su ejecución del proyecto ejecutivo de restauración de playa en Bonasse Beach en la Bahía de Cedros, tomado del informe de Izquierdo Álvarez et al. (2022).

Los modelos de oleaje de resolución de fases, como SWASH (Simulating Waves till Shore) y XBEACH, son modelos numéricos avanzados de resolución de fases diseñados para simular con gran precisión los procesos de oleaje cercanos a la costa. SWASH es un modelo que simula la transformación de las olas, su rompiente y las corrientes inducidas por las olas en la zona de oleaje, mientras que XBEACH está diseñado específicamente para modelar la erosión costera y el transporte de sedimentos en condiciones de tormentas extremas. Ambos modelos son importantes para comprender la hidrodinámica cercana a la costa que afecta a la erosión costera, ya que proporcionan información detallada sobre el comportamiento de las olas y los procesos de transporte de sedimentos que tienen lugar en la zona cercana a la costa. El artículo de Escudero et al. (2012) es un buen ejemplo de cómo se puede utilizar la modelación del oleaje para comprender la física relacionada con la forma en que el Arrecife Mesoamericano de México protege de la erosión las líneas costeras arenosas del norte de Quintana Roo.

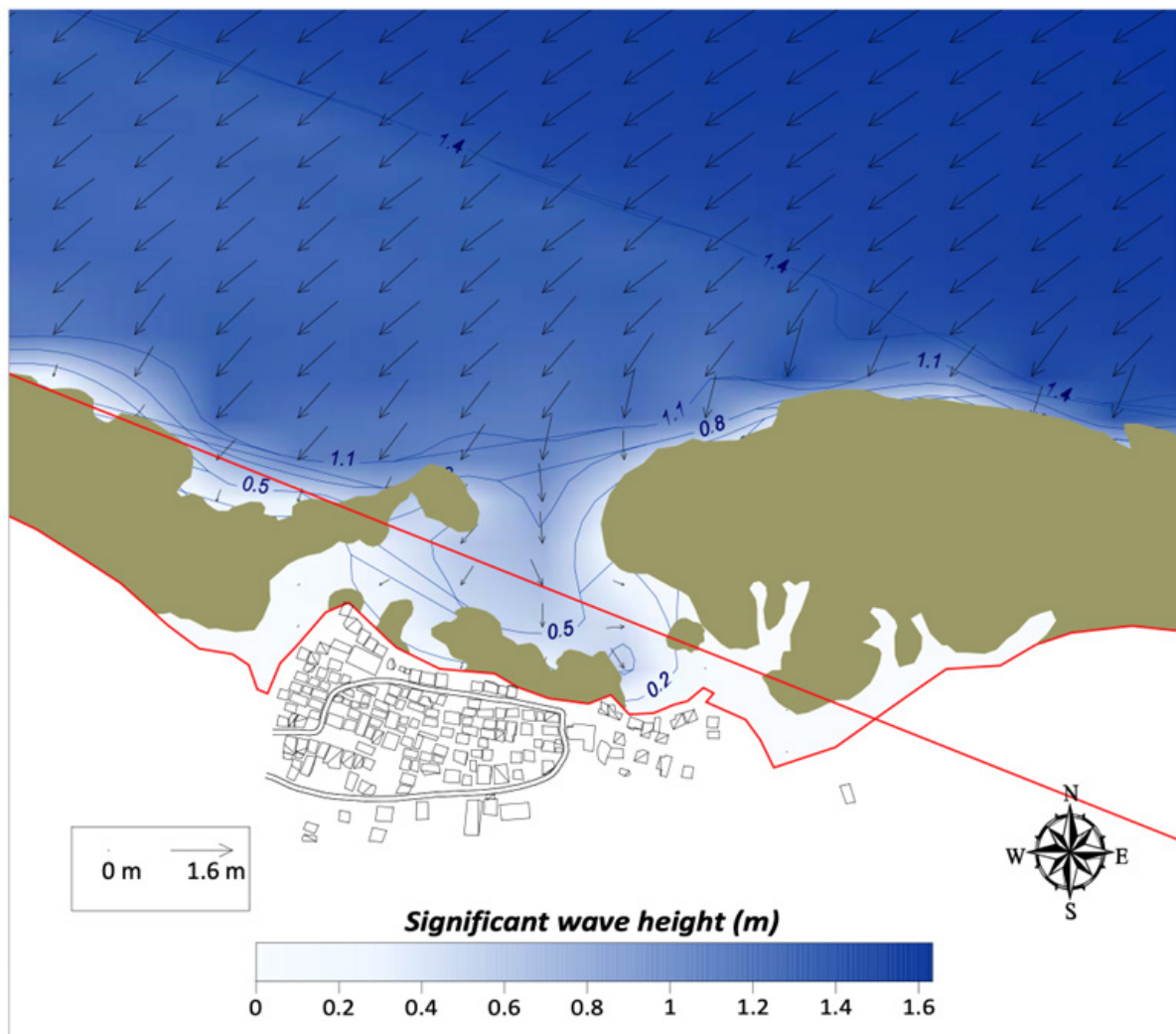


Figura 41 Ejemplo de modelación numérica de olas realizada por Inversiones Gamma en su ejecución del proyecto ejecutivo de restauración de playa en Bonasse Beach en Cedros Bay, Trinidad y Tobago. Se muestran las alturas de las olas (tonos de azul) y la dirección de las olas.

5.4. Modelación numérica de las corrientes

Los modelos de circulación costera simulan el flujo de agua en la zona costera y próxima a la costa, incluidos los efectos de las mareas, las olas, los vientos y las fuerzas de flotación. Estos modelos son esenciales para comprender las corrientes costeras, las fluctuaciones del nivel del agua y el transporte de sedimentos y contaminantes. Tres de los modelos más populares son el modelo ROMS, el modelo ADCIRC y el FVCOM, pero existen muchos otros.

- El sistema regional de modelación oceánica (ROMS) es un modelo numérico de última generación que simula la circulación oceánica y la propagación de las olas en la zona costera. El modelo puede utilizarse para predecir cambios en el nivel del agua, corrientes de marea y transporte de sedimentos, entre otras variables. ROMS se utiliza ampliamente para la investigación y gestión costera, incluyendo estudios de inundaciones costeras, transporte de sedimentos y acidificación de los océanos.
- El modelo de Circulación Avanzada (ADCIRC) es un modelo de elementos finitos que simula los efectos de las mareas, las olas y las mareas de tempestad en la hidrodinámica costera. El modelo se utiliza ampliamente en el Caribe para la predicción de mareas de tempestad y la evaluación de riesgos, incluidos los huracanes y otros fenómenos meteorológicos extremos.
- El modelo oceánico comunitario de volumen finito (FVCOM) es un modelo de circulación oceánica costera tridimensional, de malla no estructurada y volumen finito que simula la dinámica de las corrientes oceánicas, las mareas y las distribuciones de temperatura y salinidad en aguas costeras y estuarinas (Chen et al., 2003). Para el Caribe resulta especialmente útil para simular el flujo de agua en zonas de manglares, estuarios y ensenadas.

Los modelos de resolución de fases, como SWASH y XBEACH, también pueden utilizarse para simular las corrientes inducidas por las olas en las zonas costeras. Debido a la naturaleza de las olas y al hecho de que son más fáciles de medir y su física es más simple, los modelos de olas suelen ser más precisos que los modelos de circulación. Los modelos de circulación siempre deben validarse rigurosamente, sobre todo cuando son importantes procesos como la flotabilidad, las corrientes oceánicas a gran escala y las corrientes inducidas por el viento. La Figura 42 muestra un ejemplo de los resultados de la modelación numérica de las corrientes inducidas por el oleaje, que muestra la salida de un modelo de circulación costera utilizado por Inversiones Gamma en su ejecución del proyecto ejecutivo de restauración de la playa de Bonasse Beach en la bahía de Cedros, Trinidad y Tobago (Izquierdo Álvarez et al. 2022).

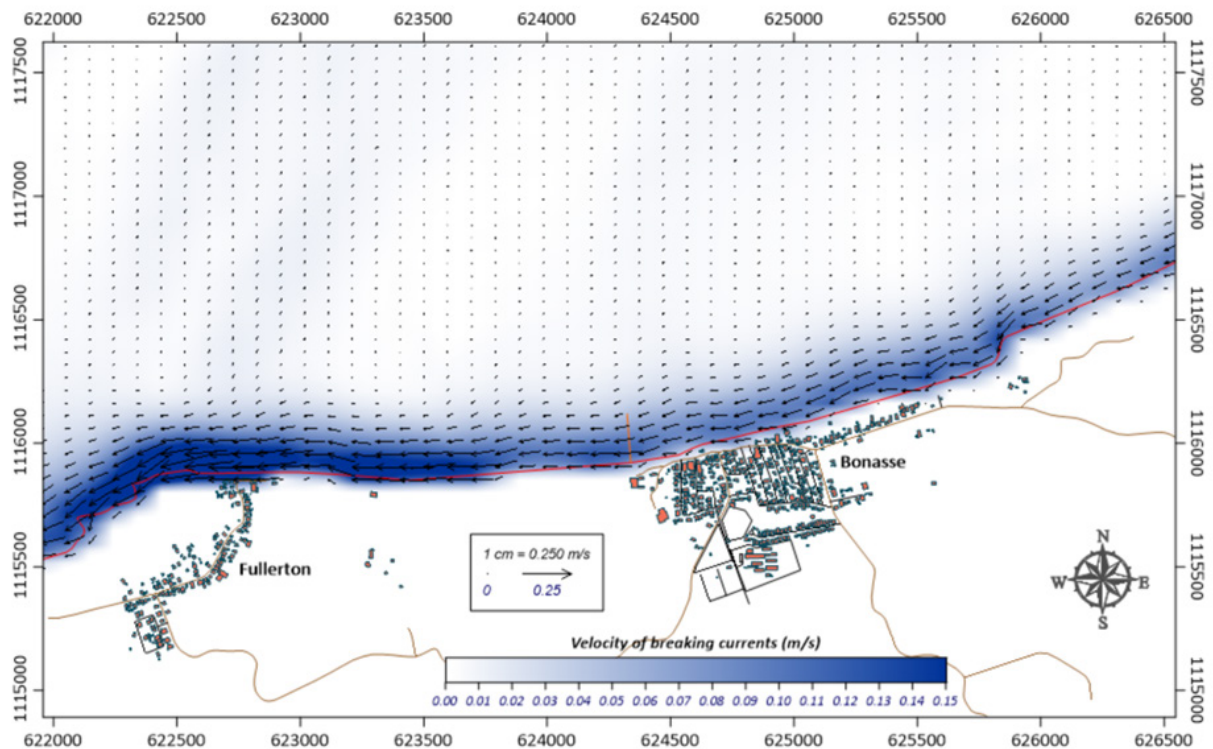


Figura 42 Ejemplo de salida de un modelo de circulación costera utilizado por Inversiones Gamma en su ejecución del proyecto ejecutivo de restauración de la playa de Bonasse Beach en la bahía de Cedros, Trinidad y Tobago.

5.5. Modelación numérica del transporte de sedimentos y de la erosión costera.

Los modelos acoplados de oleaje/corriente/transporte de sedimentos simulan la interacción entre el oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos en la zona costera. Estos modelos son esenciales para comprender los procesos que conforman la morfología costera y el impacto de la erosión costera. Estos modelos también son esenciales para estimar el posible éxito de un proyecto de restauración costera y cómo puede afectar la dinámica de las playas. A continuación, se enumeran algunos de los modelos más populares:

- El modelo Delft3D (<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>) es un modelo numérico en 3D que simula las olas, las corrientes y el transporte de sedimentos en la zona costera. El modelo puede utilizarse para predecir la erosión de las playas, la degradación dunar y los cambios en la línea de costa, entre otras variables. Delft3D se utiliza ampliamente para la gestión costera, incluido el diseño de medidas de protección del litoral y la evaluación de los riesgos costeros.

- El modelo XBEACH (<https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>) es un modelo numérico que simula los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en la zona cercana a la costa. El modelo puede utilizarse para predecir el impacto de la erosión costera en playas y dunas, incluyendo la degradación dunar y la invasión de aguas marinas. XBEACH se utiliza ampliamente para la investigación y la gestión costera, incluida la comprensión de los impactos de las tormentas en los proyectos de nutrición de playas.
- CSHORE (Cross-Shore): CSHORE es un modelo unidimensional basado en procesos para predecir el transporte de sedimentos a través de la costa y los cambios en el perfil de la playa (Johnson et al., 2012). Incluye formulaciones para la transformación de las olas, el transporte de sedimentos y los procesos de erosión/deposición, y fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos.
- GENESIS (Modelo generalizado de simulación de cambios en la línea de costa): GENESIS es un modelo numérico unidimensional para simular el transporte de sedimentos a lo largo de la costa y el cambio de la línea de costa. Combina la transformación de las olas, el transporte de sedimentos y la evolución de la línea de costa en un único marco.
- CMS (USACE Coastal Modeling System): CMS es un conjunto de modelos integrados para el cálculo de la circulación, las olas, el transporte de sedimentos, la mezcla de contaminantes y el cambio morfológico (Buttolph et al. 2006). También fue producido y es mantenido por el USACE. Es más avanzado que GENESIS y CSHORE en el sentido de que permite simulaciones 2D, pero carece de la capacidad de resolver explícitamente la erosión del perfil superior de la playa.

Los modelos mencionados son sólo una lista parcial y existen muchos otros modelos que simulan el transporte de sedimentos y la erosión. La selección del modelo para un estudio específico depende de la experiencia del oceanógrafo y/o ingeniero costero, de los recursos computacionales disponibles y de la complejidad del lugar. La Figura 43 muestra un ejemplo de modelación de transporte de sedimentos y cambios morfológicos realizado por Inversiones Gamma para el proyecto ejecutivo de restauración de la playa de Runaway Bay Beach en Antigua y Barbuda. La ilustración fue extraída del informe de Morales Diaz et al. (2022).

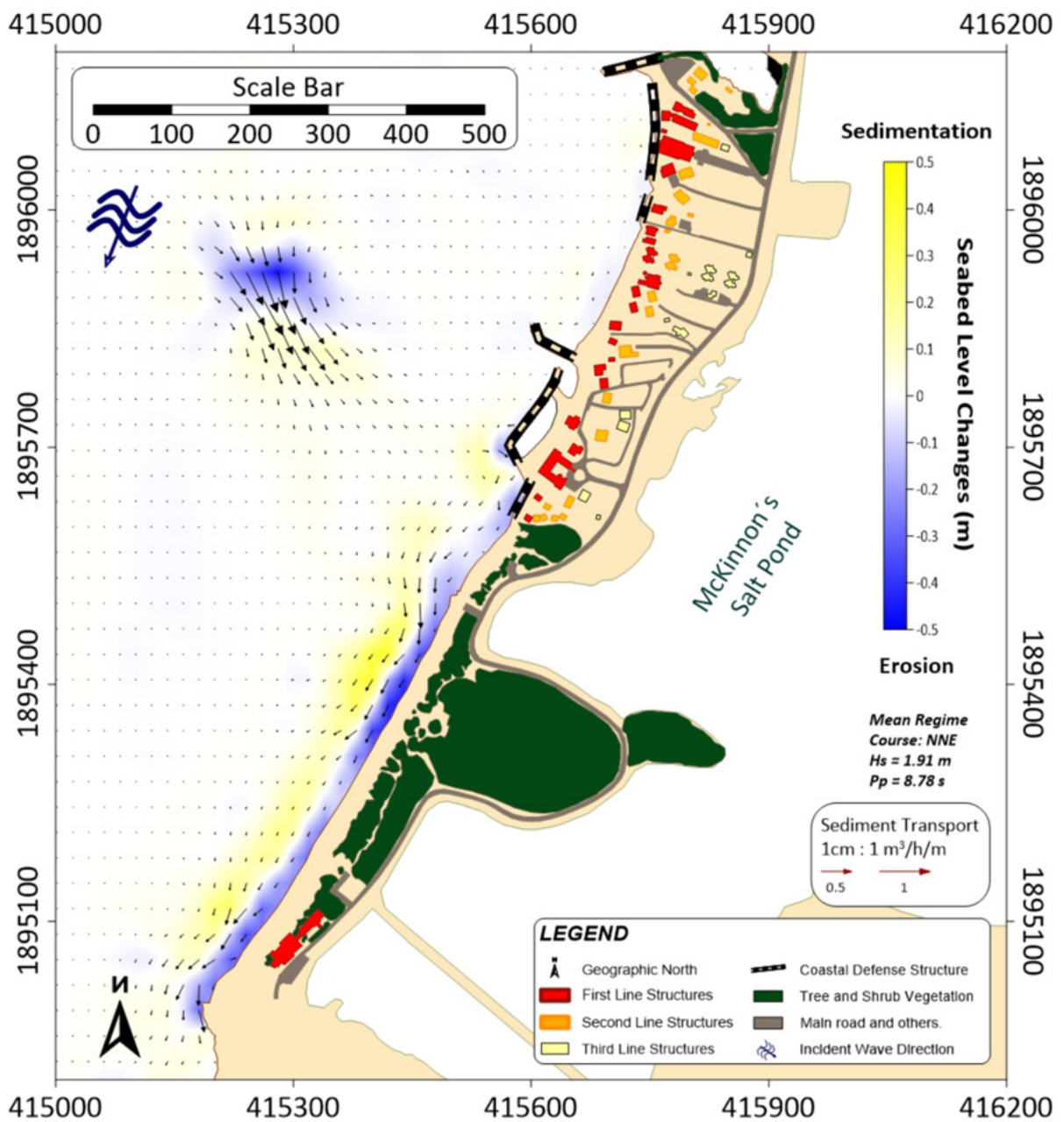


Figura 43 Ejemplo de modelación de transporte de sedimentos y cambios morfológicos realizado por Inversiones Gamma para el proyecto ejecutivo de restauración de la playa de Runaway Bay Beach en Antigua y Barbuda. Tomado del informe de Morales Diaz et al. (2022).

5.6. Numerical Modelling in Support of Projects Design.

La modelación numérica de muy alta resolución es a veces la única herramienta de que disponen los oceanógrafos e ingenieros cuando tratan de estimar el rendimiento potencial de un proyecto de mitigación de la erosión costera. En general, los modelos suelen aplicarse para examinar los patrones reales y en proyectos del oleaje y la

circulación, así como para evaluar distintas alternativas de proyectos.

Por ejemplo, cuando se colocan estructuras de disipación de oleaje cerca de una playa, los efectos de estas estructuras sobre la dinámica del oleaje y de la circulación deben analizarse en condiciones operativas, así como durante fenómenos extremos. Esto es importante para garantizar que las estructuras cumplan su objetivo, asegurándose al mismo tiempo de que no haya consecuencias no deseadas para las playas cercanas. Deben estudiarse detenidamente los impactos de cualquier estructura de atenuación del oleaje en la dinámica general de circulación de la zona de estudio, dada la importancia de una calidad adecuada del agua para la salud de los organismos biológicos, como los corales y las praderas marinas.

También se utilizan los modelos numéricos para estimar la vida útil prevista de los proyectos de acondicionamiento de playas y la frecuencia del acondicionamiento de mantenimiento que sería necesario para mantener una determinada anchura de playa. Cuando los modelos numéricos se combinan con modelos económicos, también pueden ayudar a determinar la relación coste-beneficio y si un proyecto concreto de estabilización del litoral o de mitigación de la erosión es económicamente viable.

Algunos trabajos recientes también han mostrado el uso de la modelación numérica para evaluar la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de la vegetación de la parte superior de la playa para mitigar la erosión costera (Laigre et al., 2023).

Para ejemplos de modelación numérica específica de proyectos en el Caribe y cómo la modelación puede ayudar a informar el diseño de proyectos de restauración de playas, se remite al lector a los informes mencionados de Morales Díaz et al. (2022) e Izquierdo Álvarez et al. (2022).

Síntesis

La selección de un modelo numérico apropiado para comprender la erosión costera y de las playas depende del entorno costero específico y de los objetivos del estudio. Cada modelo tiene sus ventajas y limitaciones, y es crucial tener en cuenta la complejidad, la disponibilidad de datos y los recursos computacionales a la hora de elegir un modelo adecuado. En algunos casos, puede ser beneficioso combinar varios modelos para captar mejor los diferentes procesos y escalas implicados en la erosión costera y el transporte de sedimentos.

Capítulo 6

MEDIDAS DE PROTECCIÓN Y REHABILITACIÓN DE LAS PLAYAS DEL CARIBE

El problema de la erosión costera no sólo en el Gran Caribe sino en todo el mundo, asociado principalmente al aumento del nivel del mar debido al cambio climático, y la importancia de las playas en la economía de muchos estados costeros, ha planteado la necesidad de proponer alternativas de mitigación en un amplio abanico de opciones. Estas van desde las opciones blandas a las duras, pasando por las intermedias, así como las mixtas.

6.1. Procedimiento de evaluación de las causas de la erosión y propuestas de solución

Para el análisis de alternativas se requiere inicialmente una evaluación exhaustiva del lugar concreto, identificando las causas de la erosión costera, los elementos naturales y artificiales presentes en la zona concreta y garantizando, en la medida de lo posible, la recuperación y preservación de sus valores naturales. Según el Manual de Nutrición Artificial de Playas (CUR, 1987), también deben tenerse en cuenta los procesos costeros que actúan en la zona y los intereses económicos específicos.

La propuesta metodológica para la rehabilitación y protección de playas de Torres-Hugues & Córdova-López (2010) presenta un esquema de cómo se puede abordar un proyecto de solución a la erosión costera (Figura 44). La metodología propuesta por estos autores responde a un punto de vista más amplio de diseño de soluciones, ya que contempla un abanico más amplio de opciones, y establece un proceso de observación del entorno más detallado para prevenir o actuar a tiempo, en caso de que reaparezca la erosión costera.

Del mismo modo, se requiere la evaluación del impacto ambiental que puede generar la solución propuesta, considerando los posibles impactos, positivos y negativos, de tipo ambiental, sociocultural y económico Gamma - ICIMAR (2022).

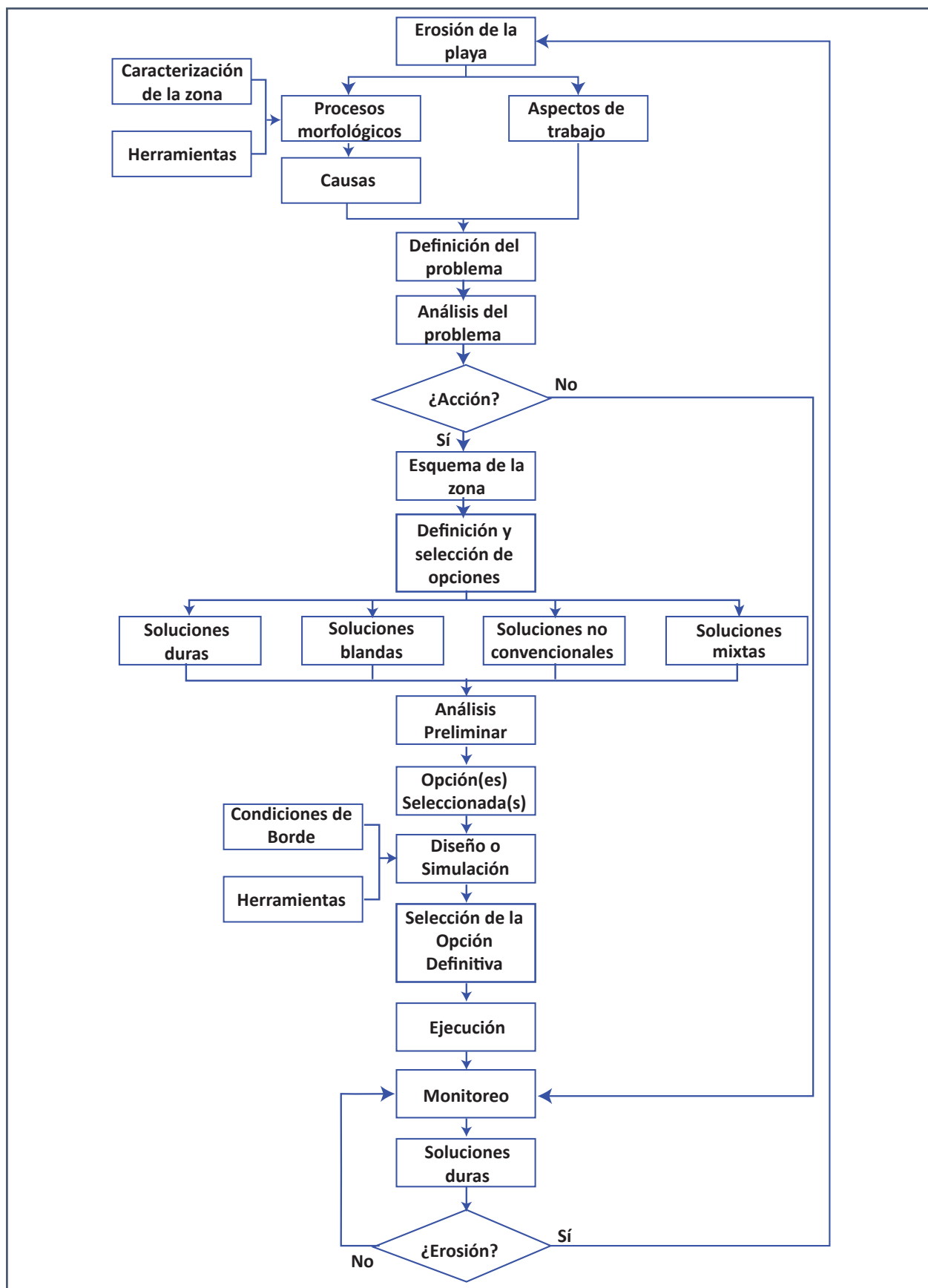


Figura 44 Metodología para la rehabilitación y protección de playas (tomada de Torres-Hugues & Córdova-López (2010))

6.2. Consideraciones jurídicas.

Las consideraciones jurídicas que deben tenerse en cuenta para llevar a cabo proyectos de mitigación de la erosión costera dependen de la legislación vigente en cada país para este tipo de obras. En general, muchos países no disponen de normas claras al respecto que sirvan para orientar claramente las actuaciones en este ámbito.

Por ejemplo, según el informe de Gamma - ICIMAR (2022), en la República de Panamá no existe una legislación basada en el funcionamiento de los sistemas costeros que limite la extensión de las propiedades sobre el perfil dinámico de la playa. Por su parte, en Antigua y Barbuda no existe un marco institucional y jurídico que promueva y garantice la implementación de estrategias y acciones, encaminadas a la restitución gradual de las condiciones naturales de la playa (Gamma, 2022). Sin embargo, otros países han avanzado en la generación de este marco institucional y jurídico, avanzando hacia programas de mitigación de la erosión. Por ejemplo, Barbados ha creado una Unidad de Gestión de la Zona Costera (<https://www.coastal.gov.bb/>) cuyo trabajo incluye el diseño y ejecución de medidas de ingeniería duras y blandas para la protección, estabilidad y mejora de las playas (Wong, 2018). El informe también destaca la implementación del Programa de Manejo Costero Integral de Playa Varadero en Cuba, así como su Programa Nacional de Inversiones para la Recuperación de Playas, como parte de un Plan de Estado para Enfrentar el Cambio Climático, que fue precedido por la implementación del Decreto Ley 212, sobre el Manejo de la Zona Costera (Gamma, 2022).

6.3. Soluciones para mitigar la erosión costera.

En general, las soluciones contra la erosión costera se dividen en dos grandes grupos, las duras (infraestructuras grises) y las blandas (soluciones basadas en la naturaleza o infraestructuras verdes), aunque en los últimos años también se han generalizado las soluciones híbridas, que combinan aspectos de ambos grupos. Las soluciones basadas en el ecosistema están cobrando cada vez más protagonismo. Sin embargo, su principal inconveniente es la lentitud con la que se obtienen resultados prácticos para la restauración de la playa, aunque a largo plazo pueden ser decisivas. (Wong,

Tabla 3 Coastal erosion Solutions by category

Tabla 3 Soluciones para la erosión costera por categoría.

| Soluciones duras | Soluciones híbridas | Soluciones blandas |
|--|---------------------|--|
| Diques Espolones Rompeolas Espigones artificiales | Costas vivas | Ingeniería basada en la naturaleza Restauración de ecosistemas Gestión basada en los ecosistemas |

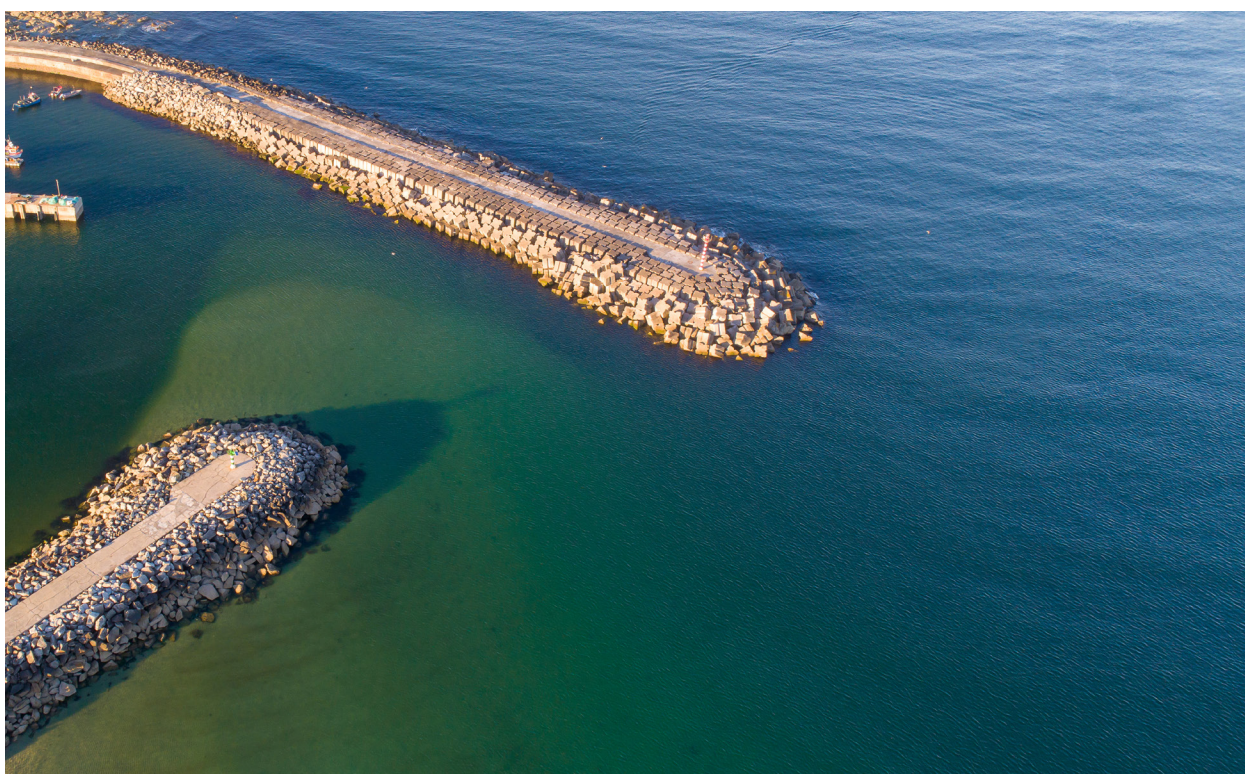


Figura 45 Ejemplo de espolones costeros

6.3.1. Soluciones duras o infraestructuras grises

Las opciones duras, también llamadas infraestructuras grises, corresponden a la ingeniería con estructuras duras construidas en la playa (diques, espolones, rompeolas o escolleras artificiales). Estas opciones influyen en los procesos costeros para detener o ralentizar el ritmo de la erosión costera.

Espolones

Un espolón es una estructura costera construida perpendicularmente a la línea de

costa, de orilla a mar, para atrapar el transporte litoral de sedimentos o controlar las corrientes litorales (Figura 45). Este tipo de estructura es fácil de construir con diversos materiales, como madera, roca o bambú, y suele utilizarse en costas arenosas. Las desventajas son que produce socavación local a los pies de las estructuras, provoca erosión aguas abajo, requiere un mantenimiento regular y suele necesitar más de una estructura (Prasetya, 2007).

Este tipo de solución, que ha sido ampliamente implementada en muchas playas del Caribe, especialmente en el Caribe continental, tiene múltiples ejemplos en los que los resultados esperados no tienen mucho éxito en comparación con los reales, generando erosión aguas abajo. Por ejemplo, el espolón construido en la playa principal de la ciudad de Riohacha (Caribe colombiano), mostrado en la Figura 5.2, logró la restauración de la playa en unos 100 m, pero causó dos grandes daños, por un lado, la acumulación de sedimentos entre el espolón y la desembocadura del río Ranchería (que provee la arena del sector), generando un taponamiento en épocas de estiaje; adicionalmente la falta de sedimentos aguas abajo, debido a estas estructuras, generó una alta erosión en los sectores de José Antonio Galán y Marbella (Ricaurte-Villota et al., 2018).

Dique

Un dique es una estructura construida en paralelo a la costa que la protege de la acción de las olas (Figura 46). Esta estructura tiene muchos diseños diferentes; puede utilizarse para proteger un acantilado del ataque de las olas y mejorar la estabilidad de los taludes, y también puede disipar la energía de las olas en costas arenosas. Las desventajas son que crea reflejos de las olas y favorece el transporte de sedimentos mar adentro; la socavación se produce al pie de las playas erosionadas, no favorece la estabilidad de la playa y debe construirse a lo largo de toda la costa. De lo contrario, se producirá erosión en la costa adyacente (Prasetya, 2007).



Figura 46 Dique de contención de cara curva

La construcción de estas estructuras incluye materiales como escombreras, mampostería de granito u hormigón armado. Según su disposición, los diques se clasifican en: dique de frente curvo, malecón escalonado y dique de escollera.

Rompeolas sumergido

Un rompeolas sumergido es una estructura paralela a la costa (en la zona próxima a la costa) que sirve para absorber las olas. Reduce la energía de las olas a su sotavento y crea un saliente o tómbolo detrás de la estructura que influye en el transporte de sedimentos a lo largo de la costa (Figura 47). Más recientemente, la mayoría de los espigones sumergidos se convierten en arrecifes artificiales polivalentes en los que se desarrollan hábitats para peces y mejoran el rompiente para actividades deportivas acuáticas. Estas estructuras son adecuadas para todas las costas. Sus desventajas son que son grandes y relativamente difíciles de construir, necesitan un diseño especial y las estructuras son vulnerables a la acción de las olas fuertes (Prasetya, 2007).



Figura 47 Rompeolas sumergido

Rompeolas artificial

Esta estructura se construye para fomentar las playas naturales porque actúa como un promontorio artificial (Figura 48). Es relativamente fácil de construir y requiere poco mantenimiento. Las desventajas son que también es una estructura relativamente grande, puede causar erosión aguas abajo de la longitud de costa protegida y tiene poca estabilidad frente a grandes olas (Prasetya, 2007).



Figura 48 Rompeolas artificial

6.3.2 Soluciones blandas o basadas en la naturaleza

Algunas soluciones que han ganado terreno en el campo de la mitigación de la erosión costera son las basadas en la naturaleza. El enfoque de las estrategias de los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID) para hacer frente al cambio climático es esencialmente adaptativo. Para muchos países, la adaptación pasa esencialmente por el diseño de estrategias de retirada progresiva de las zonas más vulnerables, ajustadas al ritmo previsible de subida del nivel del mar y al seguimiento del retroceso de la línea de costa. Aunque se reconoce que la retirada, como estrategia de adaptación, no es posible en muchos Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID) debido a su pequeño tamaño, la escasez de tierras y su naturaleza de baja altitud (Wong, 2018).

6.3.3. Ingeniería basada en la naturaleza

Restauración artificial de playas

La alimentación artificial de playas es una de las técnicas de restauración de playas más aplicadas en la actualidad, debido a sus ventajas ambientales y paisajísticas frente a otras alternativas basadas en el uso de estructuras rígidas y una de las técnicas más exitosas y eficaces. Consiste en aportar nuevos volúmenes de arena procedentes de una zona de préstamo próxima, que aporta al sistema el sedimento perdido por efecto de la erosión. Proporciona al perfil de playa el volumen de arena y el espacio necesario para su funcionamiento dinámico, sirviendo además como defensa costera (Gamma Inversiones, 2022).

Las soluciones de nutrición de playas han sido implementadas con éxito en la playa de Varadero (Cuba) y han sido propuestas en los proyectos ejecutivos de rehabilitación de playas en Runaway (Antigua y Barbuda), Bonasse Bay (Trinidad y Tobago) y Viento Frío (Panamá), Algunos de los detalles de estos proyectos se pueden encontrar en el Capítulo 6 de este manual.

El principal inconveniente de esta alternativa es que, aunque aporta en poco tiempo la arena perdida en varios años y restablece el funcionamiento del perfil, no actúa directamente sobre las causas que generaron los procesos erosivos, por lo que con el paso de los años requiere nuevas labores de mantenimiento. La rapidez con la que se restaura el perfil y la no introducción de nuevas estructuras en la zona costera es una de sus ventajas más importantes, siendo una solución más respetuosa con el

medio ambiente y más estética que la creación de espigones, escolleras o muelles. Su aplicación no compromete la aplicación de otras medidas en el futuro, si llegan a ser necesarias, ya que no modifica la morfología básica del sector costero, ni introduce elementos costosos y difíciles de eliminar. (Gamma Inversiones, 2022).

Este tipo de solución tiene tres componentes principales: la definición de las zonas de préstamo, la idoneidad de la arena a utilizar y el cálculo del volumen de relleno.

Área de préstamo: Consiste en la localización de una zona de préstamo, marina o continental adyacente, con el volumen y calidad necesarios para ser introducida en la playa y a una distancia de la zona de actuación que sea económicamente viable (Gamma Inversiones, 2022).

Idoneidad de la arena a utilizar: A través de la caracterización sedimentológica, tanto de la playa como de la zona de préstamo, se establece la composición granulométrica y procedencia de la arena, cuyos resultados permiten delimitar las zonas con mejores posibilidades para su utilización en las labores de restauración (Gamma Inversiones, 2022).

Cálculo del volumen de relleno: La experiencia internacional muestra que se utilizan diversos criterios para estimar el volumen de relleno, aunque existe un consenso en que la densidad de vertidos no debe ser inferior a 60 m³ por metro lineal de playa (Juanes, 1996). Para el diseño de las playas se utiliza una fórmula que determina el perfil de equilibrio a partir de las condiciones de oleaje y sedimento dadas. Cuando se realiza la alimentación artificial, la arena inyectada se distribuye a lo largo de todo el perfil dentro de la zona de rompiente hasta una profundidad conocida como profundidad de cierre del perfil activo (h^*) (Gamma Inversiones, 2022a). La evaluación cuantitativa del volumen de relleno adicional que se requiere para obtener las dimensiones reales del proyecto se realiza, teniendo en cuenta las pérdidas de arena que se pueden producir por selección natural, transporte de sedimentos y redistribución por granulometrías (Gamma Inversiones, 2022a), mediante el cálculo del factor de sobrellenado RA según la metodología propuesta en el Shore Protection Manual (Army Coastal Engineering Research Center, 1984) y en el Manual on Artificial Beach Nourishment (CUR, 1987).



Figura 49 Alimentando una playa con dragado

Sacos de arena y geotubos

Los sacos de arena son una solución muy común contra la erosión costera. Se apilan a lo largo de la costa para proteger de las olas y de la subida del nivel del mar. Las ventajas son que suelen ser una solución económica y accesible contra la erosión costera, pero los inconvenientes son que, aunque de aspecto natural, están hechos de un material sintético, suelen rellenarse in situ y, si los sacos de arena están perforados, su resistencia se ve gravemente mermada.

Mientras que los geotubos son sacos de arena de alta resistencia fabricados con diversos tejidos geotextiles (Figura 50), el tejido elegido determina la resistencia y la porosidad de la solución contra la erosión costera y se rellenan con diversos materiales, se apilan in situ y se cubren con arena y vegetación. Tienen las ventajas de proporcionar estructura y estabilidad a la costa, aumentar la resistencia superficial de la arena y disipar la energía de las olas, que se pueden poner con plantas autóctonas, reforzando la línea de costa y creando un entorno más natural. Una desventaja es que pueden quedar expuestos con el tiempo o tras una tormenta, y aunque esto no compromete necesariamente la función del producto, resulta menos atractivo para las comunidades costeras que desean un litoral natural (Colonial Construction Materials, 2022).



Figura 50 Geotubos en zona de playa (Tomado de Geosolutions)

6.3.4. Métodos de restauración de ecosistemas

Estos métodos pretenden trabajar con el entorno físico y complementarlo, utilizando métodos naturales de defensa costera. Utilizan principios y prácticas ecológicas que tienen un menor impacto negativo en el entorno natural y, por lo general, un menor coste.

Restauración de las dunas costeras y su vegetación

Las dunas costeras son conocidas por sus funciones ecológicas y cualidades estéticas, ya que constituyen un hábitat único con un alto valor de biodiversidad para la flora y la fauna. Además, son reconocidas por su capacidad protectora, ya que actúan como barrera natural contra las inundaciones provocadas por las mareas de tempestad y el oleaje (D'Alessandro et al., 2020). La estrategia de restauración de la vegetación dunar tiene en cuenta la zonificación natural en especies vegetales que refleja los diferentes niveles de salinidad del sustrato que toleran, donde las plantas herbáceas son las que toleran los mayores niveles de aerosol salino (Gamma, 2022).

Al igual que con otras alternativas de mitigación de la erosión costera, antes de llevar a cabo cualquiera de las fases de la restauración, es importante conocer la dinámica de la costa y determinar si existe una fuente de arena disponible para la construcción de dunas (Lithgow et al., 2014).

La restauración de los sistemas de dunas (Figura 51) se consigue a través de seis pasos

básicos: eliminación o control de las fuentes de degradación, recuperación topográfica, recuperación de la vegetación (cuando sea necesario), protección del lugar, divulgación y seguimiento a largo plazo (Ley-Vega et al., 2007).



Figura 51 Restauración de dunas

Este tipo de medidas se han implementado con éxito en varias partes del Caribe, como Cuba y México, por ejemplo, en las playas de la Riviera Maya en México, se ha desarrollado con éxito el proyecto “Adaptación al cambio climático basada en ecosistemas con el sector turístico” (ADAPTUR), en el que se implementó la restauración de dunas con varios tipos de estrategias, incluyendo la reforestación con especies variadas y estratificadas¹.

1 <https://adaptur.mx/>

Restauración de arrecifes de coral y praderas marinas

Utilizando el servicio de protección costera que proporcionan los ecosistemas costeros sumergidos, como los arrecifes de coral y las praderas marinas, se basa en el principio de que estos ecosistemas disipan la energía de las olas mediante el rompiente del oleaje o la fricción a través de las estructuras de los arrecifes y protegen así las zonas costeras (van Zanten et al., 2014). Los arrecifes de coral también producen arena fina que alimenta las costas y retiene los sedimentos (Bellwood, 1995; Reguero et al., 2018), mientras que las praderas de pastos marinos estabilizan aún más los sedimentos a través de su densa capa de rizomas y raíces, incluso en eventos de olas extremas (James et al. 2021).

Este tipo de iniciativas se está llevando a cabo con éxito en varios países del Caribe, como Cuba, México, Costa Rica, República Dominicana y Colombia, entre otros. Si bien es cierto que aún no existen resultados concluyentes sobre su efectividad en la reducción de la erosión costera, los ejercicios realizados hasta el momento incluyen a diversos actores locales de las regiones, como operadores turísticos y pescadores, lo que genera estrategias para reducir la vulnerabilidad de los habitantes costeros, como en el caso del proyecto colombiano “Un millón de corales para Colombia”².



Figura 52 Un científico marino llevando a cabo un proyecto de restauración de coral en un ecosistema de arrecifes dañados.

6.3.5. Estrategias de gestión costera.

Parte del problema de la erosión costera se debe a causas antrópicas como la extracción de arena, el crecimiento desordenado de las zonas costeras, la mala construcción de infraestructura de protección costera, la destrucción de ecosistemas costeros como dunas, arrecifes de coral, praderas de pastos marinos, entre otros; que además de perder su servicio ecosistémico de provisión y retención de sedimentos, disminuye su capacidad de proteger las costas de amenazas costeras como huracanes, mares de leva, tsunamis y otros eventos extremos. Algunas de las alternativas para la protección y rehabilitación de las playas están relacionadas con estrategias de manejo de zonas costeras, que garanticen que sus recursos sean utilizados racionalmente preservando su belleza y procesos naturales.

Planificación costera e instrumentos de política pública para la erosión costera

La planificación del futuro desarrollo de la zona costera, a una distancia segura detrás de la playa, reduciría la necesidad de costosas medidas defensivas en el futuro (Camber, 1998).

El enfoque práctico para gestionar tanto las compatibilidades como las incompatibilidades del medio marino ante la presión del desarrollo y el creciente interés por la conservación de la naturaleza es la ordenación del espacio marino (OEM), que es una herramienta de gestión para la asignación de la distribución espacial y temporal de las actividades humanas en los espacios marítimos con el fin de alcanzar objetivos ecológicos, económicos y sociales que se han especificado mediante un proceso político (Ehler y Douvère, 2013). Esta ordenación determina cómo, cuándo y dónde se desarrollan las actividades, para cumplir con los objetivos propuestos para una zona determinada, respetando los usos del espacio marino e integrando las exigencias del desarrollo con la necesidad de conservar el medio ambiente. La ordenación del espacio marino puede aplicarse en una zona mediante una secuencia de diez pasos, que se describen en la Figura 54.

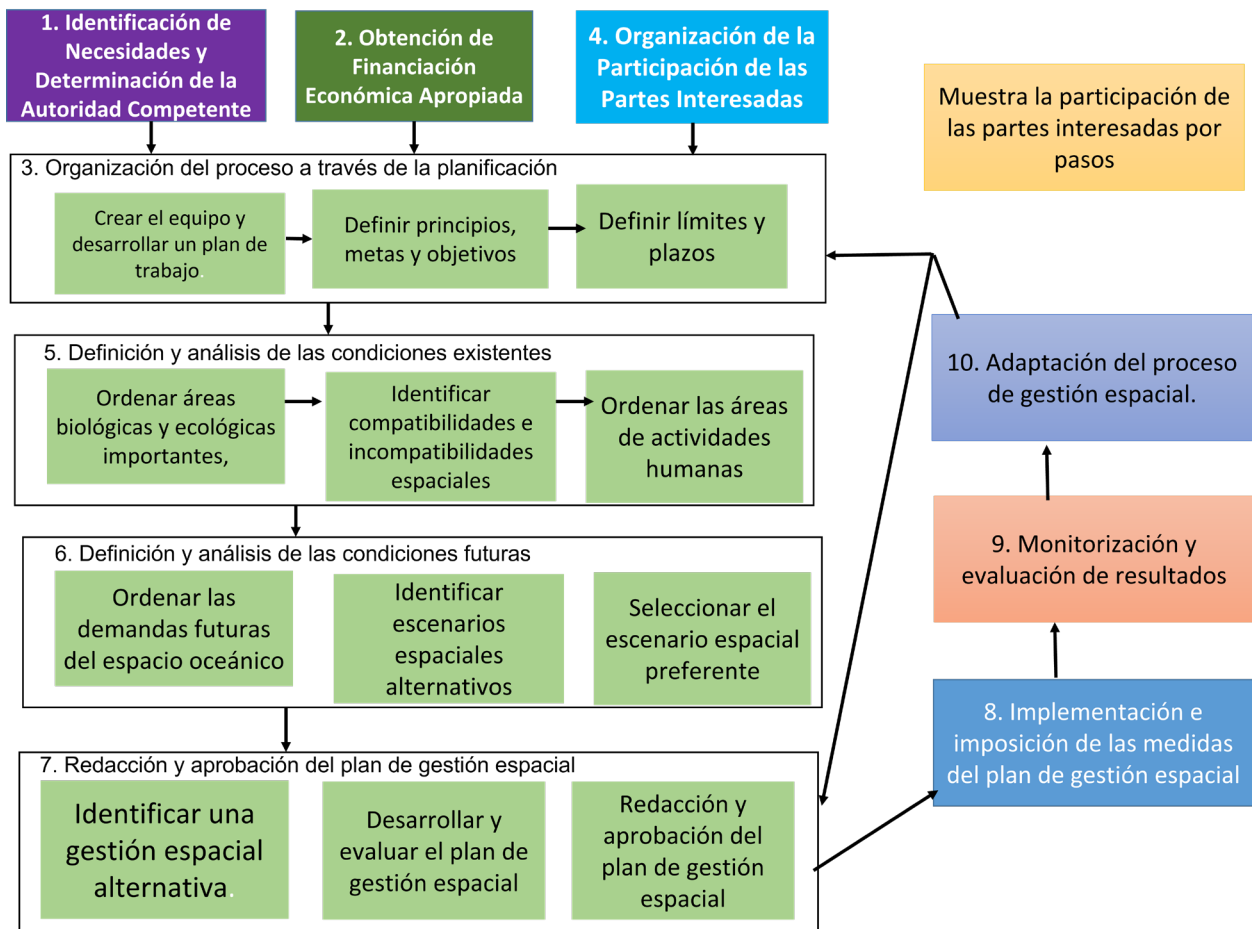


Figura 53 *Guía paso a paso del proceso de planificación espacial marina (de Ehler y Douvere, 2013).*

Gestión integrada de las zonas costeras (GIZC)

La Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC) es un concepto con más de 30 años desde su postulación, pero sólo hasta la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro (Brasil) en 1992, fue acogido en todo el mundo como el concepto central para la gestión de costas y océanos (Steer et al., 1997). En muchos aspectos es similar a la OEM, por ejemplo, ambas son integrales, estratégicas y participativas, y ambas buscan maximizar la compatibilidad entre las actividades humanas y reducir los conflictos entre los usos humanos y la naturaleza (Ehler y Douvere, 2013).

La GIZC pretende orientar el desarrollo de las zonas costeras de forma ecológicamente sostenible. Los programas de GIZC deben guiarse por los Principios de Río, haciendo hincapié en la igualdad entre generaciones, la precaución y el principio de “quien contamina paga”, y la GIZC debe tener un carácter interdisciplinario y holístico, especialmente en lo que respecta a la ciencia y la política. El objetivo básico de la

GIZC es la integración sectorial e intergubernamental, y para ello son fundamentales los mecanismos institucionales de coordinación efectiva entre los múltiples niveles de gobierno que operan en la zona costera. Deben moldearse para que encajen perfectamente en el contexto específico y único de cada gobierno nacional (Steer et al., 1997).

Educación Ambiental

Por último, la educación ambiental constituye, junto con la investigación científica, una herramienta primordial para lograr la concienciación ambiental, necesaria para la gestión sostenible de los asuntos y espacios costeros y marinos (González-Ruiz et al., 2003).

Del mismo modo, surge como una necesidad del ser humano para hacer frente a la crisis ambiental. Se requiere que la sociedad comprenda la naturaleza compleja del medio ambiente, como resultado de la interacción de aspectos sociales, biológicos, físicos y culturales, por lo que la educación representa la base fundamental del desarrollo a largo plazo (Bautista-Zúñiga, 2013), participando activamente las comunidades en el cuidado y preservación de sus espacios costeros y marinos.

6.3.6. Soluciones híbridas

Costas Vivas

Las costas vivas hacen referencia a una serie de técnicas de “blindaje blando” utilizadas para estabilizar los litorales y proteger o mejorar las características naturales. Estas técnicas tratan de controlar la erosión y las inundaciones recreando o mejorando las costas naturales mediante vegetación y otros materiales naturales u orgánicos. Las técnicas híbridas combinan vegetación, como plantas palustres y vegetación acuática sumergida, con materiales más duros para añadir estructura y estabilidad, como conchas de ostras, material biológico (productos para el control de la erosión fabricados con materiales naturales biodegradables) o rocas. Los beneficios incluyen el control de la erosión y la protección contra las inundaciones, al tiempo que aumentan la conectividad de las mareas con una interrupción mínima de los procesos costeros normales (Massachusetts Wildlife, 2017).

6.3.7. Análisis coste-beneficio

La elección de los sitios que se deben defender y cómo hacerlo se basa en un análisis de coste-beneficio, especialmente si se tiene en cuenta el problema generalizado de la erosión costera a lo largo de las costas de los países, por lo que es necesario priorizar los sitios a intervenir.

Para evaluar las diferentes alternativas de gestión, hay que tener en cuenta la protección económica, ambiental y recreativa frente a eventos extremos y los impactos sobre los recursos (Figura 55). En cuanto a los impactos económicos, se evalúan los costes directos e indirectos. Los costes directos son los costes de construcción estimados para aplicar una estrategia, ya sea pública, privada o mixta, mientras que los costes indirectos son las repercusiones económicas de cada estrategia: pérdida o ganancia de tierras o propiedades, actividad económica, etc. Además, la consideración de las repercusiones sobre el medio ambiente, las actividades recreativas, la protección contra las tormentas y los recursos necesarios para su aplicación ofrecen una comparación más completa entre las estrategias (Porro et al., 2020).

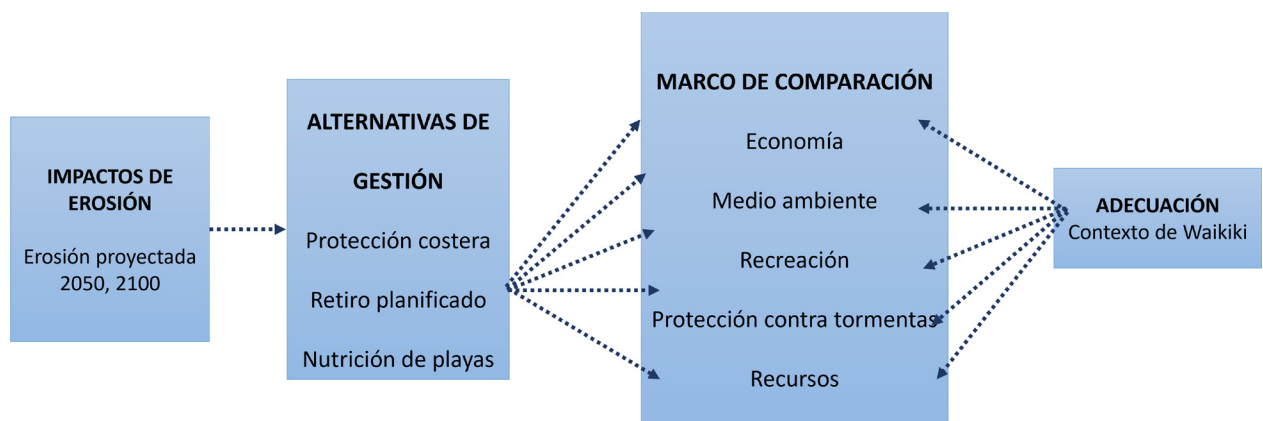


Figura 54 Marco para evaluar los impactos de las alternativas de gestión de la erosión (Tomado de Porro et al., 2020).

Capítulo 7

LECCIONES APRENDIDAS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO “SANDY SHORELINES/COSTAS ARENOSAS”

En este capítulo de la guía se hace una revisión de la ejecución de las acciones de cada componente del proyecto con el fin de extraer lecciones en los aspectos organizativos, conceptuales, metodológicos y logísticos. Estas permiten una mejor elaboración de las tareas de futuros proyectos nacionales y regionales que den continuidad a las investigaciones del efecto del cambio climático en las playas arenosas del Gran Caribe y la adopción de las mejores medidas para su enfrentamiento.

7.1. Componente 1. Establecimiento de puntos focales para los países participantes

Las actividades concebidas en el Componente 1 tuvieron un carácter organizativo-metodológico. En cada país participante se definió la institución que asumiría la responsabilidad de coordinar las actividades a nivel nacional y sostener el intercambio de trabajo requerido con la AEC, y se estableció la red de Puntos Focales del proyecto.

En la tercera reunión presencial de Puntos Focales celebrada en Panamá en agosto de 2018, se analizó y aprobó el “Perfil de Proyecto para la Elaboración del Plan Nacional del Proceso de Erosión Costera”, que refleja el procedimiento organizativo para la realización de las tareas a nivel nacional.

El avance posterior de los trabajos del proyecto demostró que el Plan Nacional estaba metodológicamente bien concebido y se convirtió en el documento de referencia para evaluar el avance de las tareas que debían realizar los Puntos Focales en cada país. En este sentido, cabe señalar las siguientes lecciones aprendidas:

COMPONENTE 1

- El Plan Nacional debería definir mejor el compromiso y la responsabilidad de las instituciones que colaboran con el Punto Focal en la ejecución del proyecto y, en particular, en las áreas de formación y trabajo de campo de la red de monitoreo.

- El calendario anual debería definir con mayor precisión las tareas del proyecto y la institución responsable de su ejecución.
- La comprobación trimestral del cumplimiento del Plan Nacional debería ser la principal herramienta de control del avance del proyecto por parte de la dirección de este..

7.2. Componente 2. Creación de capacidad institucional y recursos humanos

El programa de formación del proyecto incluyó la participación de especialistas de los Puntos Focales en 3 eventos de renombre internacional sobre temas costeros, así como una visita de trabajo al Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST). La participación en estos eventos sirvió para poner al día los temas más avanzados de investigación sobre los procesos de erosión costera y el impacto de la subida del nivel del mar, así como las alternativas de ingeniería que se aplican actualmente para afrontarlos.

En 2018 se desarrolló en Panamá una actividad de capacitación con la participación de unos 30 especialistas de la región, que incluyó la impartición del curso de posgrado “Procesos Costeros y Criterios Metodológicos para la Recuperación de Playas”, un seminario de sedimentología a cargo de especialistas cubanos, y tres conferencias impartidas por expertos de Colombia, Barbados y Corea. Tanto el curso de postgrado como el seminario de sedimentología fueron impartidos en los tres países donde se desarrollaron los proyectos de rehabilitación de playas.

Si bien todas las actividades desarrolladas en el marco del Componente 2 del Proyecto fueron evaluadas con éxito, cabe destacar las siguientes lecciones aprendidas:

COMPONENTE 2

- Las actividades de formación son más eficaces cuando se desarrollan en cada país porque se consigue un mayor número de participantes y se realizan tareas prácticas con estudios de casos de interés nacional.
- La formación debe responder a las necesidades de cada país e incluir formación en el uso de los equipos adquiridos para el trabajo de campo y de laboratorio.

- La formación debe incluir la capacitación en la interpretación de los resultados del trabajo de seguimiento.
- Las actividades de formación deben formar parte del Plan Nacional de cada país e integrar a las universidades.
- Ampliar y sistematizar el intercambio y las consultas técnicas entre los especialistas de los Puntos Focales, el coordinador técnico y los especialistas del Grupo Asesor Técnico (GAT).

7.3. Componente 3. Establecimiento de la red regional de monitoreo de la erosión

Uno de los objetivos propuestos por el proyecto “Sandy Shorelines” fue la evaluación actualizada de la intensidad, alcance y causas de la erosión en las playas del Caribe; para lo cual se consideró necesario establecer una red regional de monitoreo que asegurara mediciones a largo plazo y permitiera evaluar el efecto del aumento del nivel del mar.

Con el fin de estandarizar los criterios para el establecimiento de la red de monitoreo, se elaboraron los documentos metodológicos que fueron analizados con los Puntos Focales: “Procedimiento a seguir para la selección de las playas de la red de monitoreo”, “Ficha de trabajo para conformar el inventario de las playas” y “Guía para la elaboración de la ficha de inventario de playas” que servirían de referencia para la realización del trabajo de campo y la elaboración de los informes de avance en los trabajos de la red.

Desde el inicio del proyecto “Sandy Shorelines”, siempre se comprendió que el establecimiento de la red regional sería una tarea compleja, dadas las dificultades técnicas, organizativas y logísticas que habría que superar. Lo que no era previsible era que en el periodo de ejecución del proyecto apareciera una pandemia mundial que dificultara aún más la realización de las tareas, especialmente la adquisición de los equipos solicitados por cada Punto Focal.

A pesar de estos inconvenientes en las reuniones virtuales con los Puntos Focales, siempre se incluyó en la agenda la verificación de los avances en el establecimiento de la red y con los informes preparados por cada país, se elaboró un informe global en enero de 2023, en el que se señalaron las principales debilidades de los informes nacionales y se recogieron las dificultades encontradas por cada Punto Focal en la realización del

trabajo, en base a los cuales se pueden identificar las siguientes lecciones aprendidas:

COMPONENTE 3

- Se señala como necesidad de los Puntos Focales, el incremento del personal técnico y la ampliación de sus alianzas de trabajo con otras instituciones como la universidad y centros especializados.
- La adquisición de los nuevos equipos debe encomendarse a una empresa especializada en servicios de importación para agilizar las negociaciones con los proveedores y el proceso de transporte.
- Se señala como una necesidad de los Puntos Focales, el incremento del apoyo logístico y financiero para el desarrollo del trabajo de campo de la red.
- Planificar y sistematizar la supervisión del desarrollo de los trabajos de la red de monitoreo y la interpretación de sus resultados por parte del coordinador técnico y los especialistas del GAT.

7.4. Componente 4. Elaboración de 3 proyectos de rehabilitación de playas como “estudios de caso”

En la conceptualización del proyecto “Sandy Shorelines” se consideró oportuno incluir la elaboración de tres proyectos de rehabilitación de playas en lugares con características diferentes que ejemplificaran de alguna manera la diversidad de las playas de la región y el carácter generalizado del problema.

Para la selección de los lugares donde desarrollar los “Estudios de Caso”, la dirección del proyecto, en consulta con los especialistas del GAT, elaboró un procedimiento que fue posteriormente aprobado por los Puntos Focales y que consistió en los siguientes pasos:

1. La dirección del proyecto y el GAT elaboran los criterios y compromisos que deben seguir los Puntos Focales para realizar la propuesta del sitio a seleccionar.
2. Se establecen los criterios que debe seguir el GAT para evaluar las propuestas de los Puntos Focales.

3. Visita de los especialistas del GAT a los sitios seleccionados verificar la información evaluada.

Los tres pasos señalados se cumplieron satisfactoriamente y se seleccionaron las playas de Viento Frío en Panamá, Runaway Bay en Antigua y Barbuda, y Bonasse Bay en Trinidad y Tobago.

Los tres proyectos ejecutivos de restauración de playas estuvieron a cargo de la empresa de servicios ambientales, Gamma S. A. perteneciente al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, (CITMA) y fueron concebidos bajo cuatro principios básicos:

1. El estudio de los procesos y funcionamiento del sistema costero para la correcta identificación de las causas de la erosión.
2. La evaluación de medidas normativas y de gestión para eliminar o minimizar en lo posible, las causas antrópicas de la erosión.
3. La reducción a las imprescindibles soluciones de ingeniería dura.
4. La evaluación de la viabilidad de la reconstrucción de las condiciones naturales de la playa con alimentación artificial de arena y adaptación basada en el ecosistema..

La aplicación de esta práctica ha sido altamente satisfactoria en las playas cubanas, tanto para el mantenimiento de las condiciones naturales y estéticas de la playa, como



Figura 55 Left. Dune designed to protect the hotel from extreme erosive events and sea level rise. IberoStar Hotel. Varadero Beach, Cuba. July 2015. Right. A few days after Hurricane Irma in September 2017. (Juanes J. L.2017)

para lograr la protección de los nuevos hoteles mediante las dunas reconstruidas y reforestadas. Un ejemplo de estos resultados se puede observar en la Figura 56, que representa una duna diseñada con el objetivo de salvaguardar el Hotel IberoStar de eventos erosivos extremos y el aumento del nivel del mar en la playa de Varadero, Cuba, en julio de 2015 a la izquierda, y a la derecha, la misma escena solo unos días después del paso del huracán Irma en septiembre de 2017, resaltando el papel protector de la duna en la preservación de las instalaciones hoteleras y el mantenimiento de las condiciones recreativas y estéticas de la playa.

Capítulo 8

RECOMENDACIONES PARA LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES

Como se dijo al principio, la razón de esta “Guía para la Protección y Rehabilitación de las Playas del Gran Caribe”, fue proporcionar una guía simplificada para entender un problema común en todo el mundo, pero concentrándose en la región del Caribe, ya que el problema de la erosión de las playas afecta física, social y económicamente a muchas de las islas de la región. La información pretende ser útil para los especialistas, los responsables de la toma de decisiones y el público en general. Somos conscientes de que hay muchos manuscritos especializados y exhaustivos bien escritos que consideran el problema de la erosión de las playas, y el propósito de este documento es ser una guía más bien sencilla.

En el **Capítulo 1**, la introducción describe cómo una reunión sobre “Desafíos, Diálogos y Cooperación para la Sostenibilidad del Mar Caribe”, fue la semilla que promovió la búsqueda de financiación para abordar estos conceptos en la región del Caribe. KOIKA fue la Agencia Internacional Coreana que financió el proyecto, que incluía 8 objetivos. Entre ellos estaba la intención de escribir un “manual de rehabilitación de playas con criterios científicos y de ingeniería que responda a las características especiales de las playas tropicales de la región del Caribe”, que luego se convirtió en el Componente 5 “Preparación del Manual de Rehabilitación de Playas para el Caribe”. Se incluyeron en el proyecto nueve países del Caribe (Antigua y Barbuda, Costa Rica, Cuba, Guatemala, Haití, Jamaica, Panamá, República Dominicana y Trinidad y Tobago), y algunas de sus experiencias se comparten en la presente guía.

Recomendación para los responsables de las políticas y de la toma de decisiones: Cuando surja un problema, consultar a los expertos y evaluar si el problema tiene carácter local o regional. Al trabajar en equipo con otros países, se pueden encontrar más opiniones de expertos y soluciones, y es posible y más fácil encontrar financiación para resolver estos problemas. Además, las experiencias que no llevan a ninguna solución son tan valiosas como las que funcionan.

El **Capítulo 2**, “Definición de Playa”, establece la definición y los conceptos utilizados en el estudio de las playas de arena, evita malentendidos y conceptos erróneos y establece

la norma en la terminología aplicada a la región del Caribe. Es importante disponer de una descripción común del tipo y tamaño de los materiales que se encuentran en las playas arenosas, así como la identificación clara del proceso dinámico de erosión y acreción que modifican estas zonas. Se dan varios ejemplos que muestran algunas de las playas del Caribe. Se discuten los aspectos jurídicos y las leyes relacionadas con las costas, destacando la importancia de contar con una legislación local, estatal o nacional en esta materia. No todos los países de la región del Caribe tienen leyes que supervisen la regulación de las costas.

Recomendación para los responsables de las políticas y de la toma de decisiones:

Identificar la terminología y los conceptos relacionados con las playas de arena que se utilizan en su zona o en todo el país para intentar unificarlos y relacionarlos con los conceptos y la terminología regionales. Identificar si existe una normativa o ley, relacionada con las costas, y si se aplica y se hace cumplir. Si no existe una ley o reglamento en esta materia, consultar las que se aplican en varios países del Caribe, para promover una. Es importante saber si los procesos que ocurren a lo largo de las costas son naturales o antropogénicos, y quién debe responsabilizarse de su remediación.

El **Capítulo 3**, “Erosión en las Playas del Caribe”, trata sobre el conocimiento de los procesos de erosión y acreción en playas arenosas. Se discuten algunas variaciones geográficas de la erosión costera en el Caribe. Cada proceso de playa es diferente, y todos los diferentes factores deben ser considerados cuando se comparan las playas costeras de otras regiones del mundo. Como se ha mencionado, muchas playas de los países del Caribe son sitios turísticos, por lo que el impacto de los fenómenos de erosión o acreción puede tener un cambio económico muy importante, que puede ser temporal o permanente.

Recomendación para los responsables de las políticas y de la toma de decisiones:

Es importante comprender los procesos de erosión y acreción que se producen en una playa. Se puede tener una idea de los cambios que se han producido en un periodo de tiempo al hablar con la población o las autoridades locales sobre cómo era la playa hace años o pidiendo fotografías antiguas. Debido a que en la región del Caribe tenemos el impacto de fenómenos severos como tormentas o huracanes y, estamos sometidos a cambios graduales debido al cambio climático, las acciones de remediación requieren diferentes estrategias. Se debe establecer el valor económico de la región, y lo que sucedería si la erosión o acreción impactara la playa, gradual o súbitamente, leve o severamente. ¿Cuántas personas, casas, hoteles, comercios, carreteras e instalaciones

se verían afectados, durante cuánto tiempo y en qué medida?

En el **Capítulo 4**, “Monitoreo de la Erosión Costera”, es esencial conocer los componentes de la playa y su perfil, para determinar las condiciones y cómo se comportaría en caso de eventos hidrometeorológicos importantes o extremos. Las playas, por debajo de la línea de flotación, deben ser monitoreadas en condiciones de calma, y la parte por encima de la línea de flotación, por ejemplo, el límite arena-vegetación, antes y después del paso de un evento importante. Deben considerarse y analizarse los procesos naturales y antropogénicos para seleccionar el sistema de seguimiento de la erosión adecuado y fiable. La selección de una playa para el seguimiento de la erosión se basa en varios criterios: geográficos, morfológicos, hidrodinámicos, y los factores sociales para identificar los sitios sensibles y vulnerables. Se presentan los tipos de mediciones de campo y los métodos de muestreo para obtener una medición cuantitativa del proceso de erosión de la playa. Los instrumentos utilizados para el monitoreo de las playas son la topografía basada en la fotografía, el GPS portátil, la construcción de estructuras, los catalejos de obra, el taquímetro, el teodolito y el GPS diferencial o el sistema GNSS. Algunos se hacen de forma manual y su frecuencia de medición depende de la disponibilidad de personal y recursos. Otros sistemas son automáticos y pueden enviar información a un centro de vigilancia de forma periódica.

También pueden utilizarse otras técnicas, como el uso de imágenes aéreas, por satélite o de drones. Las mediciones batimétricas también son muy valiosas, pero bastante costosas, aunque ahora existen drones náuticos diseñados para realizar este tipo de análisis. El seguimiento de la sedimentología, el tamaño y el material de los granos que componen la playa, son importantes para comprender los posibles cambios. Este trabajo debe hacerse manualmente y con la mayor frecuencia posible. Los fenómenos hidrometeorológicos que se producen en el lugar de monitoreo se hacen ahora con estaciones que miden con frecuencia y transmiten su información a un centro remoto, donde pueden analizarse y estudiarse. Los cambios del nivel del agua y las mediciones de las corrientes son un parámetro muy importante y, dependiendo de la morfología del lugar, pueden ser diferentes.

El capítulo muestra una tabla con los métodos y el coste aproximado del seguimiento. El coste de la instrumentación que figura en la tabla es de unos 160.000 dólares.

Recomendación para los responsables de las políticas y de la toma de decisiones: para seleccionar las playas arenosas a monitorear, es importante dar prioridad a aquellas en las que la mayoría de los parámetros mencionados puedan medirse con regularidad y

disponer de un centro de recogida y análisis de todas las señales recogidas. También debe basarse en la importancia del impacto social y económico que la erosión de la playa puede presentar a corto y largo plazo, para establecer procedimientos de mitigación. Es importante evaluar el posible coste económico de la pérdida de una playa de arena turística, en comparación con el coste de monitoreo mencionado, y las posibles acciones de recuperación. Se debe considerar la creación de una red nacional de monitoreo, que incluya la instrumentación y la interpretación de los datos, así como la capacitación del personal.

Capítulo 5, “Una Visión General de los Modelos Numéricos y su Papel en la Comprensión y Mitigación de la Erosión Costera”

Los modelos numéricos nos permiten comprender el comportamiento dinámico de los sistemas costeros, sus procesos de erosión y diseñar planes o proyectos de protección de playas. Para utilizar estas herramientas computacionales, necesitamos disponer de datos que suministrar al programa, y cuanta más información proporcionemos, mejores resultados obtendremos. El capítulo no pretende enseñar el uso de un modelo numérico en particular, sino describir algunos de los modelos y sus atributos y requisitos, tales como: a) determinación del dominio del modelo, b) recogida de datos de entrada, c) procesamiento preliminar de datos, e) configuración del modelo, f) ejecución del modelo, y g) procesamiento posterior y análisis de resultados. Son varios los análisis que pueden realizarse con los modelos numéricos: Modelación de Olas, que describen la física de las olas y utilizan datos como la velocidad del viento, la presión atmosférica, las corrientes oceánicas y la batimetría para predecir la altura, la dirección y el periodo de las olas. Otros modelos numéricos, describen el movimiento y la circulación de las corrientes de agua, permitiendo determinar las fluctuaciones del nivel del agua y el movimiento de los sedimentos. Otra modelación numérica corresponde al transporte de sedimentos y erosión costera. Estos modelos nos permiten comprender el proceso que da forma a la costa y su erosión, y nos permiten evaluar el éxito de una restauración costera.

El capítulo describe varios modelos numéricos, para dar un ejemplo de sus características y requisitos. Esta información permite a los responsables de la toma de decisiones prever qué tipo de análisis pueden obtenerse, así como sus limitaciones.

Recomendaciones para los responsables de las políticas y de la toma de decisiones: En primer lugar, es necesario identificar y comprender qué tipo de datos queremos analizar, como el comportamiento de las olas, la circulación de las corrientes o el

transporte de sedimentos y la erosión costera, y cuál será su uso y beneficios para los proyectos. Después, es importante identificar qué información requiere el proyecto para su modelación, y si esa información está disponible con o sin coste, cuál es el formato disponible y cuál es el formato requerido para la simulación numérica, si hay datos suficientes, y finalmente los requisitos informáticos. Una vez ejecutado el modelo numérico y obtenidos los resultados, hay que interpretarlos y evaluar su exactitud y precisión. No existe un modelo numérico perfecto, mejor o único, depende del problema, de la información disponible, ya que todos los modelos tienen ventajas e inconvenientes, y en muchos casos la selección correcta puede requerir el uso de varios modelos numéricos.

En el **Capítulo 6**, “Las medidas para la protección y rehabilitación de las playas del Gran Caribe” señala que, al formular medidas para la protección y rehabilitación de las playas del Gran Caribe, es crucial dar debida consideración a los aspectos legales relacionados con la definición de la línea costera y la mitigación de la erosión. Esto asegura que las acciones propuestas no solo cuenten con respaldo, sino que también estén garantizadas por el gobierno. Es importante señalar que varios países del Caribe carecen de regulaciones específicas al respecto; sin embargo, Barbados sirve como un ejemplo positivo con su bien establecida Unidad de Gestión de la Zona Costera.

Es necesario identificar los procesos erosivos que se producen en la playa para proponer un método de remediación y así decidir sobre: soluciones duras (soluciones grises), soluciones blandas, soluciones convencionales híbridas o mezcla de soluciones. El tipo de soluciones duras o grises (espolones, diques de contención, rompeolas sumergidos, espigones artificiales) son remedios que requieren infraestructuras, pueden ser costosas y en algunos casos producen erosión y acreción en partes concretas, y tienen un impacto visual.

Las soluciones blandas o basadas en la naturaleza son cada vez más atractivas, como la alimentación artificial de arena, los sacos de arena y los geotubos, aunque requieren un área de préstamo, la idoneidad del material y el volumen necesario. Los métodos de restauración de ecosistemas son una solución muy atractiva, ya que tienen un menor impacto negativo en la naturaleza y normalmente un coste menor. Algunos de estos métodos son la restauración de dunas costeras y su vegetación, y la restauración de arrecifes de coral y praderas marinas.

Las soluciones híbridas de restauración combinan la mejora de las costas naturales mediante vegetación y otros componentes naturales, con materiales más duros para

añadir estructura y estabilidad. El análisis de costes y beneficios debe tener en cuenta los aspectos económicos, medioambientales, recreativos y de protección frente a fenómenos fluviales, para que la solución sea adecuada y plausible.

Recomendación para los responsables de las políticas y de la toma de decisiones:

Hay varios aspectos que deben considerarse y los estudios y análisis coste/beneficio requeridos, así como el tiempo para implementar la remediación y su duración estimada. No existe un remedio perfecto y permanente, ya que muchas veces la combinación de varias técnicas es la mejor solución. Es importante tomarse el tiempo y el mejor asesoramiento para decidir.

El **Capítulo 7**, “Lecciones Aprendidas en el Desarrollo del Proyecto ‘Sandy Shorelines’”, analiza el proyecto de investigación del efecto del cambio climático en las playas arenosas del Gran Caribe, y establece un ejemplo de las acciones que se llevan a cabo para pasar del análisis de un problema a un sistema de estudio y monitoreo de las playas arenosas de la región. Los seis componentes del proyecto permiten establecer un protocolo para alcanzar objetivos similares.

El Componente 1, Establecimiento de puntos focales para los países participantes, es necesario para identificar la mejor asociación en cada país, ya que, en algunos lugares, los centros de investigación, o el gobierno, o ambos, tienen interés en el problema.

El Componente 2, Capacitación institucional y recursos humanos, establece que es importante la capacitación de los participantes en cada país según las necesidades de este, para maximizar la participación, así como la visita in situ a las playas seleccionadas para el proyecto.

En el Componente 3, relacionado con el establecimiento de la red regional de monitoreo de la erosión, hay que considerar y tener en cuenta muchos aspectos a la hora de seleccionar los lugares y la red de monitoreo de la erosión: el lugar, los aspectos jurídicos, el impacto socioeconómico, la formación de las personas encargadas de los equipos y del tratamiento de los datos, la duración prevista del proyecto y el coste de funcionamiento. Se esperaban dificultades en la ejecución, pero nunca algo como la pandemia.

En el Componente 4, Elaboración de 3 proyectos de rehabilitación de playas como “estudios de caso”, se seleccionaron Viento Frío en Panamá, Runaway Bay en Antigua y Barbuda, y Bonasse Bay en Trinidad y Tobago, por cumplir con los requisitos

establecidos por la Empresa Gamma de Cuba, con amplia experiencia en el tema.

Recomendación para los responsables de las políticas y de la toma de decisiones: Crear y mantener capacidades, invertir en la capacitación de personas para el mantenimiento de los equipos y para el procesamiento e interpretación de los datos. Seleccionar el mejor equipo posible puede costar más, pero con el paso del tiempo es la mejor decisión. Prever las necesidades financieras, no sólo para los equipos, sino para el funcionamiento de la red de monitoreo.

APÉNDICE

Erosión de las Playas del Caribe

Apéndice A: Fuentes de datos oceanográficos para la realización de estudios metoceanicos (Autor principal: Miguel Canals).

- Modelos regionales (ECWMF, GFS WAVE, otros).
- Boyas operativas
- Necesidad de ampliar las redes de boyas y de observación

Apéndice B: Modelos numéricos oceanográficos utilizados para comprender los procesos erosivos y diseñar proyectos de protección de playas (Autor principal: Miguel Canals)

- Modelos numéricos de oleaje
- Modelos de circulación costera
- Modelos acoplados de oleaje/corriente/transporte de sedimentos
- Modelos de erosión de playas y degradación dunar

7.5. Apéndice A: Fuentes de datos oceanográficos para realizar estudios metoceanicos

Los datos históricos de los modelos de oleaje desempeñan un papel crucial en la comprensión de los efectos de la climatología del oleaje sobre la dinámica de las playas, el transporte de sedimentos y la erosión costera. Estos datos proporcionan información sobre las pautas y tendencias de la actividad de las olas a lo largo del tiempo, lo que permite a los investigadores identificar los ciclos anuales de las olas, así como la variabilidad plurianual que da forma a las playas. Esta información es importante para los gestores costeros, los ingenieros y los responsables de la toma de decisiones, ya que puede contribuir al desarrollo de estrategias para mitigar los riesgos costeros y reducir el impacto de los fenómenos meteorológicos extremos en las comunidades costeras.

Los ciclos anuales de las olas pueden influir considerablemente en la morfología de las

playas, sobre todo en regiones como el Mar Caribe, propensa a tormentas tropicales y huracanes, así como a marejadas invernales de larga duración. Estos fenómenos generan olas de gran energía que pueden provocar un importante transporte de sedimentos y erosión. Comprender los patrones de actividad de las olas durante las diferentes estaciones puede ayudar a los investigadores a identificar los periodos en los que es más probable que se produzca la erosión costera y a desarrollar medidas de mitigación adecuadas.

La variabilidad plurianual, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO), también puede desempeñar un papel importante en la configuración de la morfología costera. Estos fenómenos climáticos pueden dar lugar a cambios en la actividad de las olas que pueden causar cambios importantes en el transporte de sedimentos y en los patrones de erosión. Mediante el análisis de los datos históricos de los modelos de oleaje, los investigadores pueden identificar el impacto de estos fenómenos en la morfología costera y desarrollar estrategias para mitigar sus efectos.

Para ayudar a los investigadores y gestores costeros a comprender mejor los patrones y tendencias de la actividad del oleaje en el Mar Caribe, existen varios modelos de oleaje que proporcionan datos históricos de modelos de oleaje. Estos modelos permiten a los usuarios acceder a información sobre la actividad de las olas a lo largo del tiempo y proporcionan una visión de cómo la climatología de las olas moldea la morfología costera. La disponibilidad de estos datos y los conocimientos que proporcionan son esenciales para desarrollar estrategias eficaces de gestión costera que reduzcan el impacto de la erosión costera y mitiguen los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos.

A continuación, se presentan algunos de los modelos de olas más utilizados que pueden proporcionar datos históricos de modelos de olas en el Mar Caribe, junto con enlaces a los sitios web donde los usuarios pueden descargar los datos:

WaveWatch III: Los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) proporcionan datos históricos de WaveWatch III para la región del Mar Caribe en su sitio Web. Se puede acceder a los datos en: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/download.shtml>

Los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) han introducido un modelo avanzado de previsión de olas conocido como modelo GFS WAVE. Este modelo numérico de última generación incorpora los últimos conocimientos sobre los procesos

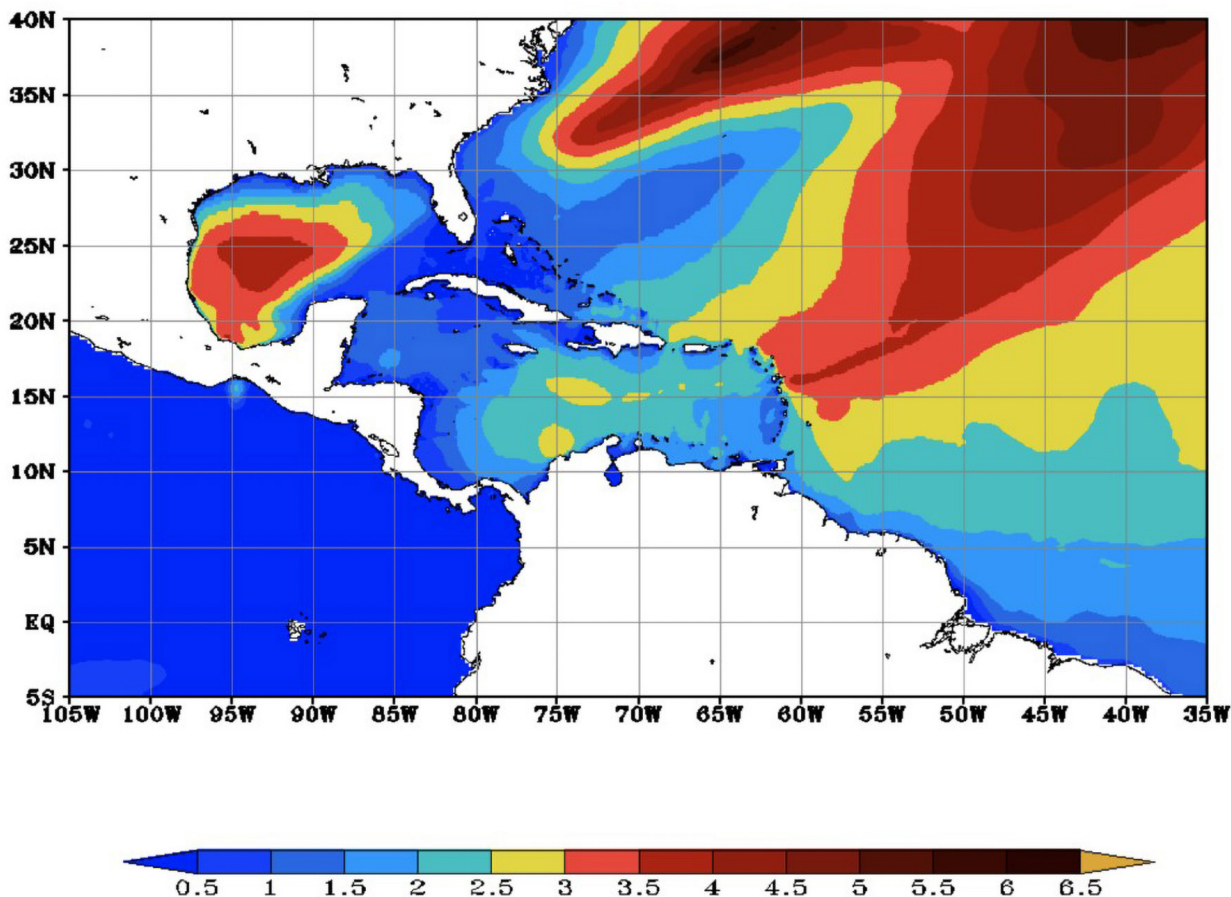
oceanográficos y meteorológicos, lo que conduce a predicciones de olas más precisas y a una mejor comprensión de la dinámica de las olas en diversos entornos marinos. El modelo GFS WAVE combina datos de viento de alta resolución del Sistema Mundial de Pronósticos (GFS) con sofisticadas técnicas de modelación de olas, lo que le permite predecir alturas, periodos y direcciones de las olas con mayor precisión.

ECMWF-WAM: El Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF) proporciona datos históricos del modelo de olas ECMWF-WAM para la región del Mar Caribe en su sitio web. Se puede acceder a los datos a través de su almacén de datos climáticos en: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-ii>

El modelo de olas WaveWatch 3 del Caribe (Figura A.1 a continuación) que se encuentra en <http://ww3.cimh.edu.bb> es una implementación regional del modelo de olas global WaveWatch 3 diseñado específicamente para el Mar Caribe. Simula alturas de ola, direcciones de ola y periodos de ola utilizando datos de entrada sobre corrientes oceánicas, velocidad del viento y presión atmosférica. El modelo proporciona previsiones de olas de alta resolución con hasta tres días de antelación, lo que lo convierte en una valiosa herramienta para la seguridad marítima, la gestión costera y la planificación de actividades como el transporte marítimo, el turismo y las operaciones en alta mar.

También hay varias boyas oceanográficas en el Océano Atlántico y en el Mar Caribe que pueden ser útiles para comprender la actividad de las olas, especialmente cuando se combinan con los resultados de los modelos. El Centro Nacional de Boyas de Datos (NDBC; <https://www.ndbc.noaa.gov>) mantiene una red de boyas en el Océano Atlántico y en el Mar Caribe, que proporciona datos inestimables para comprender las características del oleaje en las playas caribeñas. Estas boyas están estratégicamente situadas para recoger y transmitir continuamente datos oceanográficos y meteorológicos vitales, como la altura de las olas, su periodo y su dirección, que son cruciales para los investigadores, los gestores costeros y los responsables de las políticas a la hora de evaluar la dinámica de las playas y los procesos costeros. La información en tiempo real recogida por las boyas del NDBC contribuye a mejorar la previsión de los riesgos costeros, como las mareas tormentosas y la erosión, lo que permite tomar decisiones más informadas sobre las estrategias de protección y mitigación del litoral. Además, los datos recogidos por estas boyas pueden utilizarse para calibrar y validar modelos numéricos, ayudando a mejorar la precisión de las predicciones relativas a los impactos del cambio climático y las tendencias a largo plazo en los entornos costeros de la región.

Wave Heights(m) for the Caribbean Valid 20230318 00Z +30



GrADS: COLA/IGES

2023-03-18-17:18

Figura 56 Caribbean WaveWatch 3 modelo de olas© Copyright - Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology

7.6. Apéndice B: Modelos numéricos oceanográficos utilizados para comprender los procesos de erosión y diseñar proyectos de protección de playas.

Los modelos numéricos oceanográficos son una herramienta esencial para comprender los procesos de erosión y diseñar proyectos de protección de playas. Estos modelos utilizan ecuaciones matemáticas para simular los procesos oceanográficos y proporcionan predicciones de la altura de las olas, las corrientes, el transporte de sedimentos y la erosión costera. Los modelos permiten a los oceanógrafos e ingenieros costeros evaluar el impacto potencial de la erosión costera y desarrollar estrategias

para mitigar sus efectos. En este apéndice se describen los modelos más utilizados por oceanógrafos e ingenieros costeros, como los modelos numéricos de oleaje, los modelos de circulación costera, los modelos acoplados de oleaje/corriente/transporte de sedimentos y los modelos de erosión de playas y degradación dunar.

Modelos numéricos regionales de oleaje

Los modelos numéricos de oleaje simulan la propagación y transformación de las olas mediante ecuaciones matemáticas que describen su física. Los modelos utilizan datos de entrada sobre la velocidad del viento, la presión atmosférica, las corrientes oceánicas y la batimetría para predecir la altura, la dirección y el periodo de las olas. Estos modelos son esenciales para comprender el clima de olas y evaluar su posible impacto en la morfología costera. Dos de los modelos de olas más populares son el WaveWatch III y el modelo SWAN.

- WaveWatch III es un modelo global de olas que proporciona pronósticos de olas con hasta diez días de antelación. El modelo utiliza datos de entrada sobre la velocidad del viento y la presión atmosférica para predecir la altura, el periodo y la dirección de las olas. WaveWatch III lo utilizan diversas organizaciones, como la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), la Marina estadounidense y el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo.
- El modelo SWAN (Simulación de olas cerca de la costa) es un modelo de oleaje espectral que simula la transformación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona cercana a la costa. El modelo se utiliza ampliamente para aplicaciones de ingeniería costera, incluyendo evaluaciones de energía undimotriz, estudios de erosión costera y diseño de puertos.

Modelos de oleaje con resolución de fase

Los modelos de oleaje con resolución de fases, como SWASH (Simulación de olas hasta la orilla) y XBEACH, son modelos numéricos avanzados diseñados para simular procesos de oleaje cercanos a la costa con gran precisión. A diferencia de los modelos de promediado de fases, que sólo tienen en cuenta los valores medios de los parámetros del oleaje, los modelos de resolución de fases tienen en cuenta las fases individuales de cada ola, capturando de forma más realista las complejas interacciones entre las olas y el entorno cercano a la costa.

SWASH es un modelo que simula la transformación de las olas, su rompiente y las corrientes inducidas por las olas en la zona de oleaje, mientras que XBEACH está diseñado específicamente para modelar la erosión costera y el transporte de sedimentos en condiciones de tormentas extremas. Ambos modelos son importantes para comprender la hidrodinámica cercana a la costa que afecta la erosión costera, ya que proporcionan información detallada sobre el comportamiento de las olas y los procesos de transporte de sedimentos que tienen lugar en la zona cercana a la costa.

Modelos de circulación costera

Los modelos de circulación costera simulan el flujo de agua en la zona cercana a la costa, incluidos los efectos de las mareas, las olas, los vientos y las fuerzas de flotación. Estos modelos son esenciales para comprender las corrientes costeras, las fluctuaciones del nivel del agua y el transporte de sedimentos y contaminantes. Dos de los modelos más populares son el modelo ROMS y el modelo ADCIRC.

- El Sistema Regional de Modelación Oceánica (ROMS) es un modelo numérico de última generación que simula la circulación oceánica y la propagación de las olas en la zona costera. El modelo puede utilizarse para predecir cambios en el nivel del agua, corrientes de marea y transporte de sedimentos, entre otras variables. ROMS se utiliza ampliamente para la investigación y gestión costera, incluyendo estudios de inundaciones costeras, transporte de sedimentos y acidificación de los océanos.
- El modelo Circulación Avanzada (ADCIRC) es un modelo de elementos finitos que simula los efectos de las mareas, las olas y las mareas de tempestad en la hidrodinámica costera. El modelo se utiliza ampliamente para la predicción de mareas de tempestad y la evaluación de riesgos, incluidos los huracanes y otros fenómenos meteorológicos extremos.

Cambio del litoral y modelos de transporte de sedimentos

Los modelos acoplados de oleaje/corriente/transporte de sedimentos simulan la interacción entre el oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos en la zona costera. Estos modelos son esenciales para comprender los procesos que conforman la morfología costera y el impacto de la erosión costera. A continuación, se enumeran algunos de los modelos más populares:

- El modelo Delft3D es un modelo numérico en 3D que simula las olas, las corrientes y el transporte de sedimentos en la zona costera. El modelo puede utilizarse para predecir la erosión de las playas, la rotura de dunas y los cambios en la línea de costa, entre otras variables. Delft3D se utiliza ampliamente para la gestión costera, incluido el diseño de medidas de protección del litoral y la evaluación de los riesgos costeros.
- El modelo XBEACH es un modelo numérico que simula los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en la zona cercana a la costa. El modelo puede utilizarse para predecir el impacto de la erosión costera en playas y dunas, incluyendo la degradación dunar y la invasión de aguas marinas. XBEACH se utiliza ampliamente para la investigación y la gestión costera.
- SBEACH (Cambio de playa inducido por tormenta): SBEACH es un modelo empírico ampliamente utilizado para predecir los cambios en el perfil de la playa debidos a la erosión inducida por tormentas. Tiene en cuenta la transformación de las olas, el transporte de sedimentos y la evolución del perfil de la playa.
- CSHORE (A través de la costa): CSHORE es un modelo unidimensional basado en procesos para predecir el transporte de sedimentos a través de la costa y los cambios en el perfil de la playa. Incluye formulaciones para la transformación de las olas, el transporte de sedimentos y los procesos de erosión/deposición.
- GENESIS (Modelo generalizado de simulación de cambios en la línea de costa): GENESIS es un modelo numérico unidimensional para simular el transporte de sedimentos a lo largo de la costa y el cambio de la línea de costa. Combina la transformación de las olas, el transporte de sedimentos y la evolución de la línea de costa en un único marco.

La selección de un modelo numérico apropiado para la erosión costera y de playas depende del entorno costero específico y de los objetivos del estudio. Cada modelo tiene sus ventajas y limitaciones, y es crucial tener en cuenta la complejidad, la disponibilidad de datos y los recursos computacionales a la hora de elegir un modelo adecuado. En algunos casos, puede ser beneficioso combinar varios modelos para captar mejor los diferentes procesos y escalas que intervienen en la erosión costera y el transporte de sedimentos.

Referencias

CAPITULO 1

Cooper, J.A.G., J. McKenna. 2008. Social justice in coastal erosion management: The temporal and spatial dimensions. *Geoforum*, 39(1), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2007.06.007>

Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D.S., Schlacher, T.A., Dugan, J., Jones, A., Lastra, M., Scapini, F., 2009. Threats to sandy beach ecosystems: a review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 81 (1), 1–12.

Fanning, L., R. Mahon. 2017. Implementing the Ocean SDG in the Wider Caribbean: state of play and possible ways forward, IASS, IDDRI, TMG. 53 p.

Mahon, R., L. Fanning, P. McConney and R. Pollnac. 2010. Governance characteristics of large marine ecosystems. *Marine Policy*, 34: 919-927.

Spencer, N., E. Strobl, A. Campbell. 2022. Sea level rise under climate change: Implications for beach tourism in the Caribbean, *Ocean & Coastal Management*, 225, 106207. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106207>.

UNEP. 2003. Diagnóstico de los procesos de erosión en las playas arenosas del Caribe. United Nations Environment Programme. Agencia de Medio Ambiente. Cuba. Colectivo de autores. La Habana. Marzo de 2003.

CAPITULO 2

Brown, A. C. and McLachlan, A., *Ecology of Sandy Shores*, Editorial Elsevier, 5-39, Holand, 1990.

Brunn, P. and Schwartz, M. L., “Analytical predictions of beach profile change in response to a sea level rise”. *Z. Geomorph. N. F.* (57), 33-50, 1985.

Cambers, G. *Coast and Beach Stability in the Eastern Caribbean Islands*. Editorial UNESCO. 1985.

Center for Civil Engineering Research, Codes and Specifications/ Delft Hydraulics Laboratory, (ed), Manual on Artificial Beach Nourishment. Report (130), Holand, 1990.

Coastal Engineering Research Center, (ed). Shore Protection Manual, U.S.A., 1984.

Davidson-Arnott, Robin, An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Cambridge university press. 2010. Dean, R. G., “Los beneficios y reducción de daños obtenidos con playas regeneradas”. 21 Conferencia Internacional de Ingeniería de Costas. Libro de Resúmenes. 235, 566-568, España, 1988.

Dunaev. N., Leontiev I. O., Juanes, J. L., On the Problem of Coastal Protection of the Varadero Resort (Cuba) with an Artificial Beach. Marine Geology, 2020.

Juanes, J. L., La Erosión en las Playas de Cuba. Alternativas para su Control. Tesis de Doctorado. Cuba.

Juanes, J. L.. Procesos Costeros y Criterios Metodológicos para la Recuperación de Playas. Manual de Curso de Postgrado. AEC, 2018, 221 y 2022.

Lippman, T. C., Holman, R. A. 1990. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. Journal of Geophysical Research, 106, 973 989

Pavlidis, Y., Ionin, A. S., Ignatov, E., Lluís, M. y Avello, O., “Condiciones de formación de oolita en las regiones someras de las aguas tropicales”. Serie Oceanológica. (18), 1973.

Schwartz, M. L., Juanes, J. L., Foyo, J., Garcia, G., “Artificial nourishment at Varadero Beach, Cuba”. Proceeding. Coastal Sediments’ 91. 2081-2088. 1991.

Schwartz, M. L., (ed.) “Encyclopedia of coastal science”. 2005.

Shepard, F. P., Submarine Geology, Editorial Harper and Row, 167-205, U.S.A., 1973.

Short, A. D. “Wave power and beach-stages: a global model”. Reprinted from Proceedings of 16 Coastal Engineering Conference. capitulo 66. 1145-1162. 1978.

Short, A. D., “Three dimensional beach-stage model”. Journal of Geology. (87). 553-571. 1979.

Short, A. D. and Aagaard, T., "Single and multi-bar beach change models". Journal of Coastal Research. (15). 141-157. 1993.

Short, A. D., and Masselink, G. 1999. Embayed and structurally controlled beaches. In Short, A.

D. (ed.), Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. Wiley, Chichester, pp. 230-250. Silvester, 1974. Coastal Engineering. Elsevier, Amsterdam, 2 volumes

Sonu, C. J., "Three-dimensional beach changes". Journal of Geology. 81, 42-64, 1973.

Sunamura, T. 1988. Beach morphologies and their change. In Horikawa, K. (ed.), Nearshore Dynamics and Coastal Processes. University of Tokyo Press, Tokyo, pp. 136-166.

UNEP/GPA 2003. "Diagnosis of the Erosion Processes in the Caribbean Sandy Beaches"; report prepared by Environmental Agency, Ministry of Science, Technology and Environment, Government of Cuba, March.

Wright, L. D. and Short, A. D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. Marine Geology, 56, 93-118.

Zafianov, G., Las Costas del Océano Mundial en el siglo XX, (en ruso), Editorial Mislá, U.R.S.S., 1978.

Zenkovich, V. P., Processes of Coastal Development, Editorial Oliver and Boyd, 1967.

CAPITULO 3

Cambers, G. (1998). Coping with beach erosion: Case studies from the Caribbean. Coastal Management Sourcebooks 1, UNESCO, Paris. (<https://digitallibrary.un.org/record/1491442?ln=en>)

Cambers, G. (2009). Caribbean beach changes and climate change adaptation. Aquatic Ecosystem Health & Management, 12(2), 168-176. (<https://doi.org/10.1080/14634980902907987>)

Luijendijk, A., et al. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, 8(1), 6641. (<https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>)

Mumby, P.J., et al. (2018). Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature*, 427(6974), 533-536. (<https://doi.org/10.1038/nature02286>)

Nicholls, R.J., et al. (2018). Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century *Phil. Trans. R. Soc. A*. **369**161–181 (<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0291>)

Reguero BG, Losada IJ, Díaz-Simal P, Méndez FJ, Beck MW. Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean. *PLoS One*. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133409>)

Reguero, B.G., Beck, M.W., Agostini, V.N., Kramer, P., and Hancock, B., 2018, Coral reefs for coastal protection—A new methodological approach and engineering case study in Grenada: *Journal of Environmental Management*, v. 210, p. 146–161. (<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.024>)

Scott, D. , Simpson, M. Charles, & Sim, R. . (2012). [The vulnerability of Caribbean coastal tourism to scenarios of climate change related sea level rise](#). *Journal of Sustainable Tourism*, 20(6), 883-898. Taylor & Francis (<https://doi.org/10.1080/09669582.2012.699063>)

Storlazzi, C.D., Reguero, B.G., Cumming, K.A., Cole, A.D., Shope, J.B., Gaido L., C., Viehman, T.S., Nickel, B.A., and Beck, M.W., 2021, Rigorously valuing the coastal hazard risks reduction provided by potential coral reef restoration in Florida and Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1054, 35 p., (<https://doi.org/10.3133/ofr20211054>).

CAPITULO 4

Brodie, K. L., B. L. Bruder, R. K. Slocum and N. J. Spore, "Simultaneous Mapping of Coastal Topography and Bathymetry From a Lightweight Multicamera UAS," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 9, pp. 6844-6864, Sept. 2019, doi: 10.1109/TGRS.2019.2909026.

Codiga, D.L., 2011. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab

Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp. <ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf>

Hesp, P., Schmutz, P., Martinez, M. L. M., Driskell, L., Orgera, R., Renken, K., Revelo, N. A. R., & Orocio, O. A. J. (2010). The effect on coastal vegetation of trampling on a parabolic dune. *Aeolian Research*, 2(2–3), 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2010.03.001>

Holman, R., Plant, N., Holland, T. (2013), cBathy: A robust algorithm for estimating nearshore bathymetry, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 2595– 2609, <https://doi.org/10.1002/jgrc.20199> .

Jagalingam, P., B.J. Akshaya, Arkal Vittal Hegde, *Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Satellite Imagery*, *Procedia Engineering*, Volume 116, 2015, Pages 560-566, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.326> .

Kraus, N.C. (2005). Beach Profile. In: Schwartz, M.L. (eds) *Encyclopedia of Coastal Science*. *Encyclopedia of Earth Science Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_37

Perry, C. T., & Hepburn, L. J. (2008). Syn-depositional alteration of coral reef framework through bioerosion, encrustation and cementation: Taphonomic signatures of reef accretion and reef depositional events. *Earth-Science Reviews*, 86(1), 106–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.08.006>

Perry, C. T., Kench, P. S., Smithers, S. G., Riegl, B., Yamano, H., & O’Leary, M. J. (2011). Implications of reef ecosystem change for the stability and maintenance of coral reef islands. *Global Change Biology*, 17(12), 3679–3696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02523.x>

Pilkey, O. H., & Cooper, J. A. G. (2014). *The Last Beach*. Duke Univ. Press.

Rosado-Torres, A. A., Mariño-Tapia, I., & Acevedo-Ramírez, C. (2019). Decreased Roughness and Macroalgae Dominance in a Coral Reef Environment with Strong Influence of Submarine Groundwater Discharges. *Journal of Coastal Research*, 92(sp1), 13. <https://doi.org/10.2112/si92-003.1>

Valentini, N., & Balouin, Y. (2020). Assessment of a smartphone-based camera system

for coastal image segmentation and Sargassum monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/JMSE8010023>

Vousdoukas, M.I., A.F. Velegrakis, T.A. Plomaritis, Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, *Earth-Science Reviews*, Volume 85, Issues 1–2, 2007, Pages 23-46, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.07.002>.

Wright, L.D., A.D Short, Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis, *Marine Geology*, Volume 56, Issues 1–4, 1984, Pages 93-118, ISSN 0025-3227, [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2).

CAPITULO 5

Buttolph, A. M. B., Reed, C. W., Kraus, N. C., Ono, N., Larson, M., Camenen, B., Hanson, H., Wamsley, T. & Zundel, A. K. (2006), Two-dimensional depth-averaged circulation model CMS-M2D: Version 3.0, Report 2: Sediment transport and morphology change, Technical Report ERDC/CHL TR-06-09, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Chen, C., Liu, H., & Beardsley, R. C. (2003). An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(1), 159-186.

Escudero, M., Reguero, B.G., Mendoza, E., Secaira, F., Silva, R. (2021). Coral reef geometry and hydrodynamics in beach erosion control in North Quintana Roo, Mexico. *Frontiers in Marine Science*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.684732>

Izquierdo Álvarez, M., Núñez, C. O., González Escalona, R., & Castro Acosta, B. (2022). Rehabilitation Project for Bonasse Beach, Cedros Bay, Trinidad and Tobago: FINAL REPORT. Inversiones Gamma. Published by Association of Caribbean States.

Johnson, B. D., N, Kobayashi and M. B. Gravens. 2012. Cross-Shore Numerical Model CSHORE for Waves, Currents, Sediment Transport and Beach Profile Evolution. ERDC/CHL TR-12-22. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.

Laigre, T.; Balouin, Y.; Villarroel-Lamb, D.; Lerma, A.N.; Valentini, N.; Moisan, M.; De La Torre, Y. Total Water Level Mitigation Related to Fringing Reef and Upperbeach

Vegetation Status at a Hurricane Exposed Coast. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 620. <https://doi.org/10.3390/jmse11030620>

Morales Díaz, P., Peña Fuentes, L. I., Niévares Pérez, A., Busutil López, L., & Hernández, M. F. (2022). Rehabilitation Project for Runaway Bay Beach Antigua and Barbuda: FINAL REPORT. Inversiones Gamma. Published by Association of Caribbean States.

Reguero, B.G., Beck, M.W., Agostini, V.N., Kramer, P., and Hancock, B., 2018, Coral reefs for coastal protection—A new methodological approach and engineering case study in Grenada: *Journal of Environmental Management*, v. 210, p. 146–161.

CAPITULO 6

Army Coastal Engineering Research Center. 1984. Shore Protection Manual. Vol. 1 and 3. Corps of Engineers. Ed. USACERC. Department of the Navy.

Bautista- Zuñiga, A.E.. 2013. La educación ambiental enfocada al cambio climático en las comunidades costeras de Baja California Sur. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California Sur. 121p.

Bellwood, D.R., 1995. Carbonate transport and within-reef patterns of bioerosion and sediment release by parrotfishes (family Scaridae) on the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, 117: 127-136. <https://doi.org/10.3354/meps117127>.

Cambers, G. 1998. Coping with beach erosion with case studies from the Caribbean. Coastal management sourcebooks 1, UNESCO Publishing, Paris.

CUR. 1987. Manual on Artificial Beach Nourishment. Centre for Civil Research Codes and Specifications, Recommendation, vol. 1. Rijkswaterstaat/Delft Hydraulics, The Netherlands.

D'Alessandro, F., G.R. Tomasicchio, A. Francone, E. Leone, F. Frega, G. Chiaia, A. Saponieri, L. Damiani. 2020. Coastal sand dune restoration with an eco-friendly technique. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23 (4): 417–426. doi: <https://doi.org/10.1080/14634988.2020.1811531>.

Ehler, C., F. Douvère. 2013. Planificación espacial marina: una guía paso a paso hacia

la Gestión Ecosistémica. Comisión Oceanográfica Intergubernamental y el Programa del Hombre y la Biosfera. COI manuales y guías n.º 53. París, UNESCO.

GAMMA Inversiones. 2022a. Proyecto para la rehabilitación de la playa de Runaway Bay Antigua y Barbuda. Asociación de Estados del Caribe – Koica. 252 p

GAMMA Inversiones. 2022b. Proyecto ejecutivo para la rehabilitación de la playa Viento Frío, Colón, República de Panamá. Asociación de Estados del Caribe – Koica. 135 p.

González-Ruiz, M., G. García-Montero, M. Montolio-Fernández. 2003. Educación ambiental para comunidades costeras. La Habana, Acuario Nacional de Cuba. 78 p.

James, R.K., A. Lynch, P.M.J. Herman, M.M. van Katwijk, B.I. van Tussenbroek, H.A. Dijkstra, R.M. van Westen, C.G. van der Boog, R. Klees, J.D. Pietrzak, C. Slobbe, T.J. Bouma. 2021. Tropical biogeomorphic seagrass landscapes for coastal protection: persistence and wave attenuation during major storms events. *Ecosystems*, 24: 301–318. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00519-2>

Juanes, J. L. 1996. La erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control. Doctoral Tesis.

Ley-Vega, J., J.B. Gallego-Fernández, C. Vidal. 2007. Manual de restauración de dunas costeras. Editorial. Ministerio del Medio Ambiente. Dirección General de Costas. España. 258p.

Lithgow, D., M.L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, D. Infante-Mata, Ó. Jiménez-Orocio. 2014. La restauración de dunas costeras. En: Diagnóstico general de las dunas costeras de México (pp. 105-118). CONAFOR, SEMARNAT.

Manrique-Sanguino, J.A. 2012. Estudio experimental de alternativas de protección costera caso Chelem-Chuburná, Yucatán. II Encuentro “el posgrado en la ingeniería civil”, ESIA U. Zacatenco, mayo 21 al 23 del 2012. 11pp.

Porro, R., K. Kim, D. Spirandelli, K. Lowry. 2020. Evaluating erosion management strategies in Waikiki, Hawaii. *Ocean and Coastal Management*, 188, 105113

Prasetya, G. 2007. Capitulo 4: Protection from coastal erosion. Thematic paper: The role of coastal forests and trees in protecting against coastal erosion. En: Coastal protection

in the aftermath of the Indian Ocean tsunami: What role for forests and trees? Braatz, S., Fortuna, S., Broadhead, J., Leslie, R. Eds. Rap publication, 07. FAO, Tailandia.

Reguero, B.G., M.W. Beck, V.N. Agostini, P. Kramer, B. Hancock. 2018. Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada. *Journal of Environmental Management*, 210: 146-161.

Ricaurte-Villota, C., Coca-Domínguez, O., González, M.E., Bejarano-Espinosa, M., Morales, D.F., Correa-Rojas, C., Briceño-Zuluaga, F., Legarda, G.A. y Arteaga, M.E. 2018. Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” –INVEMAR–. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 33. Santa Marta, Colombia. 268 p.

Steer, R., F. Arias-Isaza, A. Ramos, P. Sierra-Correa, D. Alonso, P. Ocampo. 1997. Documento base para la elaboración de la Política Nacional de Ordenamiento Integrado de las Zonas Costeras Colombianas. Documento de consultoría para el Ministerio del Medio Ambiente. Serie publicaciones especiales No.6. 390 p.

Torres-Hugues, R., L. Córdova-López. 2010. Metodología para la rehabilitación y protección de playas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México*, I (4): 149-155.

van Zanten, B.T., P.J.H. van Beukering, A.J. Wagtendonk. 2014. Coastal protection by coral reefs: A framework for spatial assessment and economic valuation. *Ocean & Coastal Management*, 96: 94-103.

Wong, P.P. 2018. Coastal Protection Measures – Case of Small Island Developing States to Address Sea-level Rise. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 6(3): 1-14.