

# Guía Metodológica Escenarios del nivel del mar y erosión costera para las dos costas de Costa Rica

*Diciembre 2024*

# Escenarios del nivel del mar y erosión costera, en el Pacífico y Caribe de Costa Rica, 2024. Guía metodológica

La formulación del presente documento fue liderada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la Fundación de la Universidad de Costa Rica, y la Acción Proyectiva, con el apoyo de diferentes entidades públicas y organizaciones del sector privado y de la sociedad civil, a quienes se les agradece profundamente por su colaboración.

Esta Guía forma parte de la Acción Proyectiva: Fortalecimiento de capacidades para la utilización de información climática para robustecer los procesos de toma de decisiones, cuya finalidad es aportar a la ejecución de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) a partir de capacidades mejoradas de diferentes actores en el nivel subnacional con el fin de robustecer la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Los fondos para la implementación de dicha Acción provienen de EUROCLIMA, programa de cooperación regional financiado por la Unión Europea que busca promover el desarrollo ambientalmente sostenible y resiliente al clima en América Latina.

El equipo profesional encargado de la elaboración de este documento fue coordinado por Equipo de Soluciones en Tecnologías de Información Geográfica S.A. (SOLTIG) y fue integrado por:

- Dr. Omar Gerardo Lizano Rodríguez
- MSc. Melvin Lizano Arroyo
- Dr. Adolfo Quesada Román
- MSc. Paula Marcela Pérez-Briceño

Equipos encargados de guiar y revisar el documento:

## Por AECID

- Dra. Christine Follana

## Por IMN

- MSc. Nazareth Rojas
- Lic. Ana Rita Chacón

## Por Acción Proyectiva

- Dr. Javier Saborío Bejarano
- MSc. Cristina de San Román Aguilar
- MSc. Mariana Soto Ugarte

## Diagramador

- Lic. Christian Mc Koy Carrillo

Forma de citar el documento:

*SOLTIG-Proyectiva-Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2024. Escenarios del nivel del mar y erosión costera, en el Pacífico y Caribe de Costa Rica. Guía metodológica.*

La presente publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva del Instituto Meteorológico Nacional y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

## *Escenarios del nivel del mar y erosión costera, en el Pacífico y Caribe de Costa Rica, 2024. Guía metodológica*

La elaboración de una guía metodológica ofrece un marco práctico y accesible para llevar a cabo estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera, fenómenos que se han intensificado debido al cambio climático y que representan amenazas significativas para las áreas costeras de Costa Rica. Esta guía está diseñada para ser utilizada por personas no especializadas, incluyendo autoridades locales, comunidades, empresas y técnicos, con el objetivo de facilitar la integración de datos geoespaciales en la planificación territorial y la gestión del riesgo, promoviendo así un desarrollo costero sostenible y resiliente. El trabajo presentado tiene como finalidad generar conocimiento y herramientas que ayuden a comprender los impactos del cambio climático en regiones costeras clave como Caldera (Pacífico) y Manzanillo (Caribe). Además, busca fomentar la replicación de estos estudios en otras áreas, proporcionando un respaldo técnico esencial para los procesos de ordenamiento territorial y fortaleciendo la capacidad de respuesta ante futuros escenarios. Esto abarca la identificación de amenazas, la planificación de infraestructuras adaptativas y la protección de comunidades y ecosistemas vulnerables. Los estudios incluidos en esta guía consideran las dinámicas específicas de las costas costarricenses, tales como mareas, perfiles de playa, batimetría y condiciones meteorológicas. Su implementación requiere un enfoque multidisciplinario.

Asimismo, se destaca la importancia de contar con datos actualizados y proyecciones científicas para garantizar decisiones informadas a corto, mediano y largo plazo, alineadas con los compromisos nacionales e internacionales en sostenibilidad y adaptación al cambio climático. Entre los principales beneficios se encuentran la mejora en la gestión de riesgos, el empoderamiento de las comunidades locales, y el desarrollo de políticas públicas y planes reguladores costeros más sólidos. Adicionalmente, el documento promueve la seguridad ocupacional durante las actividades de campo y detalla criterios técnicos y operativos para asegurar que los estudios se implementen de manera eficiente y efectiva. La guía es un recurso fundamental para fortalecer la resiliencia de las zonas costeras frente al cambio climático, integrando datos científicos en la toma de decisiones para proteger comunidades, ecosistemas y economías locales dentro de un marco de desarrollo sostenible.

# Tabla de contenidos

Contenido de figuras	6
Contenido de tablas	7
Glosario	8
Acrónimos y siglas	11
<b>1. Sección A: Presentación de la guía</b>	<b>12</b>
1.1 Introducción	12
1.2 ¿Qué son los estudios de nivel del mar y erosión costera?	12
1.3 ¿Por qué es importante realizar este tipo de estudios?	13
1.4 Criterios para su elaboración	13
1.5 Beneficios de la guía	14
<b>2. Sección B: ¿Cómo usar esta guía?</b>	<b>14</b>
2.1 Objetivo	14
2.2 A quién se dirige	15
2.3 Ámbito de aplicación	15
2.4 Equipo de trabajo	15
2.5 Alcance	17
<b>3. Sección C: ¿Cómo se hace?</b>	<b>17</b>
3.1 Preparación	17
3.1.1 Fases de aplicación de la metodología	17
3.1.2 Descripción y justificación de la metodología	21
3.1.2.1 Revisión bibliográfica y recopilación de datos existentes	21
3.1.2.2 Establecimiento de horizontes temporales para la generación de escenarios ante el aumento del nivel del mar y erosión costera	21
3.1.2.3 Geomorfología y erosión costera	23
3.1.3 Plan de trabajo	23
3.2 Ejecución	24
3.2.1 Pasos para la generación de escenarios de inundación por aumento del nivel del mar	24
3.2.1.1 Etapa 1: Preparación del estudio	24
3.2.1.1.1 Levantamiento batimétrico	24
3.2.1.1.2 Corrección de datos de profundidad	26
3.2.1.1.3 Generación del Modelo de Elevación Digital (MED)	26
3.2.1.1.4 Integración con datos topográficos	27
3.2.1.1.5 Previsualización y análisis en Google Earth	27
3.2.1.1.6 Análisis de las predicciones de mareas	27
3.2.1.1.7 Caracterización del oleaje	29
3.2.1.1.8 Incorporación del fenómeno ENOS	31
3.2.1.1.9 Revisión del apilamiento del oleaje	32
3.2.1.1.10 Consideraciones previas para el levantamiento de campo	34
3.2.1.1.11 Mediciones de campo	37

# Tabla de contenidos

3.2.1.2 <i>Procesamiento de datos</i>	38
3.2.1.2.1 Unificación de niveles de referencia	38
3.2.1.2.2 Generación del Modelo de Elevación Digital (MED)	38
3.2.1.3 <i>Generación de productos</i>	40
3.2.1.3.1 Proyecciones del nivel del mar	40
3.2.1.3.2 Generación de superficies	41
3.2.1.3.3 Medición del oleaje	41
3.2.1.3.4 Generación de escenarios	42
3.2.1.3.5 Generación de superficies de inundación	42
3.2.1.4 <i>Generación de productos finales</i>	43
3.2.1.4.1 Generación de mapas de inundación	43
3.2.1.4.2 Obtención de curvas de inundación - opcional	44
3.2.1.4.3 Formato de entrega	44
<b>3.2.2 Pasos para la generación de la cartografía geomorfológica costera</b>	<b>46</b>
3.2.2.1 <i>Fase de premapeo</i>	47
3.2.2.2.1 Tecnologías utilizadas	47
3.2.2.2.2 Clasificación morfogenética	48
3.2.2.2 <i>Fase de trabajo de campo</i>	48
3.2.2.2.1 Actividades en el trabajo de campo	49
3.2.2.2.2 Herramientas utilizadas	50
3.2.2.3 <i>Fase de posmapeo</i>	50
3.2.2.3.1 Productos finales	51
3.2.2.3.2 Implicaciones del uso de la cartografía geomorfológica	53
<b>3.2.3 Pasos para analizar la erosión costera</b>	<b>53</b>
3.2.3.1 <i>Levantamiento de perfiles de erosión</i>	53
3.2.3.2 <i>Granulometría de arenas</i>	55
3.2.3.3 <i>Perfil de equilibrio</i>	56
3.2.3.4 <i>Índice de erosión y sedimentación costera (IE-SC)</i>	56
3.2.3.5 <i>Productos finales</i>	57
<b>3.2.4 Pasos para el análisis multicriterio</b>	<b>58</b>
3.2.4.1 <i>Identificación de criterios ambientales</i>	58
3.2.4.2 <i>Normalización de datos</i>	59
3.2.4.3 <i>Ponderación de criterios</i>	59
3.2.4.4 <i>Cartografía del análisis multicriterio</i>	61
3.2.4.5 <i>Beneficios adicionales</i>	61
<b>3.2.5 Procedimiento para el análisis de exposición ante riesgos e integración con planes reguladores costeros</b>	<b>62</b>
<b>4. Sección D: Recomendaciones dirigidas a los gobiernos locales</b>	<b>64</b>
<b>5. Bibliografía</b>	<b>67</b>

# Contenido de figuras

<b>Figura 1</b> Ámbito de aplicación de la guía	15
<b>Figura 2</b> Recolección de insumos fase 1	18
<b>Figura 3</b> Pasos esenciales de la fase 2	19
<b>Figura 4</b> Pasos esenciales de la fase 3	19
<b>Figura 5</b> Flujograma que muestra los procesos a realizar de la Fase 4	20
<b>Figura 6</b> Resumen de la metodología	20
<b>Figura 7</b> Página de las estimaciones de la ruta Socioeconómica compartida	22
<b>Figura 8</b> Ejemplo de cómo se implementa el levantamiento batimétrico. a) diagrama del equipo, b) planificación de transectos en Playa Caldera	25
<b>Figura 9</b> Esquema de cómo definir los transectos para el levantamiento batimétrico	25
<b>Figura 10</b> Procedimiento para la corrección de datos de profundidad 28	26
<b>Figura 11</b> Esquema de interpolación.	26
<b>Figura 12</b> Modelo batimétrico en Caldera	26
<b>Figura 13</b> Unión del modelo topográfico con el batimétrico	27
<b>Figura 14</b> Superposición de imágenes de batimetría interpoladas con el motor de Google Earth	27
<b>Figura 15</b> Identificación de los tipos de mareas	28
<b>Figura 16</b> Vista del programa Tidal and Currents	28
<b>Figura 17</b> Página web del MIO-CIMAR	30
<b>Figura 18</b> Mapa de la anomalía en la temperatura superficial en el Océano Pacífico durante El Niño, 1997	31
<b>Figura 19</b> Anomalía de la temperatura superficial del mar	32
<b>Figura 20</b> Diagrama de apilamiento del oleaje	33
<b>Figura 21</b> Datos de entrada y salida del programa swellbeat.com para el caso de Caldera.	33
<b>Figura 22</b> Densidad de la nube de puntos clasificados a terreno en la zona de Caldera	34
<b>Figura 23</b> Red de estaciones GNSS registro nacional para realizar la corrección diferencial	35
<b>Figura 24</b> Corrección mundial de datos compañía Hexagon	36
<b>Figura 25</b> Sitio propuesto para realizar la medición marea 0 en Caldera	37
<b>Figura 26</b> Modelo de Sombras generado para Caldera	39
<b>Figura 27</b> Pasos de la etapa 2 para la generación del MED	40
<b>Figura 28</b> Extensión Oleaje Caldera	41
<b>Figura 29</b> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 3,94 m proyectado al 2030 en Caldera	42
<b>Figura 30</b> Flujo de trabajo para la generación de los escenarios de inundación	43
<b>Figura 31</b> Proyecto con la composición de mapas en QGIS	43
<b>Figura 32</b> Ejemplo del mapa de Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea de 4,43 m proyectada a 2030	44

<i>Figura 33</i> Pasos de la etapa 4 para la generación de los productos cartográficos y extracción de las curvas de inundación	45
<i>Figura 34</i> Información estructurada en geopackage en QGIS	46
<i>Figura 35</i> Modelo esquemático de la cartografía geomorfológica.	46
<i>Figura 36</i> Modelo de elevación digital (DEM), mapas de pendientes, y Geomorphons como insumos para realizar mapas geomorfológicos.	47
<i>Figura 37</i> Fotografía que evidencia los procesos erosivos en playa Caldera, Esparza	49
<i>Figura 38</i> Fotografía del trabajo de campo y medición de perfiles de playa en playa Manzanillo, Talamanca	50
<i>Figura 39</i> Mapas geomorfológicos, del esquema al mapa final	50
<i>Figura 40</i> Ejemplo de cartografía geomorfológica	52
<i>Figura 41</i> Segmentos y perfiles de erosión de playas.	53
<i>Figura 42</i> Ejemplo de tabla de datos del perfil de erosión	54
<i>Figura 43</i> Código en R para la generación de los perfiles	54
<i>Figura 44</i> Ejemplos de perfiles de playa generados en R	54
<i>Figura 45</i> Ejemplo de la cartografía del índice de erosión y sedimentación costera	58
<i>Figura 46</i> Pasos de la etapa 5 para la generación del mapa síntesis final de amenazas costeras	60
<i>Figura 47</i> Mapa índice multiamenaza para Caldera	61
<i>Figura 48</i> Esquema de la incorporación de estudios costeros en planes reguladores	62
<i>Figura 49</i> Datos necesarios el análisis socioeconómico	64
<i>Figura 50</i> Ejemplos de adaptación basadas en ecosistemas (AbE)	65

## Contenido de tablas

<i>Tabla 1</i> Equipo de trabajo multidisciplinario y transdisciplinario	16
<i>Tabla 2</i> Clasificación de datos LiDAR según ASPRS	18
<i>Tabla 3</i> Magnitudes de parámetros al frente de Caldera	23
<i>Tabla 4</i> Características de la marea	29
<i>Tabla 5</i> Magnitudes de parámetros del oleaje al frente de Caldera	30
<i>Tabla 6</i> Clasificación datos LiDAR para la zona de Caldera	34
<i>Tabla 7</i> Características generales modulo LiDAR	35
<i>Tabla 8</i> Características necesarias del colector de datos GNSS	36
<i>Tabla 9</i> Conceptos clave para la medición de nivel del mar	38
<i>Tabla 10</i> Combinaciones seleccionadas para generar los escenarios de inundación.	40
<i>Tabla 11</i> Valores de la reclasificación a realizar de la resta de superficies para las áreas del Pacífico y Caribe Costarricense	42
<i>Tabla 12</i> Colores propuestos para los mapas de inundación	44
<i>Tabla 13</i> Paleta de colores propuesta para el mapa geomorfológico	51
<i>Tabla 14</i> Tamices utilizados para la granulometría de arenas	55
<i>Tabla 15</i> Niveles del Índice de erosión y sedimentación Costera (IE-SC)	56
<i>Tabla 16</i> Paleta de colores para el mapa de Índice de erosión y sedimentación costera	57
<i>Tabla 17</i> Aumento del nivel del mar por escenario de concentración	59
<i>Tabla 18</i> Paleta de colores para el mapa de análisis multicriterio	61

# Glosario

Este glosario ofrece definiciones concisas de los términos clave utilizados en el documento. Su objetivo es facilitar la comprensión de los temas tratados, asegurando que todos los lectores, sin importar su nivel de familiaridad, puedan seguir el hilo argumentativo con claridad.

<b>A</b>	
acción de las olas	Es la erosión y transporte de materiales costeros, debido a la energía de las olas rompiendo en la costa.
acuíferos costeros	Son reservorios subterráneos de agua que se encuentran cerca de la costa, tanto en profundidad como en distancia y pueden ser afectados por la intrusión de agua salada, debido al aumento del nivel del mar.
altura significativa de la ola	Es el promedio de la altura del tercio más alto de las olas observadas en un periodo de tiempo determinado. Este parámetro es importante porque proporciona una estimación representativa de la altura de las olas más grandes en un conjunto de datos. Se desarrolló en la navegación.
amplitud de ola	Es la altura de una ola desde el punto más bajo hasta el más alto.
apilamiento de oleaje	Es un aumento temporal del nivel del mar causado por el rompimiento de la ola en la playa.
<b>C</b>	
corrientes Marinas	Son los flujos continuos y dirigidos de agua en el océano, impulsados por factores como la temperatura, salinidad, vientos y la rotación de la Tierra.
cresta de ola	Es el nombre que se le asigna al punto más alto o la cúspide de una ola.
<b>E</b>	
efecto invernadero	Es el fenómeno por el cual ciertos gases en la atmósfera atrapan el calor del sol, provocando un aumento en las temperaturas globales y, por consiguiente, el derretimiento de los glaciares y el aumento del nivel del mar.
ENOS	Acrónimo de El Niño-Oscilación del Sur es un fenómeno climático caracterizado por variaciones en las temperaturas del Océano Pacífico ecuatorial central y oriental, junto con cambios en la presión atmosférica en la región tropical del Pacífico. El ENOS tiene dos fases principales: El Niño, asociado con el calentamiento de las aguas superficiales del océano y cambios en los patrones climáticos globales, y La Niña, caracterizada por el enfriamiento de estas aguas y efectos climáticos opuestos. Este fenómeno influye en el clima global y puede afectar el nivel del mar, las temperaturas y los patrones de precipitación.

<p><b>E</b></p>	
<p><b>erosión costera</b></p>	<p>El proceso de desgaste y retracción de las costas causado por la acción de las olas, corrientes, mareas y actividad humana.</p>
<p><b>G</b></p>	
<p><b>geopackage</b></p>	<p>Es un formato de archivo universal construido sobre la base de SQLite, para compartir y transferir datos espaciales vectoriales y ráster.</p>
<p><b>I</b></p>	
<p><b>inundación costera</b></p>	<p>Es un aumento del nivel del agua que provoca que las áreas costeras se inunden, generalmente debido a mareas altas, mareas de tormenta o aumento del nivel del mar.</p>
<p><b>intrusión salina</b></p>	<p>Es el movimiento del agua salada hacia acuíferos de agua dulce, generalmente como resultado del aumento del nivel del mar o la extracción excesiva de agua subterránea.</p>
<p><b>L</b></p>	
<p><b>longitud de onda</b></p>	<p>Es la distancia horizontal entre dos crestas de ola sucesivas.</p>
<p><b>M</b></p>	
<p><b>manglares</b></p>	<p>Ecosistemas costeros de árboles y arbustos que viven en aguas salobres o salinas, que protegen las costas de la erosión y proporcionan hábitats para diversas. Son grandes captadores del dióxido de carbono (carbono azul).</p>
<p><b>mareas</b></p>	<p>Son las oscilaciones periódicas del nivel del mar causadas por la atracción gravitacional de la luna y el sol. Las mareas son diferentes entre regiones.</p>
<p><b>marea astronómica</b></p>	<p>Se refiere al ascenso y descenso del nivel del agua producido exclusivamente por las interacciones gravitacionales entre la Tierra, la Luna y el Sol.</p>
<p><b>marea de sicigia</b></p>	<p>Estas ocurren cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados, lo que suele suceder durante las fases de luna nueva y luna llena. Esta alineación aumenta la atracción gravitacional sobre los océanos, resultando en mareas más altas (pleamares) y más bajas (bajamares) de lo normal.</p>
<p><b>marejada de fondo</b></p>	<p>Oleaje de formación remota que ha escapado de la tormenta que las forma.</p>
<p><b>modelos de elevación digital</b></p>	<p>Es la representación digital del terreno construido a partir de curvas de nivel o datos de elevación.</p>
<p><b>modelos de proyección del nivel del mar</b></p>	<p>Son herramientas matemáticas y computacionales utilizadas para prever los cambios futuros en el nivel del mar basados en datos históricos y escenarios de cambio climático a futuro.</p>

<b>N</b>	
nivel del mar	Es la altura media de la superficie del mar en un lugar específico, medida en relación con un punto de referencia terrestre.
<b>O</b>	
olas	Son las oscilaciones del agua en la superficie del mar, generalmente causadas por el viento.
<b>P</b>	
plataforma continental	Es el área de lecho marino relativamente poco profundo que rodea a los continentes.
<b>R</b>	
reflejo de olas	Es el cambio de dirección de las olas cuando golpean una barrera sólida.
rasgos geomorfológicos	Son las formaciones físicas y estructurales de la superficie terrestre, como acantilados, dunas, playas y barras de arena.
<b>S</b>	
sedimentos	Son las partículas de roca, minerales u orgánicas transportadas y depositadas por el agua, viento o hielo.
shapefile	Es el formato de almacenamiento de información geográfica más utilizado para vectores.
subida relativa del nivel del mar	Es el cambio en el nivel del mar observado desde un punto de referencia en tierra, que puede verse afectado tanto por el aumento del nivel del mar global como por el hundimiento o levantamiento de la tierra.
<b>T</b>	
talud continental	Es una pendiente empinada entre la plataforma continental y el fondo oceánico profundo.
transportación de sedimentos	Es el movimiento de sedimentos a lo largo de la costa debido a la acción de las olas, corrientes y mareas.
<b>V</b>	
valle de ola	Es el punto más bajo entre dos olas sucesivas.

## Acrónimos y siglas

A continuación, se presenta una lista de acrónimos utilizados en este documento, junto con sus significados. Esta referencia facilitará la comprensión y permitirá a los lectores seguir el contenido de manera más efectiva.

AMC	Análisis multicriterio
AR6	Sexto Informe de Evaluación, por sus siglas en inglés
ASPRS	Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos, por sus siglas en inglés
CC-BY-NC	Licencia de Creative Commons que se debe dar atribución al autor y no se permite el uso comercial, por sus siglas en inglés
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y El Caribe
CNE	Comisión Nacional de Prevención De Riesgos y Atención de Emergencias
CR05-SIRGAS	Costa Rica 05 - Sistema de Referencia Geodésico para las Américas
CRTM05	Costa Rica Transversal de Mercator 2005
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNSS	Sistemas Globales de Navegación Satelital, por sus siglas en inglés
IPCC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, por sus siglas en inglés
LiDAR	Detección de Luz y Rango, por sus siglas en inglés
MIO-CIMAR	Módulo de Información Oceanográfica del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad de Costa Rica
NCEP-NOAA	Centros Nacionales de Predicción Ambiental- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, por sus siglas en inglés
PCT	Puntos de control terrestre
QGIS	Sistema de Información Geográfica Quantum, por sus siglas en inglés
RCP	Escenario de Concentración Representativa, por sus siglas en inglés
SAGA-GIS	Sistema automatizado para el Análisis Geocientífico-Sistema de Información Geográfica, por sus siglas en inglés
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SSP	Ruta Socioeconómica Compartida, por sus siglas en inglés
VANTs	Vehículos Aéreos No Tripulados

# 1. Sección A: Presentación de la guía

## 1.1 Introducción

La creciente preocupación por el aumento del nivel del mar y la erosión costera lleva a la necesidad de desarrollar herramientas metodológicas que faciliten la toma de decisiones informadas en las zonas costeras de Costa Rica. Estos fenómenos, agravados por el cambio climático (Variabilidad Climática (VC) y Calentamiento Global Antropogénico (CGA), presentan desafíos significativos para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

La guía busca orientar tanto a usuarios sin conocimientos especializados como a autoridades locales, empresas y comunidades que necesitan incorporar este tipo de información en sus planes reguladores costeros y decisiones relacionadas a la gestión territorial. La información obtenida de estos estudios les permite fortalecer la planificación territorial, mejorar la gestión del riesgo y promover un desarrollo costero sostenible y resiliente en el contexto actual del cambio climático.

Asimismo, la guía pretende servir como una herramienta que permite integrar los estudios geoespaciales en este caso: Caldera (Pacífico) y Manzanillo (Caribe) en Costa Rica con los procesos de ordenamiento territorial, con lo cual brinda datos precisos y actualizados sobre las amenazas que representan la erosión y el aumento del nivel del mar. Esto permitirá a las instituciones y actores involucrados tomar decisiones más informadas y adoptar medidas preventivas y correctivas para proteger las comunidades costeras, los ecosistemas y la infraestructura ante este tipo de fenómenos.

La implementación de esta guía forma parte de un esfuerzo más amplio impulsado por el gobierno costarricense y programas internacionales como EUROCLIMA+, que buscan fortalecer la resiliencia ante el cambio climático. Al proporcionar directrices claras y accesibles, la guía facilita la comprensión de los estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera, a la vez que promueve la colaboración entre diversos actores involucrados en la gestión territorial. Esto es fundamental para garantizar que las decisiones tomadas sean informadas y estén alineadas con los compromisos nacionales e internacionales en materia de sostenibilidad y adaptación al cambio climático.

## 1.2 ¿Qué son los estudios de nivel del mar y erosión costera?

Este tipo de estudios permite analizar y prever cómo el aumento del nivel del mar inducido por el cambio climático, el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y el apilamiento del oleaje en combinación con la erosión costera afecta las áreas costeras, específicamente en las regiones del Pacífico (Caldera) y el Caribe (Manzanillo), como se demuestra en el estudio concluido.

Por el alcance del tipo de estudio, el equipo de trabajo debe ser multidisciplinario o transdisciplinario, tal y como lo fue en esta oportunidad, donde se contó con la participación de diferentes disciplinas condicionados a conocer la dinámica oceánica-costera y el entorno socioeconómico en las áreas de análisis, tanto para el océano Pacífico como en el mar Caribe de Costa Rica.

Es importante advertir que los procedimientos descritos en esta guía requieren mediciones en condiciones diferentes de la marea. Por ejemplo, para la batimetría se necesita la marea alta, para el levantamiento de perfiles de playa, marea baja y para el nivel de sicigia, la marea debe estar en nivel cero. Debido a las características de las mareas en Costa Rica, es altamente probable que las condiciones necesarias para cada disciplina no coincidan en el mismo momento, por lo que es importante planificar salidas de campo de acuerdo con las condiciones de la marea. Además, en cuanto a las condiciones atmosféricas, es necesario que no haya lluvias para garantizar la seguridad del equipo, como por ejemplo los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) y así evitar el riesgo de descargas eléctricas debido a la exposición en campo abierto. Se recomienda trabajar en horas de la mañana, desde el amanecer hasta alrededor de las 10 a. m.

Además, se debe tomar en cuenta la seguridad ocupacional del equipo consultor y las condiciones atmosféricas, ya que, al trabajar a 0 metros sobre el nivel del mar en una zona tropical, las temperaturas pueden ser bastante elevadas. Es muy importante preparar hidratación para todas las personas involucradas, como asistentes que acompañen, así como la vestimenta adecuada para el trabajo en la playa, por ejemplo: utilizar mangas con protección contra rayos ultravioleta, gorra o sombrero, bloqueador solar, zapatos para el agua para asegurar la protección de los pies, lentes de sol y cualquier otro artículo que resguarde la seguridad en el desarrollo del trabajo.

### **1.3 ¿Por qué es importante realizar este tipo de estudios?**

La elaboración de este documento obedece a la necesidad de replicar los “Estudios y proyecciones de aumento en el nivel del mar y erosión costera para las dos costas del país” a otras playas en Costa Rica y América Central. La falta de este tipo de información limita la capacidad del país y de las municipalidades para anticipar los efectos del cambio climático y así tomar medidas preventivas frente a la pérdida de terrenos e infraestructuras claves en las zonas más vulnerables a estos fenómenos. Realizar estos estudios es crucial para el país, ya que proporciona el respaldo técnico necesario para los procesos de planificación en el ámbito local para los cantones que cuenten con áreas costeras. Estos estudios aportan un valor agregado, ya que permiten integrar datos científicos y proyecciones a corto, mediano y largo plazo en los procesos de planificación territorial y de ordenamiento de los espacios marino-costeros.

Generar escenarios de aumento del nivel del mar y erosión costera posibilita identificar áreas con una elevada amenaza ante estos fenómenos, facilitando con ello la creación de planes reguladores más robustos y adaptados a las condiciones futuras esperadas para cada sitio. Es importante mencionar que este tipo de estudios se debe realizar en función de cada área geográfica, al ser áreas únicas en cuanto a las características de los elementos oceanográficos, geomorfológicos y geográficos que las componen.

Adicionalmente, estos estudios son fundamentales para mejorar la gestión y administración de los espacios marino-costeros, ya que permiten establecer prioridades en la conservación de ecosistemas críticos, como manglares y humedales; la protección de comunidades vulnerables frente a los impactos de estos fenómenos y el desarrollo; así como construcción sostenible de infraestructuras. La importancia yace en que se debe incorporar esta información en los planes reguladores costeros, lo que facilitará una mejor toma de decisiones en el ámbito tanto municipal como nacional, al promover un uso más eficiente del territorio. Esto contribuirá a hacer que las zonas costeras sean más resilientes y así minimizar los impactos negativos que estos fenómenos en el mediano y largo plazo.

### **1.4 Criterios para su elaboración**

Para la elaboración de esta guía, se toma en cuenta varios criterios fundamentales. En primer lugar, se prioriza la necesidad de que la información sea accesible y comprensible para usuarios sin conocimientos técnicos avanzados. Para ello, se utiliza un lenguaje claro y directo, lo que garantiza que la guía sea inclusiva y pueda ser utilizada por una amplia variedad de actores, desde autoridades locales hasta representantes comunitarios, sin enfrentarse a la barrera de la terminología especializada en sistemas de información geográfica (SIG).

En segundo lugar, se incorporan los principios de planificación territorial y gestión de riesgos recomendados por organismos internacionales y nacionales, como el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). Esto asegura que los estudios solicitados a través de esta guía estén alineados con las normativas costarricenses y los marcos internacionales en materia de cambio climático, conservación y desarrollo sostenible.

En tercer lugar, se da prioridad a la actualización y relevancia de los datos, garantizando que los estudios se basen en modelos y proyecciones científicas actuales. Este enfoque permite a los usuarios obtener resultados confiables y de alta calidad, que pueden servir como base para la toma de decisiones estratégicas a largo plazo, tanto en términos de infraestructura como asociados al ordenamiento territorial.

## 1.5 Beneficios para la guía

- **Mayor comprensión y accesibilidad de la información:** La guía facilita la comprensión de los estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera para los usuarios no especializados, lo cual permite que la información se utilice de manera efectiva en la toma de decisiones relacionadas con la gestión territorial
- **Integración de datos geoespaciales:** La correcta aplicación de la metodología propuesta resulta en una integración efectiva de los datos e información espacial generada en los planes reguladores y políticas públicas. Esto contribuye a una gestión costera más informada y estratégica.
- **Desarrollo de capacidades en las comunidades locales:** La guía fomenta el desarrollo de capacidades entre autoridades locales, comunidades y otros actores. Esto permitiría la participación activa en la gestión de sus territorios frente a los desafíos de la VC y CGA.
- **Propuestas de intervención y planificación:** A través de la implementación de los estudios solicitados, se genera propuestas concretas para la planificación y gestión de los espacios marino-costeros. Estas propuestas abordarán las amenazas identificadas, mejorando así la resiliencia de las comunidades costeras ante los efectos del aumento del nivel del mar y la erosión costera.
- **Contribución a políticas de desarrollo sostenible:** La guía servirá como un recurso clave para la formulación de políticas públicas que promueven un desarrollo costero sostenible. Esto incluye la incorporación efectiva de proyecciones sobre el nivel del mar y las dinámicas de erosión en la toma de decisiones y el ordenamiento territorial costero.

## 2. Sección B: ¿Cómo usar esta guía?

### 2.1 Objetivo

**E**l objetivo de esta guía es ofrecer un conjunto de directrices y prácticas que faciliten la comprensión de los estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera, al integrar datos geoespaciales en el ordenamiento territorial. Además, busca identificar el papel de las tecnologías geoespaciales en la gestión de amenazas costeras y promover la toma de decisiones informadas por parte de las instituciones y actores involucrados en la protección de las zonas costeras. Esto garantiza que tanto quienes toman decisiones como los usuarios sin conocimientos técnicos puedan interpretar y aplicar la información generada en sus contextos específicos. Un ejemplo de esto es:

**a. Integrar datos geoespaciales en el ordenamiento territorial:** La guía promueve la integración de datos geoespaciales en los procesos de ordenamiento territorial. Esto permite reconocer el papel crucial de las tecnologías espaciales en la identificación y gestión de amenazas costeras, contribuyendo así a una planificación más efectiva de infraestructuras y a la protección de comunidades vulnerables.

**b. Fomentar la toma de decisiones informadas:** Este documento busca incentivar la toma de decisiones fundamentadas en datos científicos por parte de las instituciones y actores involucrados en la gestión de zonas costeras. Se pretende proveer la información necesaria para desarrollar planes de acción que respondan adecuadamente a los desafíos que plantea el cambio climático y la erosión costera.

**c. Promover un desarrollo costero sostenible:** Se promueve un desarrollo sostenible y resiliente en las comunidades costeras mediante la aplicación de prácticas de gestión que consideren los escenarios futuros del aumento del nivel del mar y la erosión costera. Esto garantiza que el crecimiento urbano y el desarrollo de infraestructura sean compatibles con la conservación del medio ambiente.

## 2.2 A quién se dirige

La guía se dirige a usuarios no especializados que necesitan implementar estudios relacionados con el aumento del nivel del mar y la erosión costera, pero que no necesariamente poseen conocimientos técnicos en SIG. Entre los destinatarios principales se encuentran autoridades locales, funcionarios municipales, gestores de proyectos y líderes comunitarios de zonas costeras, quienes requieren contar con información técnica para la toma de decisiones en temas de desarrollo urbano, gestión de riesgos y planificación territorial.

Además, la guía resulta útil para empresas privadas y desarrolladores inmobiliarios interesados en asegurar que sus proyectos en zonas costeras tengan en cuenta los riesgos asociados al cambio climático y la erosión costera. También, está dirigida a organizaciones no gubernamentales y organismos internacionales que trabajen en la conservación del ambiente y la protección de comunidades vulnerables, pues les proporciona un recurso accesible para solicitar y comprender estudios geoespaciales de carácter técnico.

## 2.3 Ámbito de aplicación

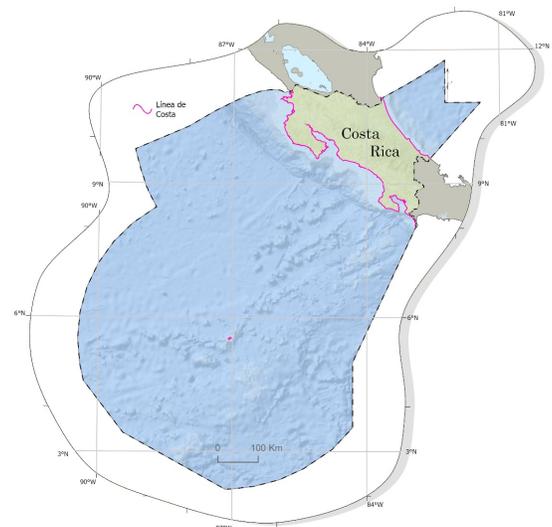
La presente guía se enfoca en las costas del Pacífico (Caldera) y del Caribe (Manzanillo) de Costa Rica, regiones que son especialmente susceptibles al aumento del nivel del mar y a la erosión costera, debido a su geografía, clima y dinámicas marino-costeras. No obstante, la metodología aquí descrita puede ser adaptada para su uso en otras áreas costeras del país (Figura 1), incluida la Isla del Coco con las playas Wafer y Chatham, que enfrentan desafíos similares.

## 2.4 Equipo de trabajo

Por el alcance del tipo de estudio, el equipo de trabajo debe ser multidisciplinario o transdisciplinario, tal y como lo es en esta

oportunidad donde se contó con la participación de diferentes disciplinas condicionadas a conocer la dinámica oceánica-costera, y el entorno socioeconómico en las áreas de análisis, tanto para el Océano Pacífico como en el Mar Caribe de Costa Rica. Por tanto, para llevar a cabo este tipo de estudios se requiere como mínimo un equipo que contemple las funciones y capacidades descritas en la Tabla 1.

Figura 1 Ámbito de aplicación de la guía



Fuente: Datos propios, 2024.

Tabla 1 Equipo de trabajo multidisciplinario y transdisciplinario

Especialista	Disciplina	Función requerida
Especialista en SIG geográfica	Geografía, Ingeniería Forestal, Topografía, otras	Encargado del análisis, integración, representación y gestión de datos espaciales solicitados en el estudio, así como los resultados y visualización
Especialista en oceanografía	Oceanografía, Física	Facilitar la interpretación y análisis sobre oleaje, mareas, corrientes, batimetría y otras dinámicas costeras
Especialista en geomorfología	Geografía, Geografía Física	Profesional encargado de la recolección, análisis e interpretación de datos geológicos y geomorfológicos que son críticos para la creación de escenarios de riesgo costero, debido al aumento del nivel del mar y la erosión.
Especialista en manejo integrado de áreas costeras tropicales	Geografía, Biología, Física	Tiene como tareas fundamentales apoyar en la planificación, gestión y conservación de las zonas costeras, especialmente en entornos tropicales que son altamente vulnerables a factores, como el cambio climático, el aumento del nivel del mar y la erosión costera.
Geografía	Geografía	Gestionar la recopilación de datos geoespaciales utilizando tecnologías como SIG y teledetección. Apoyar en la realización de análisis espaciales para identificar patrones y tendencias que ayuden a comprender los impactos del cambio climático y la erosión costera en las áreas de estudio.
Geografía	Geografía	Responsable de la recolección de datos físicos y ambientales que son fundamentales para la evaluación de la erosión costera y el aumento del nivel del mar.
Opcionalmente, diseñador gráfico (deseable)	Diseño Gráfico	Apoyo para el desarrollo de materiales visuales que faciliten la comprensión de los datos y resultados del proyecto.
Opcionalmente, especialista en gestión de riesgo	Geografía, Geología, Biología	Su función incluye diseñar estrategias preventivas y correctivas para minimizar los impactos en las comunidades y ecosistemas costeros.
Especialista en planificación territorial, con experiencia en planes reguladores costeros y cantonales	Arquitectura, Geografía u otro campo afín	Se encarga de integrar el análisis de los escenarios de cambio en el nivel del mar con los planes de ordenamiento territorial, al adaptar los usos de la tierra y la planificación urbana y rural para mitigar la vulnerabilidad de las zonas afectadas por el aumento del nivel del mar y la erosión costera.

Fuente: Datos propios, 2024.

Se recomienda que el trabajo sea realizado por un equipo transdisciplinario, con el fin de tener una visión integral mediante la cual se pueda tomar en cuenta posibles impactos del ámbito social (directos o indirectos, por ejemplo relacionados a la degradación del agua por salinización), económico (desde lo local hasta nacional), ambiental (como manglares, humedales y otros ecosistemas costeros) e infraestructural; cuyos análisis –más allá de este estudio– se deben realizar para contar con decisiones informadas e implementar medidas de ingeniería o soluciones basadas en la naturaleza.

## 2.5 Alcance

El alcance de esta guía se enfoca en proporcionar un marco metodológico claro y accesible para la realización de estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera en las playas de Caldera y Manzanillo en Costa Rica. Mediante un enfoque integral, la guía facilita la recopilación y el análisis de datos geoespaciales, lo cual permite a autoridades locales, empresas y comunidades evaluar las amenazas que enfrentan en sus entornos costeros. Se pretende crear directrices prácticas que ayuden a los usuarios a solicitar y comprender los estudios necesarios para tomar decisiones informadas sobre gestión territorial y planificación urbana, asegurando que dichas decisiones se alineen con los retos del cambio climático y la sostenibilidad.

# 3. Sección C: ¿Cómo se hace?

## 3.1 Preparación

La guía va más allá de la simple recopilación de datos, dado que fomenta la colaboración entre diversos actores involucrados en la gestión territorial. Este enfoque colaborativo es esencial para garantizar que las estrategias desarrolladas sean efectivas y respondan a las realidades locales. Se espera que la implementación de la guía no solo contribuya a la protección de las comunidades costeras y los ecosistemas vulnerables, sino que también promueva un desarrollo sostenible y resiliente en las regiones afectadas, fortaleciendo así la capacidad de respuesta ante los efectos adversos del aumento del nivel del mar y la erosión costera.

### 3.1.1 Fases de aplicación de la metodología

La metodología para la generación de escenarios de inundación debido al aumento del nivel del mar se organiza en cinco fases claves (Figura 6).

En la Fase 1, de manera general, se hace la recolección de insumos para el desarrollo del trabajo como datos espaciales, datos de campos y revisión bibliográfica, como se muestra en la Figura 2. Se inicia con la recolección de datos en campo utilizando datos LiDAR proporcionados por la CNE.

Figura 2 Recolección de insumos fase 1



Datos de campo

Revisión bibliográfica actualizada

Fuente: Datos propios, 2024.

Estos datos permiten crear modelos de elevación de alta resolución, los cuales son validados y filtrados conforme a la clasificación internacional de la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS, por sus siglas en inglés) para garantizar su calidad. Esta clasificación se basa en lo indicado en la Tabla 2. Además, se realizan mediciones del nivel del mar y batimetría en las áreas de Manzanillo y Caldera, así como la obtención de puntos de control terrestre (PCT) mediante receptores de sistemas globales de navegación satelital (GNSS, por sus siglas en inglés). Esta etapa se incluye el trabajo de campo para la evaluación de la erosión costera, donde se levantan perfiles de la playa, se capturan fotografías y se hace un análisis in situ de la situación de la playa. Además, se lleva a cabo un mapeo geomorfológico de las playas, en tres fases: premapeo, trabajo de campo y posmapeo, donde se verifica la clasificación morfo-genética del relieve costero. Finalmente, se identifican las publicaciones científicas relacionadas con el tema y el lugar, tanto a nivel nacional como internacional.

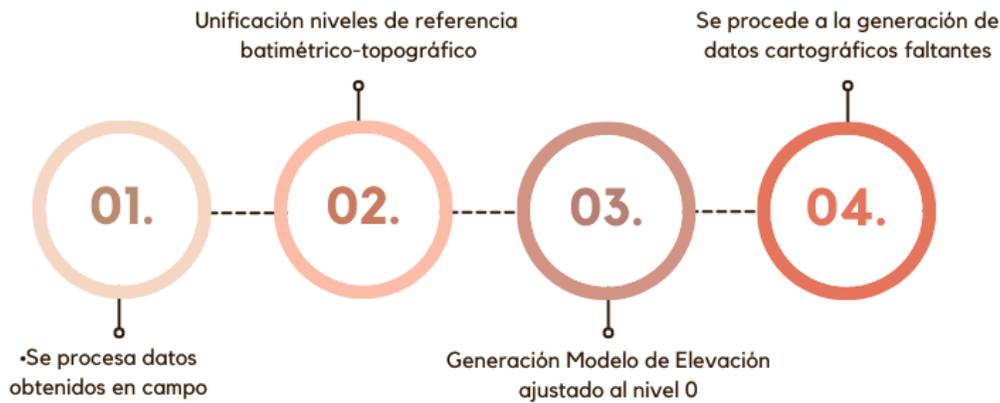
Tabla 2 Clasificación de datos LiDAR según ASPRS

CÓDIGO	CLASE
0	Creado, no clasificado
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación baja (< 0.4 m)
4	Vegetación media (< 0.4 - 2 m)
5	Vegetación alta (>2 m)
6	Edificios
7	Puntos bajo (ruido)
8	Model Key-point
9	Agua
10	Reservado para definición de la ASPRS
11	Reservado para definición de la ASPRS
12	Puntos superpuestos
13-31	Reservado para definición de la ASPRS

Fuente: Datos propios, 2024.

La Fase 2 se centra en el procesamiento de los datos que fueron recolectados en campo, unificándolos con los niveles de referencia topográficos y batimétricos para generar un modelo de elevación que sirva como base para los escenarios futuros. Se incorporan datos de mareas ajustados al nivel "0" para asegurar la precisión del modelo. Se procede a la generación de datos espaciales faltantes a través de la digitalización de imágenes áreas en color verdadero, con el fin de tener los insumos para la siguiente fase. Lo anterior queda resumido en la Figura 3. Se estandarizan los datos para ser utilizados en la fase 4, que se detalla más adelante.

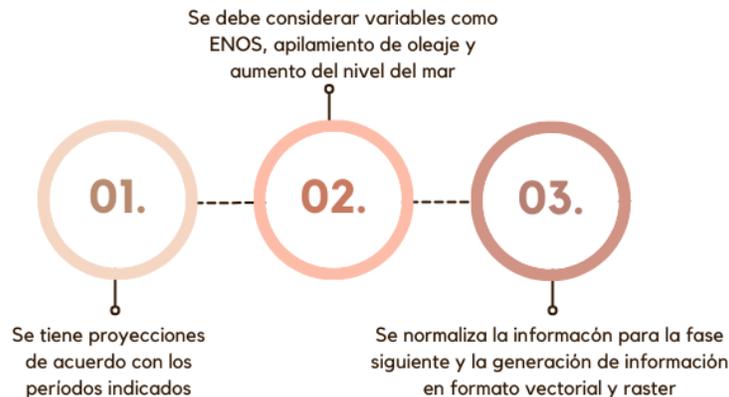
Figura 3 Pasos esenciales de la fase 2



Fuente: Datos propios, 2024.

En la Fase 3 se obtienen los resultados parciales como los escenarios de inundación ante el aumento del nivel del mar, conforme a las proyecciones de cambio climático para los años 2030, 2050, 2070 y 2100 utilizando programas de información geográfica como el Sistema de Información Geográfica Quantum (QGIS), apoyadas en las proyecciones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y según las variables como el oleaje y el fenómeno de ENOS. Se normalizan los datos con miras a la Fase 4, de manera que se puedan realizar comparaciones y se generan las capas de información vectorial y ráster como se ilustra esquemáticamente en la Figura 4.

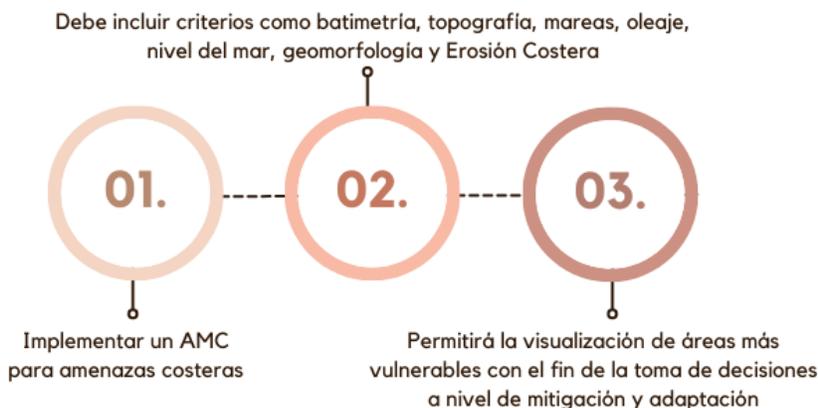
Figura 4 Pasos esenciales de la fase 3



Fuente: Datos propios, 2024.

En la Fase 4 se debe implementar un análisis multicriterio (AMC) para evaluar las alternativas relacionadas con la amenaza costera. Este enfoque permitirá considerar criterios ambientales claves que influyen en la vulnerabilidad de la costa, tales como batimetría, topografía, mareas, oleaje, nivel del mar, geomorfología y erosión costera. Con la información ya normalizada, se asigna las ponderaciones a cada uno de estos, según la importancia relativa en la evaluación de la amenaza costera y el criterio experto emitido por el grupo de trabajo. Esta técnica no solo proporcionará un marco sistemático para la toma de decisiones, sino que facilitará la visualización de las áreas más vulnerables, lo cual permite priorizar acciones de mitigación y adaptación en función de los resultados obtenidos como lo muestra el flujograma mostrado en la Figura 5.

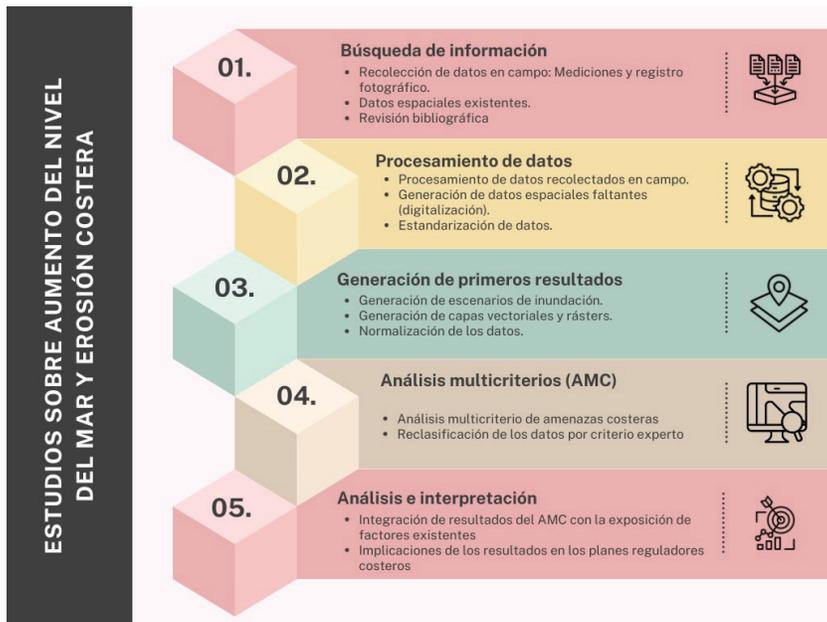
Figura 5 Flujograma que muestra los procesos a realizar de la Fase 4



Fuente: Datos propios, 2024.

Finalmente, en la Fase 5 se integrará los resultados del AMC para llevar a cabo un análisis exhaustivo de la exposición a factores, relacionados con las amenazas costeras siempre y cuando se dispongan de datos para este fin. Este análisis permitirá identificar las áreas más vulnerables y los activos expuestos, al considerar aspectos como la infraestructura, los recursos naturales y las comunidades locales. Con base en esta evaluación, se elaborarán recomendaciones específicas para los planes reguladores costeros y el ordenamiento territorial, orientadas a fortalecer la resiliencia de las zonas costeras frente a los efectos del cambio climático y la erosión. Estas recomendaciones incluirán la implementación de zonas de amortiguamiento, restricciones al desarrollo en áreas críticas y la promoción de prácticas sostenibles en el uso u ocupación de la tierra, garantizando así una planificación territorial que aborde los desafíos actuales y futuros en la gestión costera.

Figura 6 Resumen de la metodología



Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.1.2 Descripción y justificación de la metodología

En este apartado, se explica la relevancia de los pasos metodológicos, la razón de la elección, la justificación de los criterios de calidad, así como una propuesta del plan de trabajo por desarrollar.

#### 3.1.2.1 Revisión bibliográfica y recopilación de datos existentes

Para la elaboración de estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera, es fundamental una revisión exhaustiva del material bibliográfico existente y que contemple la información más actualizada disponible, entre el que se destaca: literatura científica, informes técnicos (contemplar los trámites burocráticos para la solicitud de información) y documentos relevantes que abordan estos fenómenos en el ámbito local, regional y global. Esta revisión identificará vacíos de conocimiento y áreas que van a requerir de una mayor atención, asegurando así que la investigación se justifique basada en un marco teórico sólido y actualizado.

Con respecto a las fuentes de datos espaciales, estas deben incluir la obtención de datos o registros actuales e históricos sobre las mareas, oleajes, profundidades, apilamiento del oleaje, ENOS, erosión costera, geomorfología, elevaciones (es requerido contar con datos que permitan realizar modelos de elevación digital de muy alta resolución espacial del orden de los centímetros).

#### 3.1.2.2 Establecimiento de horizontes temporales para la generación de escenarios ante el aumento del nivel del mar y erosión costera

La elaboración de escenarios del nivel del mar para 2030, 2050, 2070 y 2100 es fundamental para comprender y anticipar los impactos del cambio climático en las áreas costeras, especialmente en contextos vulnerables como Caldera y Manzanillo en Costa Rica. Estos escenarios se basan en las proyecciones del IPCC, específicamente utilizando la ruta socioeconómica compartida (SSP, por sus siglas en inglés) para el escenario SSP3-7.0. A continuación, se detallan las razones que justifican la creación de estos escenarios a partir de los umbrales temporales propuestos:

**a. Proporcionan una base científica sólida:** Los escenarios están fundamentados en investigaciones rigurosas y actualizadas, como las proyecciones del IPCC del año 2021. Esto garantiza que las estimaciones del nivel del mar sean representativas de las tendencias globales, lo que es fundamental para temas de planificación y toma de decisiones en la gestión de los espacios marino-costeros.

**b. Preparación y adaptación:** Conocer las proyecciones del nivel del mar para diferentes períodos o años permite a las autoridades y comunidades locales prepararse y adaptarse a los cambios proyectados. Las proyecciones a corto (2030) y mediano plazo (2050) son especialmente importantes, pues permiten proponer e implementar medidas de mitigación y adaptación en un horizonte temporal manejable.

**c. Variabilidad y no linealidad:** Como se menciona en los estudios del IPCC, los escenarios indicados no son lineales (IPCC, 2021). Esto significa que el aumento del nivel del mar puede acelerarse con el paso del tiempo. Esta variabilidad subraya la importancia de contar con múltiples puntos de referencia (de ahí la propuesta de utilizar los años 2030, 2050, 2070 y 2100) para evaluar cómo las decisiones actuales pueden influir en los escenarios futuros.

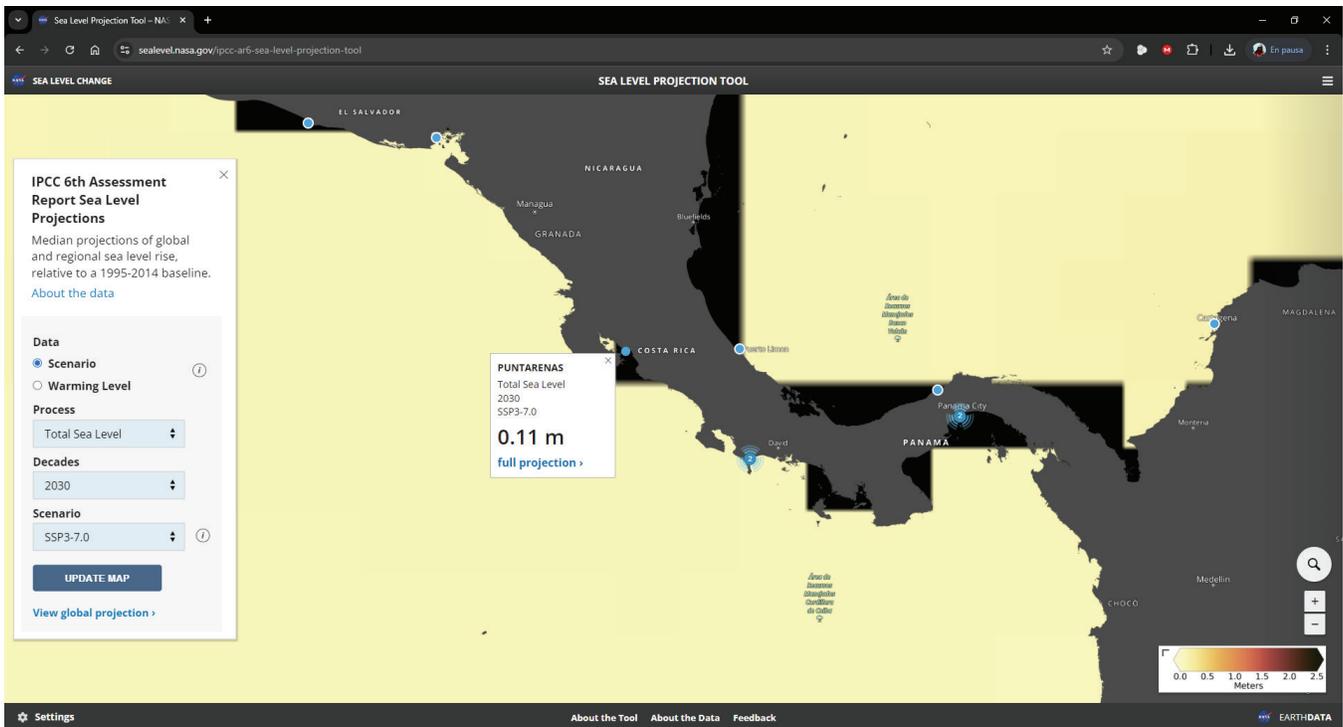
**d. Impulsar políticas efectivas:** La información generada por estos escenarios puede ser utilizada para desarrollar políticas efectivas de ordenamiento territorial y gestión de riesgos, así como para justificar la inclusión de estrategias de adaptación y mitigación en los planes reguladores costeros, o al menos que las variables de aumento del nivel del mar y erosión costera sean tomadas en cuenta. Lo anterior es vital para asegurar un desarrollo sostenible y sustentable en los espacios costeros.

**e. Conciencia y educación:** El presentar proyecciones a futuro permite crear conciencia sobre la urgencia de abordar el cambio climático y sus efectos en el aumento del nivel del mar. Además, lo anterior permite educar a la población, desde niños, jóvenes, adultos y a quienes deciden sobre la necesidad de implementar medidas que protejan a las comunidades costeras y sus recursos.

**f. Escenarios del nivel del mar al 2030, 2050, 2070 y 2100**

Se recomienda hacer uso de las proyecciones de aumento del nivel del mar para los años indicados, de acuerdo con los escenarios del IPCC (2021) según las estimaciones de la SSP (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>) (ver Figura 7, que indica que para un SSP3-7.0, escenario con alta concentración de CO2, considerado de medio a alto, pero no extremo como el SSP5-8.5). Como lo indican los estudios del IPCC, estos escenarios no son lineales en el tiempo y más bien muestran un aumento ligeramente exponencial, de manera que al 2050 y 2100 es posible que los valores sean mayores (Tabla 3).

Figura 7 Página de las estimaciones de la ruta Socioeconómica compartida



Fuente: Datos propios, 2024.

Tabla 3 Magnitudes de parámetros al frente de Caldera

Parámetro	Caldera	Manzanillo
El Niño	0,30 m	0,30 m
Apilamiento de oleaje	0,73 m	0,745 m
Nivel del mar 2030	0,11 m	0,12 m
Nivel del mar 2050	0,24 m	0,25 m
Nivel del mar 2070	0,41 m	0,42 m
Nivel del mar 2100	0,75 m	0,76 m

Datos propios

### 3.1.2.3 Geomorfología y erosión costera

Los mapas geomorfológicos indican cuáles son las formas de relieve costero tanto erosionales (p. ej. acantilados y plataformas de abrasión) como deposicionales (p. ej. estuarios y playas). Con el pasar del tiempo, estas formas van cambiando e indican tendencias hacia costas más erosivas o bien acumulativas. Para estos mapas se requiere de información topográfica de alta resolución obtenida tanto de mapas topográficos, fotos aéreas, imágenes satelitales y aún mejor mediante VANTs inclusive con cámara y sensor LiDAR. La calidad y resolución de esta información es clave para que los estudios geomorfológicos de zonas costeras sean útiles para la toma de decisiones en el ordenamiento territorial y la gestión de riesgo. Además, es clave que estos análisis sean realizados por un experto en cartografía geomorfológica. Dicho especialista debe demostrar mediante trabajos previos o investigaciones científicas, su capacidad de generar estos mapas.

El estudio de la erosión costera permite identificar aquellas áreas que presentan un desequilibrio en la cantidad de sedimentos en la playa a falta de arena, lo que representa un potencial peligro en la zona costera afectando infraestructura, red vial y ecosistemas cercanos. La forma de analizar la erosión es realizando medidas in situ en la playa. En este caso, se utilizó una metodología que es económica y replicable, por lo que facilitará el monitoreo. Además, dentro ese mismo trabajo de campo, se le da seguimiento al índice de erosión y sedimentación costera. Cabe mencionar que existen métodos con otras tecnologías, pero requieren mayor inversión económica.

### 3.1.3 Plan de trabajo

Es un elemento esencial para la ejecución de la consultoría sobre esta temática, ya que proporciona una hoja de ruta clara y estructurada para abordar y desarrollar todas las actividades relacionadas con el estudio. Se sugiere que se pueda presentar en un plazo de 10 días hábiles desde el inicio de la consultoría. Este documento no solo establece los objetivos y las actividades por realizar, sino que también permite a todas las partes interesadas visualizar el progreso del proyecto y se garantiza así el cumplimiento de los plazos establecidos, incluido el lapso para recibir las correcciones y observaciones de los entregables. Adicionalmente, se recomienda que contemplen la inserción de un cronograma de actividades detallado, lo que facilitará la coordinación entre los

diferentes entes involucrados, tratando de que se asegure y mantenga lo solicitado en el corto y mediano plazo.

El plan debe incluir las metodologías específicas y actuales para realizar las mediciones necesarias, lo que garantiza que las técnicas y herramientas empleadas sean adecuadas y eficaces de acuerdo con las necesidades. Además, debe incluir una lista de contactos y organizaciones que podrían intervenir en la colaboración y el intercambio de información entre los diferentes actores y entidades involucrados en el proyecto. Por lo tanto, el plan de trabajo no solo actúa como un documento administrativo, sino que es una herramienta estratégica que facilita la implementación efectiva de acciones o ajustes necesarios durante su ejecución, promoviendo una gestión transparente del proyecto y contribuyendo a la obtención de los resultados esperados.

## 3.2 Ejecución

En este bloque encontrará el paso a paso para realizar los estudios. La metodología se estructura en cuatro etapas: la primera para realizar el análisis del aumento del nivel de mar, la segunda sobre la geomorfología costera, la tercera sobre la erosión costera y la última sobre las implicaciones de este tipo de estudios en los planes reguladores costeros. Estas etapas conforman las cinco fases señaladas en el apartado 3.1.

### 3.2.1 Pasos para la generación de escenarios de inundación por aumento del nivel del mar

El desarrollo de los escenarios de inundación por aumento del nivel del mar se estructura en tres etapas, con un enfoque secuencial que va desde la preparación hasta el análisis específico de riesgos.

#### 3.2.1.1 Etapa 1: Preparación del estudio

Antes de generar los escenarios de inundación, es fundamental seguir una serie de pasos que implica el uso de diversas herramientas y técnicas para recolectar, actualizar y ajustar la información necesaria para la modelación. Este proceso se divide en al menos cuatro etapas claves para la obtención de datos precisos. Es crucial señalar que toda la información sea adaptada específicamente a la playa en la que se va a realizar el trabajo. Esto se debe a que las características geomorfológicas, así como la variabilidad de las mareas, el oleaje, la erosión costera y el apilamiento difieren significativamente una de otra. Por lo tanto, no se puede aplicar un enfoque uniforme, ya que cada playa presenta características oceanográficas y geográficas únicas.

Las mareas, el oleaje, la erosión costera y el apilamiento varían según las áreas geográficas. Por ejemplo, los patrones de las mareas son desiguales dependiendo de la región oceanográfica, donde se realiza la medición conforme a las diferencias entre Pacífico Norte, Pacífico Central y Pacífico Sur, así como en la Región Caribe. Asimismo, el oleaje puede intensificarse debido a los vientos en ciertas épocas del año, como ocurre con los vientos alisios o por tormentas que se desarrollan en mar abierto. En cuanto a la erosión costera, su impacto puede variar considerablemente según la playa analizada y relacionado con la energía del oleaje.

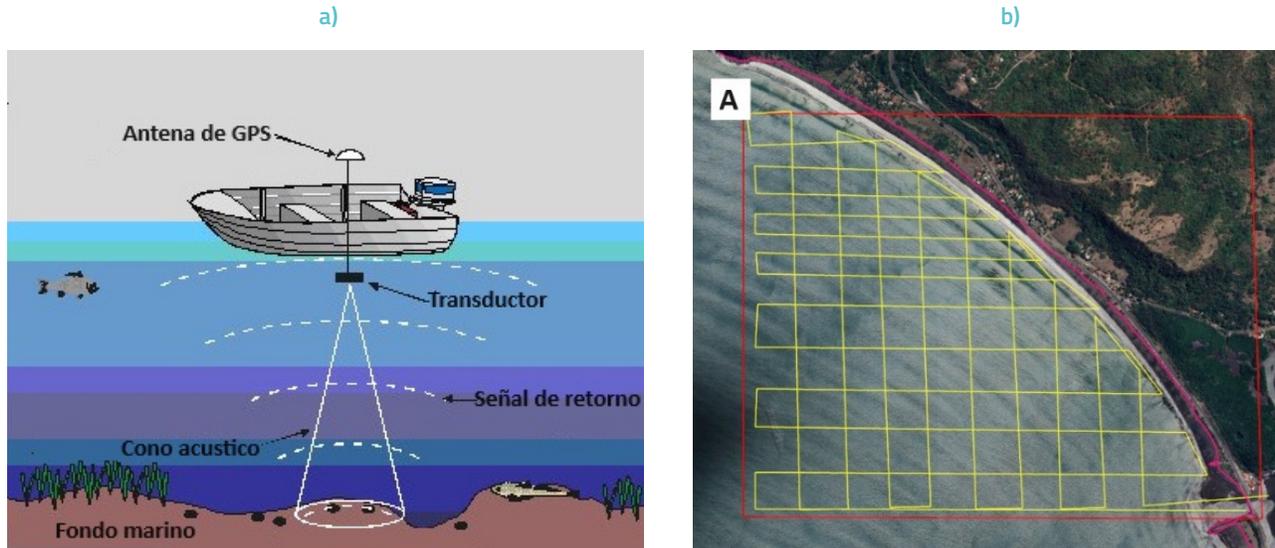
Por estas razones, es recomendable contratar a especialistas que realicen las mediciones y los ajustes necesarios para asegurar resultados precisos y relevantes en cada caso.

##### 3.2.1.1.1 Levantamiento batimétrico

La batimetría consiste en medir la profundidad del mar. En este caso, se realizó utilizando un ecosonda monohaz portátil montado en un bote que navegó por las áreas de interés (Figura 8a). Cada punto de profundidad registrado fue posteriormente corregido con los datos específicos de mareas del día, lo que asegura que los valores obtenidos se alineen con los niveles estándar empleados en cartas náuticas. Es crucial realizar estas mediciones durante la marea alta, ya que esto proporciona una referencia más precisa para estudios sobre inundaciones y escenarios de aumento del nivel del mar. La Figura 8b muestra la planificación de transectos en playa Caldera.

Los transectos se definen con criterio de experto en Google Earth y el resto del procedimiento se realiza con base en la Figura 9.

Figura 8 Ejemplo de cómo se implementa el levantamiento batimétrico.  
a) diagrama del equipo, b) planificación de transectos en Playa Caldera



Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 9 Esquema de cómo definir los transectos para el levantamiento batimétrico

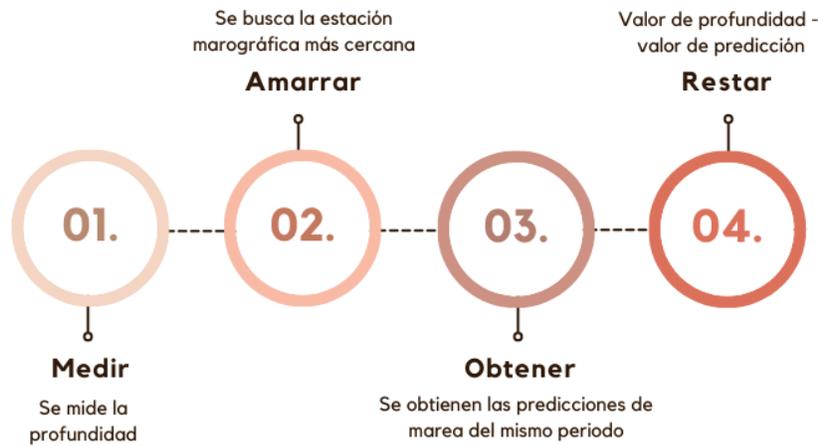


Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.1.1.2 Corrección de datos de profundidad

Las profundidades medidas se ajustan conforme a las predicciones de marea correspondientes al día y lugar del estudio, lo que garantiza que las mediciones reflejen con exactitud las condiciones del sitio. Para este ajuste, se utilizan valores promedio de mareas de sicigia, que son registros estandarizados que promedian las mareas bajas durante al menos veinte años (Lizano, 2006). Esta corrección es esencial para que los datos sean comparables con otras mediciones y con estándares internacionales (Figura 10).

Figura 10 Procedimiento para la corrección de datos de profundidad

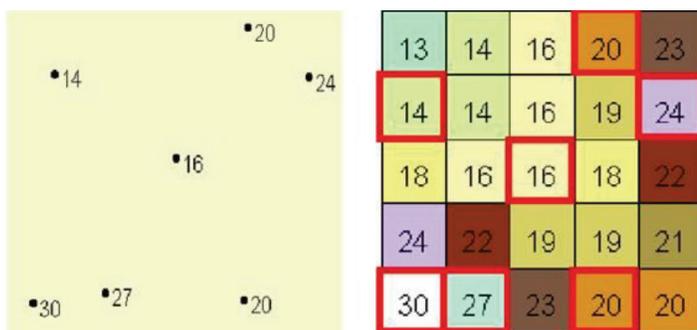


Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.1.1.3 Generación del modelo de elevación digital (MED)

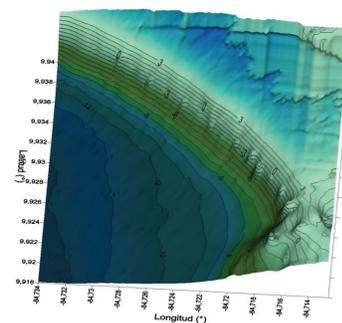
Una vez obtenidas las coordenadas de cada punto medido, que incluyen "X" (longitud), "Y" (latitud) y "Z" (profundidad), se interpolan estos valores utilizando software especializado como SURFER, ArcGIS, QGIS, entre otros. La Figura 11 muestra el proceso cómo se pasa de datos muestreados a completar una superficie. Este proceso consiste en rellenar con valores el área de estudio, ya sea por métodos matemáticos o estadísticos (Olaya, 2020). Como resultado se obtiene un modelo de elevación digital (MED) submarino, que proporciona una representación tridimensional de las profundidades. Este modelo es fundamental para el análisis detallado de las características del fondo marino y para la proyección de escenarios relacionados con el aumento del nivel del mar. La Figura 12 muestra el resultado del modelo digital en Caldera.

Figura 11 Esquema de interpolación.



Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 12 Modelo batimétrico en Caldera

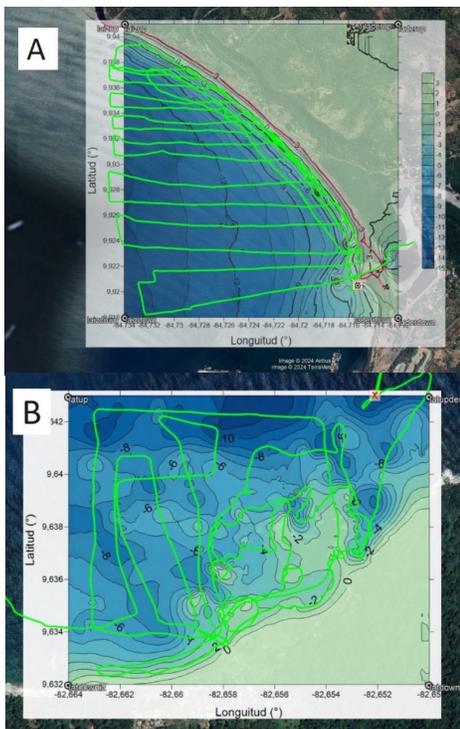


Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.1.1.4 Integración con datos topográficos

El modelo batimétrico se complementa con datos topográficos de la zona costera para crear un modelo de elevación más integral (Figura 13). Esta integración proporciona una visión completa tanto de las áreas submarinas como terrestres, lo cual es crucial para proyectar escenarios de riesgo ante el aumento del nivel del mar, evaluar zonas susceptibles a inundaciones y planificar medidas de mitigación.

Figura 14 Superposición de imágenes de batimetría interpoladas con el motor de Google Earth



a. Caldera, b. Manzanillo.  
Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 13 Unión del modelo topográfico con el batimétrico



Fuente: OpenAI (2024)

### 3.2.1.1.5 Previsualización y análisis en Google Earth

Para facilitar la visualización y comprensión de los resultados, las interpolaciones batimétricas y los transectos (líneas de muestreo) pueden superponerse sobre una imagen actualizada de Google Earth. Además, se pueden incluir elementos claves como la línea de costa, lo que mejora la representación visual y permite un análisis más claro del impacto del aumento del nivel del mar en cada área evaluada. La Figura 14 muestra el proceso de superposición, los transectos realizados en cada sitio con el bote, así como los respectivos transectos de muestreo de profundidades.

### 3.2.1.1.6 Análisis de las predicciones de mareas

Se debe utilizar predicciones diarias de mareas, que pueden ser obtenidas del programa WXTide32 (de acceso libre) a partir de estaciones mareográficas de referencia (Lizano, 2006), tanto en el Caribe (Limón), como en el Pacífico (Puntarenas). Estas predicciones permiten ajustar los valores batimétricos minuto a minuto a los promedios de mareas de sicigia, que representan el nivel "0" (cero) de las cartas náuticas para la navegación, calculado con mediciones de marea de al menos 20 años para cada sitio. Esta información también permite ajustar los valores topográficos a este mismo nivel y poder empatar la batimetría y la topografía en un MED para los análisis posteriores. Los valores promedio, marea alta promedio y marea máxima (Figura 15) fueron obtenidos de Lizano (2006); aunque también pueden obtenerse del programa Tidal and Currents (Figura 16; <http://svhorizon.com/wxtide32/wxthistory.html>) o WXTide32. La Tabla 3 muestra los valores de marea para ambos sitios de estudio.

Figura 15 Identificación de los tipos de mareas

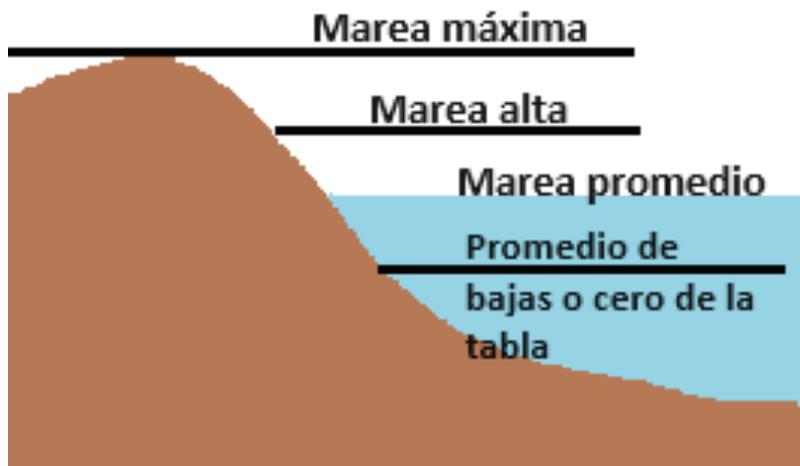
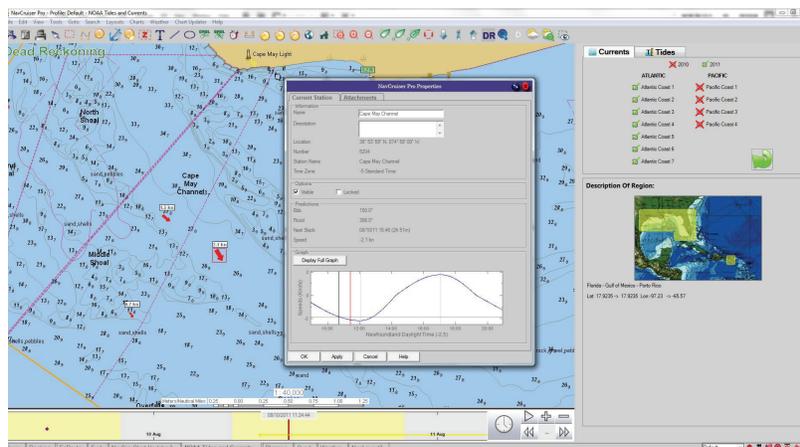


Figura 16 Vista del programa Tidal and Currents



Fuente: NavSIM Technology, 2024.

El *software* Tidal and Currents desempeña un papel crucial en la creación de escenarios relacionados con el aumento del nivel del mar, destacándose por su capacidad para simular condiciones oceánicas con gran precisión. Este tipo de tecnología permite modelar el comportamiento de las mareas y corrientes localmente, lo que es esencial dado que el aumento del nivel del mar no se distribuye de manera uniforme en todas las regiones. Al incorporar datos específicos sobre mareas y corrientes, el software facilita la generación de escenarios realistas que reflejan las condiciones locales.

Además, el *software* permite evaluar el impacto dinámico del aumento del nivel del mar en combinación con las mareas y corrientes. Esta interacción puede amplificar o mitigar los efectos en áreas costeras, lo que afectaría aspectos como la erosión, la inundación de tierras bajas y la alteración de ecosistemas. Ignorar estos factores podría resultar en un análisis incompleto que no capture adecuadamente la complejidad de los desafíos que enfrentan las comunidades costeras.

Un aspecto fundamental del *software* es su capacidad para identificar zonas de riesgo. Al analizar eventos de marea alta junto con

el aumento del nivel del mar y tormentas, Tidal and Currents ayuda a determinar cuáles son las áreas costeras más vulnerables a inundaciones. Esta información es vital para la planificación de la gestión costera y para proteger infraestructura crítica, pues garantiza que se tomen decisiones informadas para mitigar riesgos.

Finalmente, el *software* permite personalizar los modelos según las características geográficas específicas de cada región (Tabla 4). Las variaciones en geomorfología y oceanografía son significativas, y Tidal and Currents ofrece la flexibilidad necesaria para ajustar los modelos a estas variables. Este enfoque da como resultado proyecciones más precisas sobre el aumento del nivel del mar y sus efectos potenciales, lo cual es esencial para la planificación y toma de decisiones en comunidades costeras frente al cambio climático.

Tabla 4 Características de la marea

Parámetro	Caldera	Manzanillo
Marea promedio	1,40 m	0,15 m
Marea alta	2,80 m	0,36 m
Marea máxima	3,29 m	0,49 m

Datos propios

### 3.2.1.1.7 Caracterización del oleaje

Se recomienda la descarga de las series de características de oleaje dentro de las que destacan: la altura, período y dirección desde los servidores de la NOAA ([https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ww3\\_global.html](https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ww3_global.html)) (Lizano, 2007) para ambas regiones: Caribe y Pacífico Central de Costa Rica. Se recomienda el uso de series desde el año 2013 hasta junio del 2024, con resolución espacial de 0,25 grados y temporal a cada hora. Estas especificaciones son fundamentales para capturar variaciones espaciales y temporales que son críticas en el análisis de escenarios costeros. Una resolución espacial de 0,25 grados es adecuada para representar con precisión los patrones regionales de cambios en el nivel del mar y fenómenos climáticos como marejadas, tormentas y variaciones en las corrientes oceánicas. Además, contar con una resolución temporal horaria es esencial para identificar dinámicas costeras de corta duración, como los cambios en las mareas y oleajes. Estos factores tienen un impacto directo en las proyecciones de aumento del nivel del mar y la erosión.

Las series de tiempo utilizadas abarcan más de una década, lo que permite analizar tendencias a largo plazo, identificar patrones estacionales y detectar anomalías climáticas. Esto mejora la fiabilidad de los escenarios desarrollados y asegura que las medidas de mitigación y adaptación se fundamenten en datos robustos y actualizados.

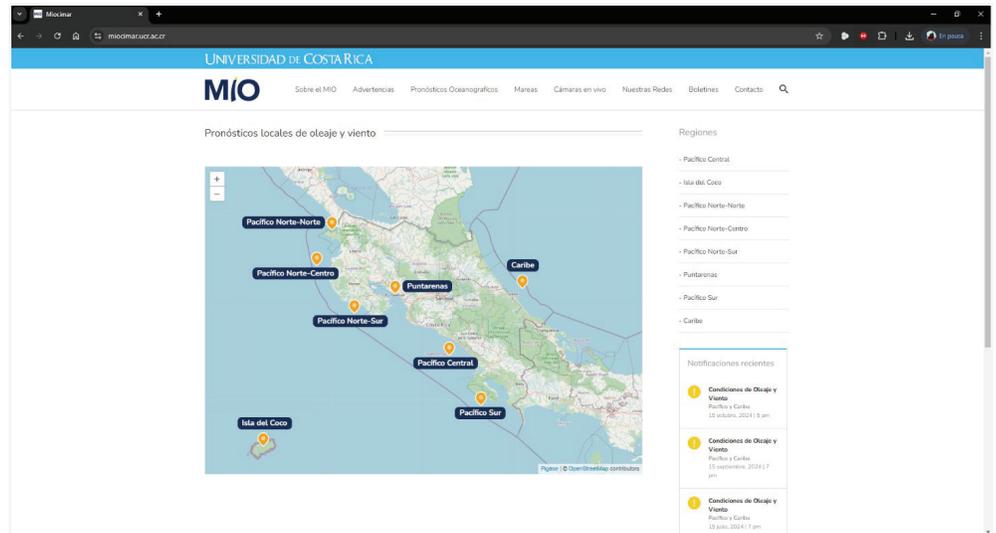
En el caso de Caldera, las series se filtraron para marejadas de fondo, datos que también están identificados en los servidores de la NOAA como:

- **sdir (swell direction, que es la dirección de propagación del oleaje):** Representa el rumbo desde el cual llegan las olas, medido en grados con relación al norte. Ayuda a entender la dinámica del oleaje y su influencia en áreas costeras.
- **sper (Swell Period, que es el período del oleaje):** Es el tiempo en segundos entre dos crestas consecutivas de una

ola. Este período es esencial para estimar la energía y el tipo de oleaje; períodos más largos suelen indicar oleajes provenientes de tormentas lejanas, mientras que períodos cortos suelen estar asociados a vientos locales.

- **shgt (Swell Height**, que es la altura del oleaje). Es la altura media de las olas que componen el oleaje, medida en metros, es fundamental para evaluar su impacto en la costa, para el análisis de erosión y zonas de riesgo.

Figura 17 Página web del MIO-CIMAR



Fuente: Datos propios, 2024.

Para el Caribe se bajaron los valores de altura significativa de oleaje (Thgt, que es el promedio de la tercera parte más alta de un registro de alturas de ola), su período (Tper, que es el tiempo que hay entre el paso de una cresta de ola y la sucesiva) y dirección (Tdir, la dirección con respecto al norte desde donde vienen las olas). A partir de estas series se obtuvo estadísticas como valores promedio, máximos, etc., que luego se utilizarían para definir otras variables oceanográficas utilizadas en los escenarios de nivel del mar, como el apilamiento del oleaje sobre la costa (Sw) descrito más adelante.

Se realizó un muestreo de la evidencia de oleajes utilizando videos disponibles a través de fuentes varias, como el MIO-CIMAR (<https://miocimar.ucr.ac.cr/>, ver Figura 17), otros medios digitales y redes sociales como Facebook, así como medios de prensa entre 2002 y 2024. En estos se pudo identificar un evento de oleaje que se saliera en la carretera, para así identificar y correlacionar con otros fenómenos superpuestos que expliquen este comportamiento, como mareas altas, fase del El Niño presente, aumento del nivel del mar, entre otros. La Tabla 5 muestra los parámetros del oleaje para Caldera y Manzanillo.

Tabla 5 Magnitudes de parámetros del oleaje al frente de Caldera

Parámetro	Caldera	Manzanillo
Hs (promedio)	2,2 m	2,77 m
Hmax	2,5 m	3,66 m
Tp (promedio)	16,9 seg	10,57 seg
Tp (máximo)	20,0 seg	12,01 seg
Hb	2,93 m	2,98 m
hb	4,84 m	5,10 m
Sw	0,73m	0,745m

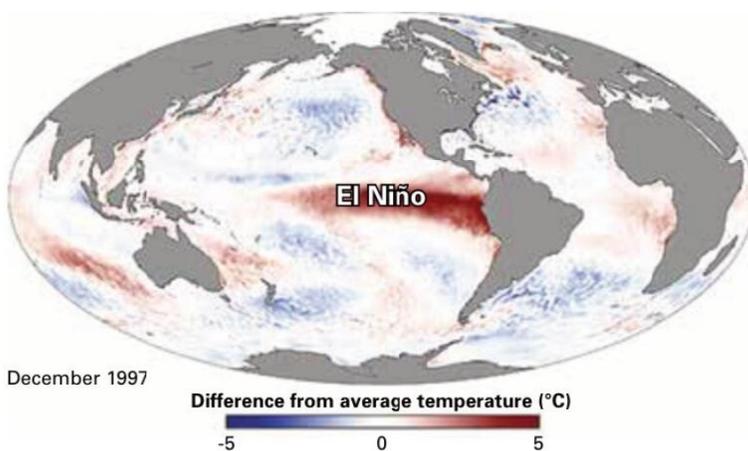
**Donde:**

- Hs (promedio):** altura de ola significativa promedio
- Hmax:** altura de la máxima
- Tp (promedio):** período de ola promedio
- Tp (máximo):** período de ola máximo
- Hb:** altura de ola al romper en la playa
- hb:** profundidad a la cual rompe la ola
- Sw:** apilamiento de agua de la ola sobre la playa

### 3.2.1.1.8 Incorporación del fenómeno ENOS

Para un estudio sobre el aumento del nivel del mar, es fundamental considerar los datos obtenidos durante la fase del fenómeno de ENOS, con especial atención durante la fase cálida: El Niño, como los registrados por Lizano (1997) en Quepos durante 1998 (Lizano y Salas, 2001). Este estudio documentó aumentos en el nivel del mar que variaron entre 0,30 m y 0,60 m. La inclusión de esta información es esencial, ya que El Niño genera variaciones significativas en el nivel del mar debido al calentamiento de las aguas oceánicas y a cambios en los patrones de precipitación. Estos datos permiten comprender mejor cómo fenómenos climáticos extremos pueden influir en el aumento del nivel del mar y ayudar a modelar escenarios futuros. Además, el análisis de estos eventos pasados ayuda a identificar tendencias y patrones cruciales para la planificación y adaptación ante los riesgos derivados de la VC y CGA. La Figura 18 muestra la anomalía en la temperatura superficial del océano Pacífico durante la fase cálida del ENOS en 1997.

Figura 18 Mapa de la anomalía en la temperatura superficial en el Océano Pacífico durante El Niño, 1997

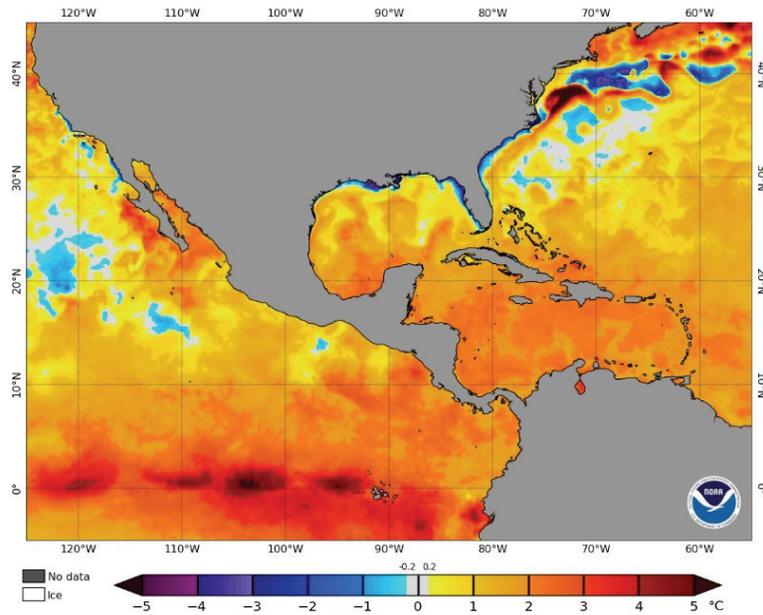


Fuente: NOAA Climate.gov

El valor de 0,30 m seleccionado es reforzado por los niveles del mar reportados en Ecuador para El Niño del 2023, donde se midieron 0,40 m como aumento adicional del mar debido a este fenómeno (Belliard et al. 2013). Como Costa Rica está más al norte del Ecuador geográfico y con anomalías de temperatura superficial del mar de alrededor de 1 °C menos que las registradas en Ecuador (alrededor de 4 °C), es razonable el valor que se ha seleccionado para nuestra región sea de 0,30 m para una fase del fenómeno de El Niño fuerte.

Para clasificar un evento del fenómeno de El Niño como moderado o fuerte, se utilizan diversas métricas clave; la más importante es el índice de temperatura superficial del mar (SST) en la región central y oriental del Pacífico ecuatorial. Un evento se considera que está ocurriendo cuando las anomalías de SST superan los 0,5 °C durante un período sostenido de al menos cinco meses consecutivos. Si estas anomalías oscilan entre 1,0 °C y 1,5 °C, el evento se clasifica como moderado. Un ejemplo de estas anomalías se puede apreciar en la Figura 19. En cambio, si las anomalías superan los 1,5 °C, se califica como fuerte. Además de la temperatura del océano, otros factores como el comportamiento de los vientos alisios y los patrones de precipitación también son relevantes para esta categorización.

Figura 19 Anomalía de la Temperatura Superficial del Mar



Fuente: NOAA Coral Reef Watch Daily

En cuanto a sus impactos, un fenómeno de El Niño moderado puede provocar alteraciones climáticas significativas, incluyendo sequías o lluvias intensas en diversas regiones del mundo. Sin embargo, estos efectos suelen ser menos severos en comparación con un fenómeno de El Niño fuerte, que tiene el potencial de desencadenar eventos climáticos extremos a gran escala. Los eventos fuertes están asociados con consecuencias más prolongadas y devastadoras, como sequías severas, inundaciones generalizadas y un impacto considerable en la agricultura, los recursos hídricos y los ecosistemas.

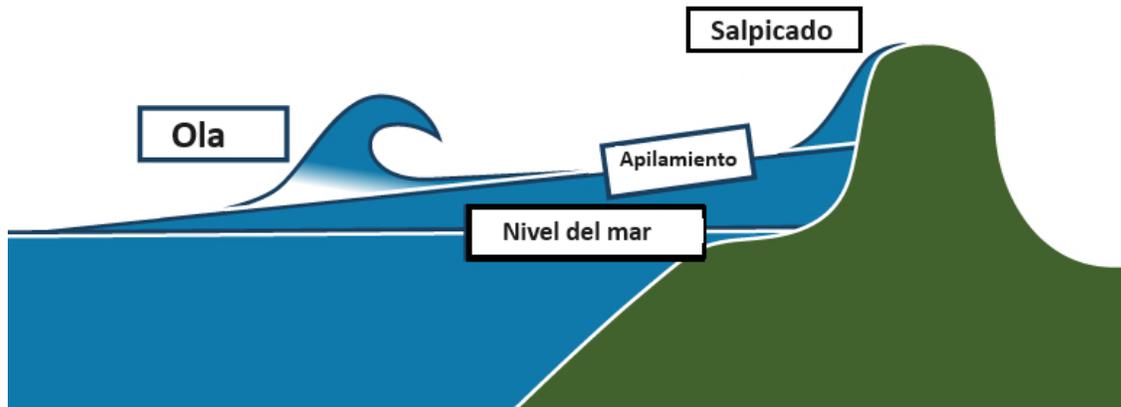
Esta clasificación es fundamental para que gobiernos y comunidades puedan prepararse adecuadamente y planificar medidas de adaptación, según la magnitud del evento. Al comprender la intensidad del fenómeno, se puede implementar estrategias más efectivas para mitigar sus efectos adversos y proteger a las poblaciones vulnerables.

### 3.2.1.1.9 Revisión del apilamiento del oleaje.

La importancia del apilamiento del oleaje en estudios sobre el aumento del nivel del mar radica en su capacidad para proporcionar una comprensión más precisa sobre cómo las condiciones climáticas y oceanográficas afectan las costas. El apilamiento de oleaje es un incremento temporal del nivel del mar provocado por el rompimiento de las olas, un fenómeno que puede intensificarse durante eventos climáticos extremos, como el fenómeno de El Niño (ver Figura 20). Este efecto puede resultar en aumentos significativos del nivel del mar, que oscilan entre 0,30 m y 0,60 m, como se documentó en estudios previos.

Incorporar el apilamiento del oleaje en los modelos de proyección permite simular escenarios más realistas de inundaciones costeras y evaluar los riesgos asociados. Dado que el apilamiento puede contribuir a la elevación del nivel del mar durante tormentas y marejadas, su consideración es esencial para la planificación costera y la gestión de riesgos. Además, al analizar cómo el oleaje interactúa con otros factores, como las mareas y el cambio climático, se pueden identificar áreas vulnerables y desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación ante los impactos del aumento del nivel del mar.

Figura 20 Diagrama de apilamiento del oleaje



Datos propios

Para el apilamiento (aumento de nivel del mar) de oleaje al romper sobre la costa se utilizó la siguiente ecuación:

$$Sw = \frac{5}{16} \gamma H_b Sw$$

Donde  $\gamma$  es un parámetro estimado de la razón entre la altura de la ola y la profundidad al romper (Hedges y Mase, 2004), que varía de entre 0,7 y 1,3; para el ejercicio de aplicación se utilizó 0,8 a partir del criterio de experto.  $H_b$  es la altura de la ola al romper en la costa, que es calculada con el programa en línea [swellbeat.com](https://swellbeat.com/wave-calculator/) (<https://swellbeat.com/wave-calculator/>). La Figura 21 muestra un ejemplo de la visualización de la página web utilizada y para calcular  $H_b$  se hace uso de las características estadísticas del oleaje para cada sitio.

Figura 21 Datos de entrada y salida del programa swellbeat.com para el caso de Caldera.

INPUTS		OUTPUTS
Significant Wave Height (m): 2.2	Calculatel	Breaking Wave Height = 2.94 m
Peak Wave Period (s): 16.9		Breaking Wave Angle of Incidence = -0.00 degrees
Water Depth (m): 50		Breaking Water Depth = 4.84 m
Angle of Incidence (degrees): 0		Iribarren Number = 0.11
Sediment type: Fine Sand		Breaking Type = Spilling

### 3.2.1.1.10 Consideraciones previas para el levantamiento de campo

Antes de comenzar el proceso de modelación, fue necesario realizar una búsqueda exhaustiva de información especial disponible en el área de estudio. Un valioso insumo es el levantamiento de datos LiDAR realizado por la CNE en 2012 y 2016, que abarca las zonas del Pacífico y el Caribe de Costa Rica.

Sin embargo, es recomendable revisar cuidadosamente la nube de puntos, ya que en algunas áreas hasta el 90 % de los datos pueden no estar clasificados. Por lo tanto, se debe ajustar la clasificación para obtener datos precisos del terreno, que son fundamentales para las etapas posteriores del proceso. Si no se dispone de estos datos, se sugiere considerar la contratación de un vuelo LiDAR que garantice una clasificación de datos superior o igual al 90 % de la nube de puntos. Esto facilitará la segregación efectiva de los puntos correspondientes al terreno, lo cual asegurará la precisión requerida para el análisis a realizar posteriormente.

En cuanto a los entregables de esa contratación de captura de imágenes LiDAR, se sugiere lo siguiente:

1. Solicitar una densidad de puntos LiDAR de entre 5 a 15 m<sup>2</sup>.
2. Solicitar la nube de puntos clasificada para conocer cuántos puntos corresponden al terreno (se recomienda que la clasificación se realice de acuerdo con los valores indicados por la ASPRS).
3. Solicitar fotografías aéreas tomadas para el área de trabajo con una precisión de 50 cm o inferior.

Es importante indicar que la categoría de no clasificados y creados nunca debe superar el 10 %, un ejemplo de lo anterior se muestra en la Tabla 6.

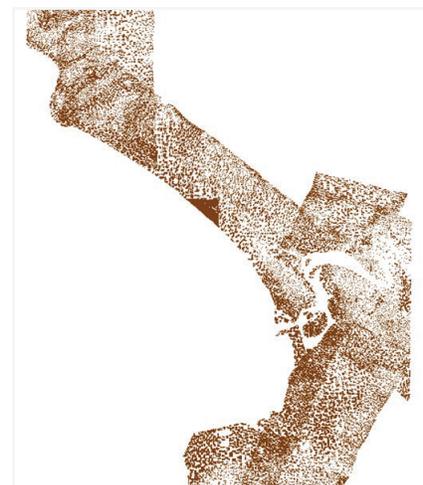
Visualmente, la nube de terreno debe contener valores para todos los sitios del área de interés de forma consistente, un ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 22.

Tabla 6 Clasificación datos LiDAR para la zona de Caldera

Valor	Clasificación	Conteo de Puntos	%
1	No clasificado	90179	0.31
2	Suelo	3050496	10.42
4	Vegetación media	25055053	85.57
6	Edificios	339022	1.16
7	Puntos bajos (ruido)	321	0
8	Puntos de masa	4032	0.01

Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 22 Densidad de la nube de puntos clasificados a terreno en la zona de Caldera



Fuente: Datos propios, 2024.

Otra alternativa es utilizar equipos VANTs equipados con sensores LiDAR de 3 o 5 pulsos, como los modelos DJI L1 o L2 (ver características técnicas en la Tabla 7). Estos equipos permiten la recolección, ajuste y corrección de datos a nivel del terreno, y utiliza alturas ortométricas o ajustadas a la altura elipsoidal CR05-WGS84, o el modelo geoidal EGM2008.

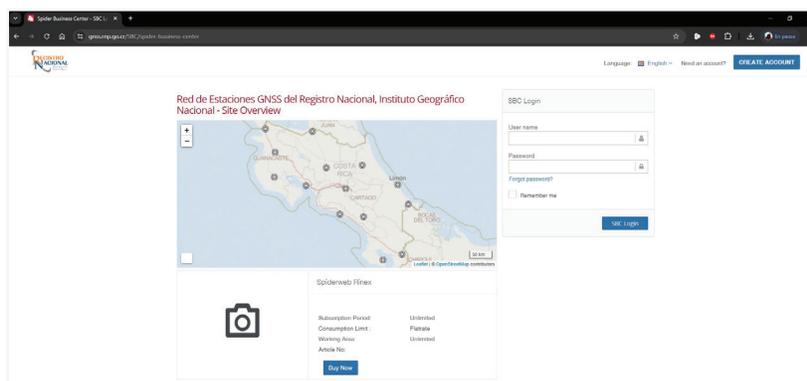
Tabla 7 Características generales modulo LiDAR

Características	Zemumse L1	Zemumse L2
<b>Precisión</b>	Precisión vertical 5 cm Precisión horizontal 10 cm (La altitud relativa de la misión es de 50 metros y la velocidad de vuelo es de 10 metros. m/s)	Precisión vertical 4 cm Precisión horizontal 5 cm (La altitud relativa de la misión es de 150 m y la velocidad de vuelo es de 15 m/s)
<b>Eficiencia</b>	El área operativa de una sola misión puede ser de hasta 2 km2	El área operativa de una sola misión puede alcanzar los 2,5 km2
<b>Retornos</b>	Admite 3 retornos	Admite 5 retornos
<b>IMU</b>	Calentar durante 5- 10 minutos antes del despegue	No es necesario calentar antes del despegue
<b>Visualización en tiempo real</b>	Visualiza y mide nubes de puntos en tiempo real	Ofrece tres modos de visualización (RGB, nube de puntos y nube de puntos paralela/RGB) en tiempo real.

Fuente: Datos propios, 2024.

Adicionalmente, para realizar las correcciones de los datos y referirlos al 0 de la tabla de mareas, se necesita un equipo que permita la corrección diferencial de datos con una precisión milimétrica o menor a 25 cm (en X, Y y Z). Se recomienda que la empresa a cargo genere las correcciones GNSS a través del portal del Registro Nacional (<https://gnss.rnp.go.cr/SBC/spider-business-center>, ver Figura 23).

Figura 23 Red de estaciones GNSS registro nacional para realizar la corrección diferencial



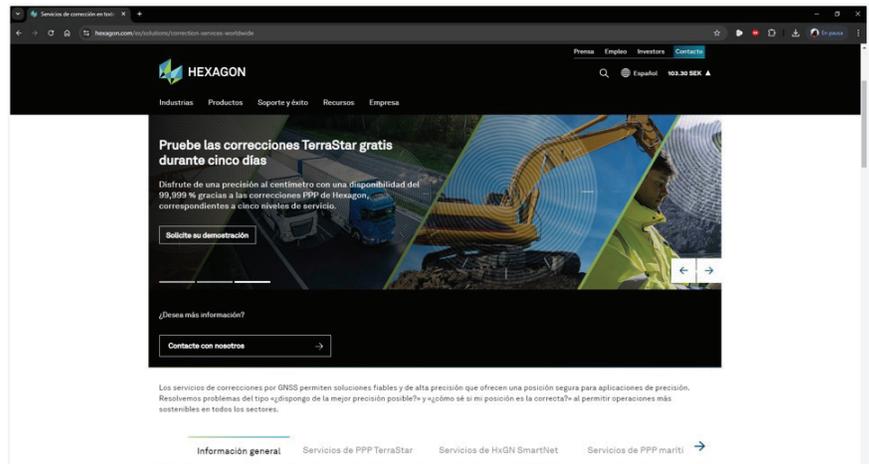
Fuente: Datos propios, 2024.

Otro sistema que se puede utilizar en el país sería las estaciones de referencia virtual (VRS) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Sin embargo, se aclara que es un servicio de pago, donde deben contactar con el área de Estudios Básicos de Ingeniería y el área de Topografía de dicha institución.

En el ámbito mundial o de la región, existen otras alternativas como el servicio de corrección mundial de la compañía Hexagon - TerraStar con opción de puntos de procesamiento preciso PPP o en tiempo real (Real Time Kinetic) (ver Figura 24).

Adicionalmente, se sugiere trabajar con formato Rinex 3.0 y realizar observaciones cada 5 o 10 segundos, para asegurar la calidad de los datos obtenidos. A continuación, la Tabla 8 detalla las características generales necesarias para realizar la medición, al proporcionar una referencia de especificaciones para lograr la precisión requerida.

Figura 24 Corrección mundial de datos compañía Hexagon



Datos propios

Tabla 8 Características necesarias del colector de datos GNSS

**Precisión del receptor (rms)\*\***

- RTK Hz 8 mm ± 1 ppm
- V 15 mm ± 1 ppm
- Red RTK Hz 8 mm ± 0,5 ppm
- V 15 mm ± 0,5 ppm
- Estático Hz 3 mm ± 0,5 ppm
- V 5 mm ± 0,5 ppm
- Estático - largo Hz 3 mm ± 0,1 ppm
- V 3,5 mm ± 0,4 ppm
- TerraStar C Pro
- PPP
- Hz < 2,5 cm
- V < 5 cm

**Especificaciones Receptor**

- Función Q-Lock ProTM Baja emisión de ruidos y mitigación
- Multicanal avanzada para una mayor fiabilidad
- Fiabilidad 99,99 %
- Motor de medición NovAtel OEM7, 555 canales, multifrecuencia / -constelación
- Seguimiento GPS L1, L2, L2C, L5
- Seguimiento GLONASS L1, L2, L2C, L3\*
- Seguimiento BeiDou B1, B2, B3\* (opcional)
- Seguimiento Galileo E1, E5a, E5b, AltBOC, E6\* (opcional)
- Seguimiento OZSS L1, L2C, L5, L6\* (opcional)
- NavIC L5\*
- Tasa de posicionamiento 5 Hz, 20 Hz (opcional)
- SBAS EGNOS, WAAS, MSAS, GAGAN
- Posicionamiento Preciso de Puntos (PPP)
- TerraStar C Pro; GPS/ GLONASS/ BeiDou/ Galileo/ QZSS

Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.1.1.11 Mediciones de campo

Costa Rica carece de un modelo geoidal actualizado, lo que implica que las mediciones sobre el nivel medio del mar generalmente se basan en datos de la década de 1960 y no se ajustan a la necesidad actual (referidas al mareógrafo de Puntarenas en la época mencionada). Para esta razón, se recomienda llevar los puntos de elevación a un nivel 0 basado en la tabla de mareas.

Para obtener las mareas por minuto y conocer el valor 0 de marea, un especialista en oceanografía proporciona la información respectiva sobre el día, hora y minutos en que ocurre este evento. Posteriormente, se debe contar con equipo receptor GNSS doble frecuencia, con al menos 555 canales o más (de acuerdo con las características indicadas anteriormente) que permita realizar la medición de las elevaciones sobre el elipsoide CR05-WGS84, el Geoide EGM2008, o ya sea que permita obtener la altura ortométrica (según el procesamiento de los datos) y de acuerdo con la marea 0 definida para cada playa.

La medición debe realizarse sobre un espejo de agua calmo, donde no haya oscilaciones causadas por el oleaje. En el caso de Caldera, se recomienda realizar la medición hacia el sector de Punta Carballo, como se muestra en la Figura 25; mientras que, para Manzanillo, en la zona de la entrada al refugio. Sin embargo, esto podría variar si se realiza sobre otras áreas costeras, dónde el profesional encargado debe conocer el sitio adecuado para realizar la medición.

Se debe contar con la información de un hito conocido (red CRTM05), que cuente con la información X, Y y Z, para realizar una medición con la estación GNSS que permita amarrar y actualizar las elevaciones en función del modelo definido. La toma tarda entre 10 y 15 minutos, aunque el tiempo depende del equipo utilizado para la obtención de las alturas (elipsoidal, geoidal u ortométrica). El valor generado permite calcular la diferencia que se debe aplicar sobre el resto de las elevaciones para referirlas al nivel 0 de la tabla de mareas. Para comprender mejor este proceso, se agrega la explicación de tres conceptos claves en la Tabla 9.

Figura 25 Sitio propuesto para realizar la medición marea 0 en Caldera



Fuente: Datos propios, 2024.

Tabla 9 Conceptos clave para la medición de nivel del mar

Concepto	Explicación
<b>Geoide</b>	El geoide es una superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre que, en promedio, coincide con el nivel medio del mar y se extiende bajo los continentes. Representa una referencia teórica que sigue las irregularidades del campo gravitacional de la Tierra, lo que lo hace más preciso que una esfera perfecta o un elipsoide. Su importancia radica en la geodesia, donde se utiliza para medir altitudes de manera precisa en relación con el nivel del mar, facilitando así estudios y aplicaciones en diversas disciplinas.
<b>Elipsoide</b>	Por otro lado, el elipsoide es una figura geométrica que aproxima la forma de la Tierra y se emplea como modelo matemático en geodesia. Se obtiene al rotar una elipse alrededor de su eje menor, creando una superficie lisa y regular. A diferencia del geoide, el elipsoide no considera las variaciones del campo gravitacional terrestre. Su utilidad se manifiesta en la cartografía y en sistemas de coordenadas globales, como el WGS84, que es ampliamente utilizado en tecnología GPS.
<b>Altura ortométrica</b>	La altura ortométrica se define como la distancia vertical entre un punto en la superficie terrestre y el geoide. Esta medida representa la altura "real" sobre el nivel medio del mar y es esencial en aplicaciones geodésicas para determinar altitudes precisas. Se utiliza especialmente en estudios de ingeniería, topografía y planificación urbana. A diferencia de la altura elipsoidal, que se mide desde un elipsoide de referencia, la altura ortométrica tiene en cuenta las influencias del campo gravitacional y las variaciones del terreno.

Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.1.2 Procesamiento de datos

#### 3.2.1.2.1 Unificación de niveles de referencia

Los datos LiDAR entregados deben estar en el sistema de proyección adecuado. Esto implica transformar los datos al sistema de proyección CRTM05 con el datum CR05-WGS84 o el modelo geoidal EGM2008. Es relevante verificar que los datos sean entregados en unidades métricas, ya que esto es esencial para generar análisis y modelos precisos del terreno.

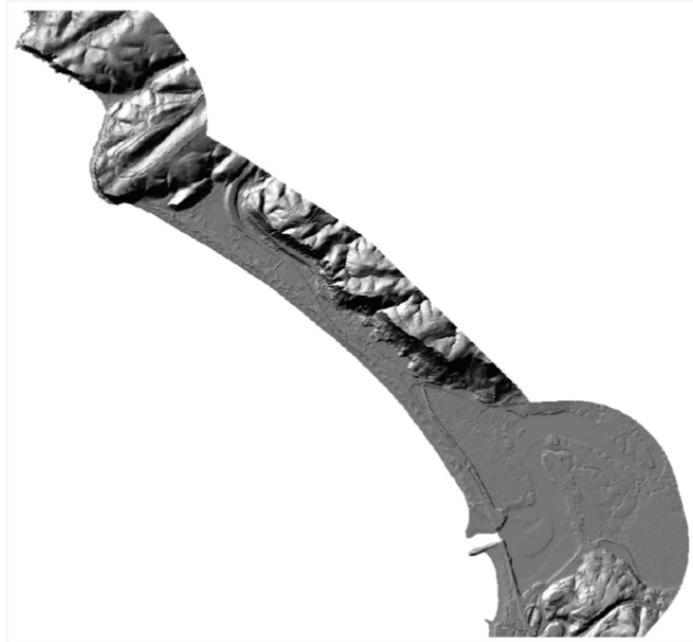
#### 3.2.1.2.2 Generación del modelo de elevación digital (MED)

Los modelos de elevación deben generarse utilizando técnicas avanzadas, como interpoladores de Vecino Natural o Kriging Universal, que permiten mostrar detalles precisos del terreno, especialmente en zonas costeras.

El MED debe tener una resolución mínima de al menos 50 cm, lo cual es adecuado para generar escenarios precisos de aumento del nivel del mar, a escalas de 1:500 o 1:1000. Estas escalas permiten capturar con gran precisión las características geomorfológicas y topográficas del terreno, lo cual es fundamental en las áreas costeras. Un nivel de resolución tan detallado es esencial para modelar de forma efectiva los impactos del aumento del nivel del mar, la erosión costera y otros fenómenos relacionados. Esto proporciona información clave para la planificación y gestión del territorio en estos espacios.

Adicionalmente, la alta exactitud de un MED a estas escalas facilita la identificación de vulnerabilidades específicas, como las zonas propensas a inundaciones. Esto es crucial para la toma de decisiones informadas en el desarrollo de políticas de adaptación y mitigación frente al cambio climático. El resultado esperado se puede comprobar mediante el MED generado y el modelo de sombras, como se aprecia en la Figura 26.

Figura 26 Modelo de Sombras generado para Caldera



Fuente: Datos propios, 2024.

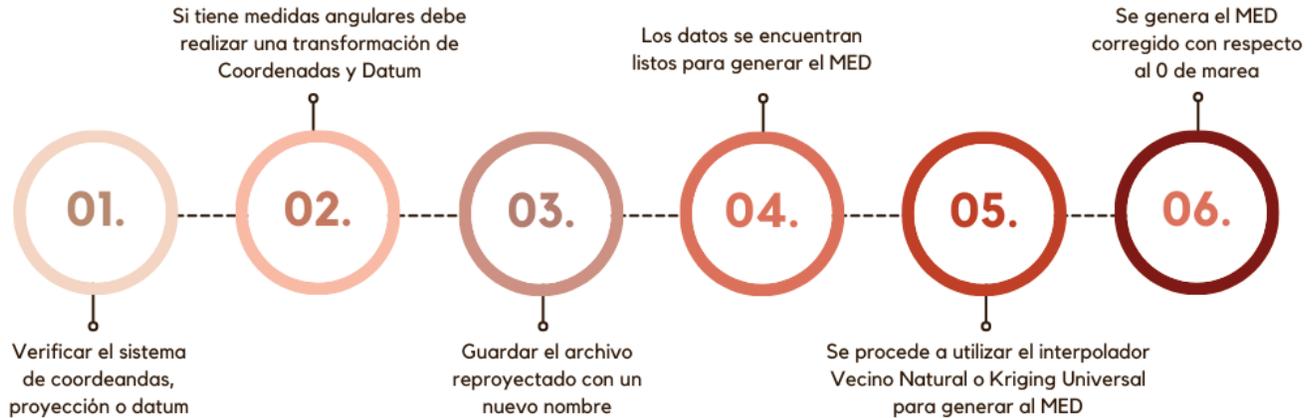
La creación de un modelo de sombras es una herramienta fundamental para evaluar la precisión de un MED al desarrollar escenarios relacionados con el aumento del nivel del mar. Este modelo simula la proyección de las sombras sobre el terreno, teniendo en cuenta la elevación y la posición del sol, lo que permite detectar posibles inconsistencias o errores en la representación topográfica, como irregularidades en la representación de datos que no corresponden a las verdaderas características del terreno o deformaciones en el relieve.

Dado que los escenarios de aumento del nivel del mar requieren una precisión centimétrica o milimétrica en la representación del terreno costero, el modelo de sombras contribuye a garantizar que el MED refleje con exactitud la geomorfología. Esto es crucial para delimitar correctamente las áreas vulnerables a inundaciones o erosión.

Esta validación es esencial para generar escenarios confiables que respalden decisiones críticas en la planificación costera y la gestión de riesgos. Al asegurar la precisión del MED, se promueve una mejor preparación ante los desafíos que presenta el cambio climático.

Se debe confirmar que se utilizarán herramientas reconocidas de SIG como ArcGIS o QGIS para llevar a cabo las transformaciones de sistemas de coordenadas y la generación del MED, garantizando la calidad y precisión del trabajo. Lo anterior se resume en la Figura 27.

Figura 27 Pasos de la etapa 2 para la generación del MED



Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.1.3 Generación de productos

#### 3.2.1.3.1 Proyecciones del nivel del mar:

Solicitar que el contratista utilice los valores generados por el IPCC a partir del escenario moderado SSP3-7.0 del sexto informe, que proyecta el aumento del nivel del mar para los años 2030, 2050, 2070 y 2100. Asegurarse de que se integren otras variables importantes como las mareas máximas y extraordinarias, el apilamiento del oleaje (incremento promedio de 30 cm) y el fenómeno de ENOS (incremento promedio de 30 cm en el nivel del mar).

Solicitar una tabla resumen que presente estos datos para facilitar la visualización y análisis de las proyecciones a futuro. Un ejemplo de esto es lo mostrado en la Tabla 10 cuyos valores son los generados para crear los escenarios en Manzanillo y Caldera.

Tabla 10 Combinaciones seleccionadas para generar los escenarios de inundación.

Valor	Marea (m)	Apilamiento (m)	Aumento del nivel del mar por Cambio Climático (m)	Marea + Niño + Apilamiento + Aumento (m)
2030	1,4	0,73	0,11	2,54
2030	2,8	0,73	0,11	3,94
2030	3,29	0,73	0,11	4,43
2050	1,4	0,73	0,24	2,67
2050	2,8	0,73	0,24	4,07
2050	3,29	0,73	0,24	4,56
2070	1,4	0,73	0,41	2,84
2070	2,8	0,73	0,41	4,24
2070	3,29	0,73	0,41	4,73
2100	1,4	0,73	0,75	3,18
2100	2,8	0,73	0,75	4,58
2100	3,29	0,73	0,75	5,07

Fuente: Estos escenarios incluyen un aumento del nivel del mar por ENOS de 0,30 cm en una fase moderada, así como otros 0,73 m por apilamiento del oleaje. Fuente: Elaboración propia, 2024.

Estos valores cambian en función de las áreas geográficas, por lo que se requiere contar con un experto para definir adecuadamente las combinaciones y niveles de marea.

### 3.2.1.3.2 Generación de superficies

Verificar que se utilicen modelos reconocidos como los propuestos por Lizano (2010, 2020, 2023) y Balstrøm (2024) u otros que permitan representar el comportamiento del oleaje y generar escenarios de aumento del nivel del mar.

Se debe incluir un archivo ráster constante que represente las mareas máximas y extraordinarias para cada playa de la zona de estudio, por lo que es necesario contar con un profesional en oceanografía que determine estos valores específicos por área geográfica. Se debe sumar otras variables como el apilamiento del oleaje y el fenómeno de ENOS para obtener una representación completa de los cambios en el nivel del mar.

### 3.2.1.3.3 Medición del oleaje

Solicitar la creación de una capa de oleaje que represente hasta dónde se propaga una ola con altura de tres metros y un período de 7 a 10 segundos. Esta medición puede realizarse en campo o a partir de fotografías aéreas de eventos reales, y se debe generar un polígono que cubra la extensión máxima de la propagación de la ola en las zonas costeras. Si no existiese la información, se puede generar a partir del criterio del especialista en la materia; en este caso, el profesional en el campo de la oceanografía. Un ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 28.

Figura 28 Extensión oleaje Caldera



Fuente: Datos propios, 2024.

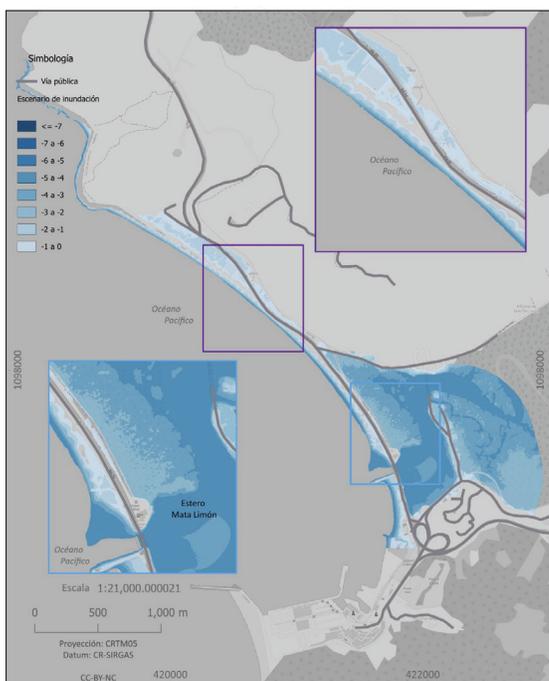
### 3.2.1.3.4 Generación de escenarios

Solicitar que se utilice un MED corregido, referenciado al nivel 0 (cero) de marea. Esta corrección es crucial para que los escenarios de inundación sean precisos.

Verificar que las proyecciones utilizadas para la superficie constante provengan de la tabla resumen generada para tal fin y que esté basado en las proyecciones del nivel del mar (como las generadas con el IPCC, el apilamiento del oleaje y el fenómeno de ENOS). Esto permitirá obtener como productos los escenarios ante el aumento del nivel del mar y conocer cómo se comporta la marea en su estado normal, extraordinario y comenzar a trabajar los niveles anteriores.

### 3.2.1.3.5 Generación de superficies

**Figura 29 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 3,94 m proyectado al 2030 en Caldera**



Datos propios

**Tabla 11 Valores de la reclasificación a realizar de la resta de superficies para las áreas del Pacífico y Caribe Costarricense**

Zonificación ante el aumento del nivel del mar y otras variables	Valor	Valores de inundación (m)	
		Pacífico	Caribe
Muy alta	5	-5 a -4	-3 a -1
Alta	4	-4 a -2	-1 a 1,5
Moderada	3	-1 a 0	1,5 a 3
Baja	2	0 a 5	3 a 5
Muy baja	1	5 a más	5 a más

Fuente: Datos propios, 2024.

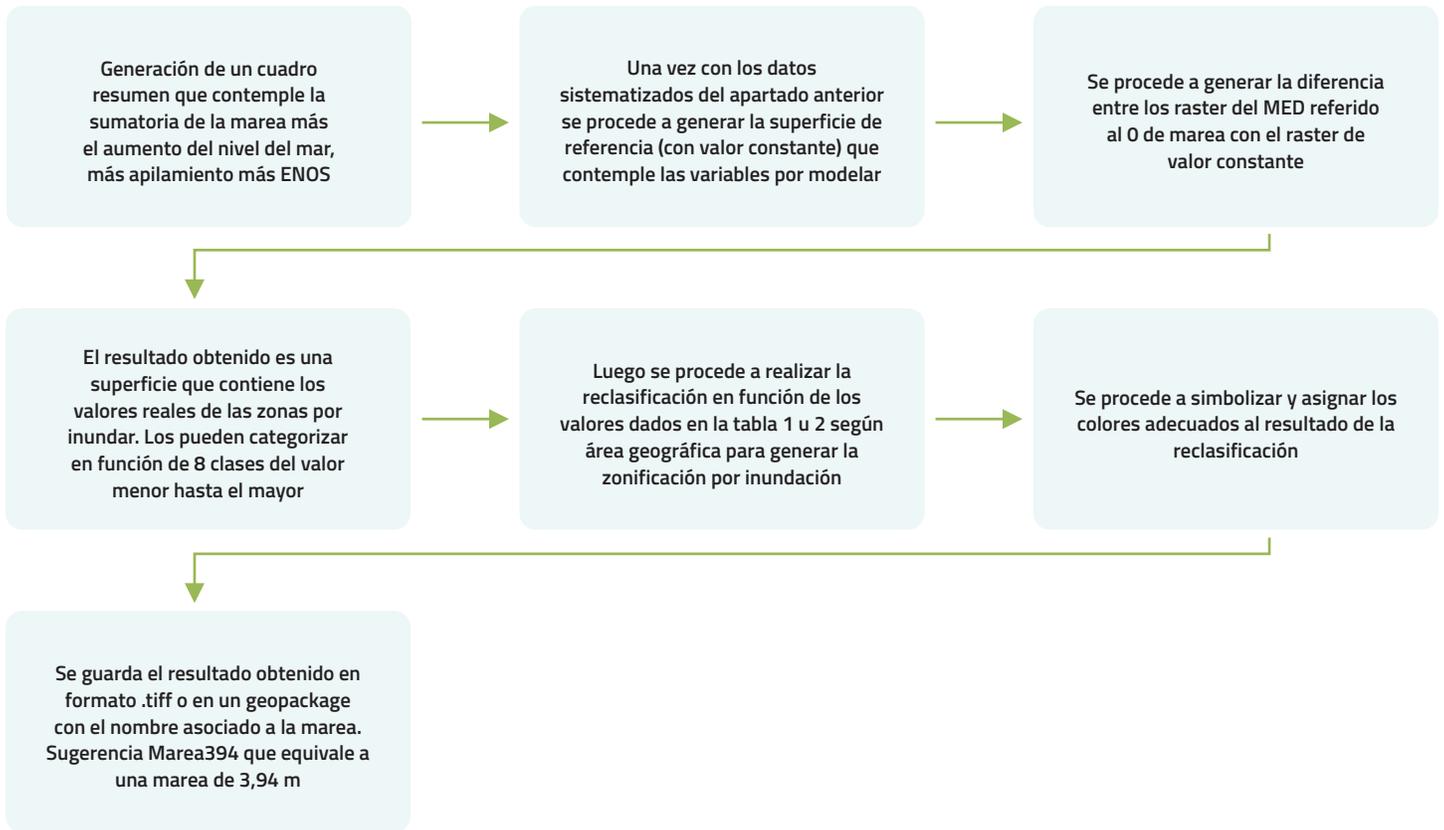
de inundación

El contratista debe utilizar software de información geográfica (como ArcGIS o QGIS) para restar la superficie constante de las proyecciones del nivel del mar al MED corregido. Esta operación genera una superficie que muestra las áreas afectadas por el aumento del nivel del mar; se recomienda para ello lo indicado en la Tabla 11, pues puede variar por nueva evidencia científica.

Es fundamental que la superficie resultante se reclasifique correctamente utilizando las tablas de referencia, ajustándolas según las características específicas de las playas y su geomorfología, para validar que las zonas de inundación proyectadas sean realistas y acordes con la topografía local. La Figura 29 muestra un ejemplo del impacto de una marea de 3,94 m para el año 2030 en toda su extensión e impacto de inundación. Esta representación facilita la sobreposición de otras capas para valorar el impacto y adoptar medidas, conforme a la legislación nacional vigente y aquella por su respectivo cantón.

Solicitar que los resultados se entreguen en formatos compatibles con SIG, como archivos ráster en formato \*.tiff o dentro de un geopackage, que permite almacenar datos ráster junto con otra información geográfica en un único archivo. Esto asegura la interoperabilidad de los datos y facilita su uso en análisis posteriores. El esquema resumen de esta parte es presentado en la Figura 30.

Figura 30 Flujo de trabajo para la generación de los escenarios de inundación



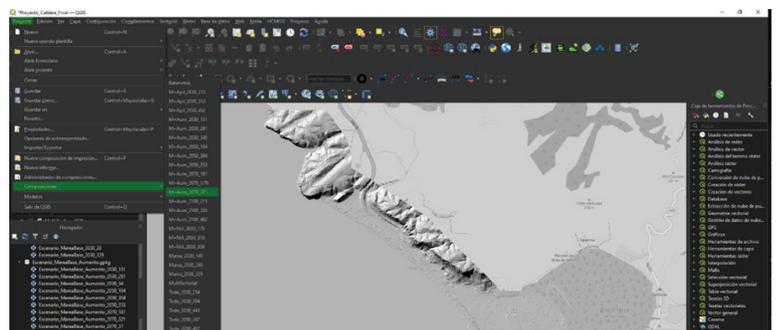
Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.1.4 Generación de productos finales

#### 3.2.1.4.1 Generación de mapas de inundación

Solicitar la elaboración de mapas que muestren las zonas de inundación por mareas representativas para cada playa, al usar las herramientas de diseño de mapas en ArcGIS (layout) o en la nueva composición de impresión en QGIS. Estos mapas son esenciales para la toma de decisiones en planificación urbana y ordenamiento territorial costero. Un ejemplo de cómo debería verse la composición en QGIS para su uso se ilustra en la Figura 31.

Figura 31 Proyecto con la composición de mapas en QGIS



Fuente: Datos propios, 2024.

Asegurarse de que las zonas de inundación se generen a partir de una reclasificación de los datos, utilizando como referencia las tablas indicadas (Tabla 10), pero ajustadas según las características específicas de la playa donde se aplique la metodología. Se recomienda contar con un experto en el tema para realizar el ajuste requerido.

Como resultado, se debería obtener la zonificación por inundación para el área de interés. En esta guía, como ejemplo la generada para la zona de Caldera, que en función a lo indicado en la Tabla 8 se procede a una reclasificación de datos para obtener aquellas áreas a inundación de forma moderada, alta y muy alta, como se aprecia en la Figura 32.

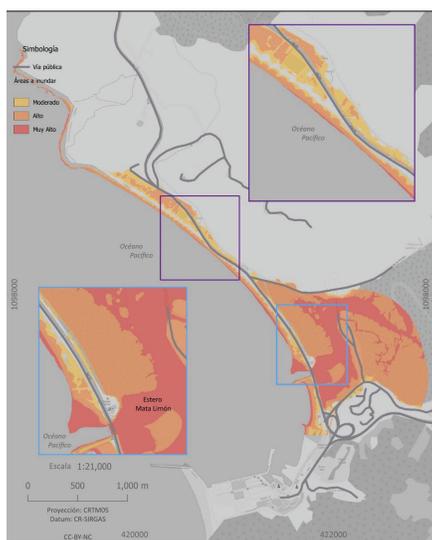
Con respecto a la coloración del mapa, se propone el uso de los colores del semáforo, acorde a lo indicado en la Tabla 12 con una transparencia de entre 40 y 60 %.

Tabla 12 Colores propuestos para los mapas de inundación

Valor	Categoría	Color propuesto	Hex
1	Muy Baja		#1a9641
2	Baja		#a6d96a
3	Moderada		#fcf600
4	Alta		#fdae61
5	Muy Alta		#d7191c

Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 32 Ejemplo del mapa de Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea de 4,43 m proyectada a 2030



Datos propios. CC-BY-NC

### 3.2.1.4.2 Obtención de curvas de Inundación - opcional

Pueden solicitar la extracción de curvas de nivel que representen áreas afectadas por la inundación en cada playa. Para ello, se deben usar herramientas especializadas como Curvas de Nivel en QGIS o Contornos (Contour) en ArcGIS.

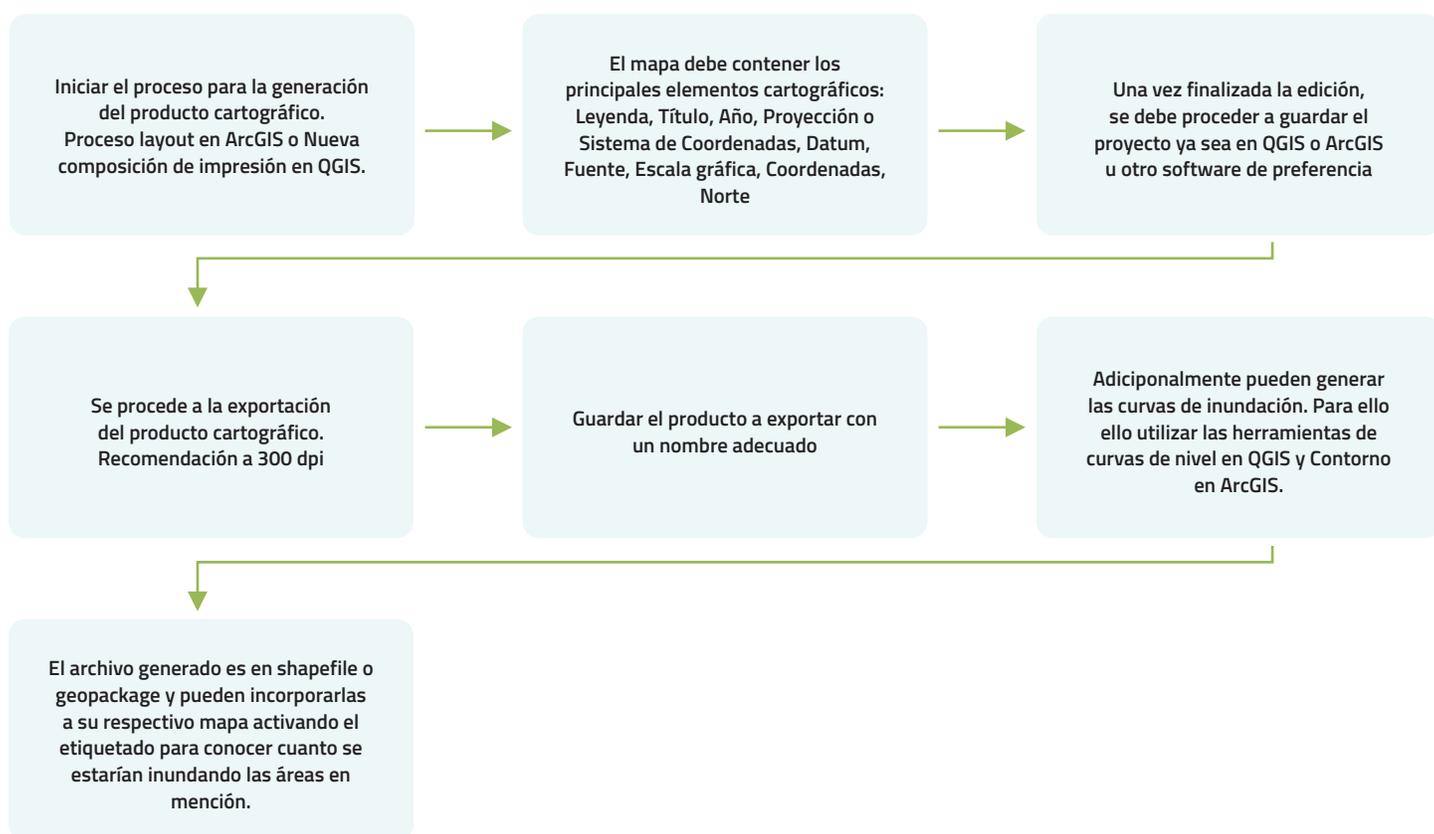
Las curvas de nivel deben estar definidas en intervalos de 5, 10, 20 o 25 cm de altura, lo que permitirá visualizar con precisión los distintos niveles de inundación proyectados. Esta información es útil para evaluar de forma detallada cómo impactarán las mareas y el aumento del nivel del mar en áreas específicas.

### 3.2.1.4.3 Formato de entrega

Los productos generados, como los mapas y las curvas de inundación, deben presentarse en formatos visuales que faciliten su interpretación, especialmente para los tomadores de decisiones. Estos pueden ser entregados en formatos de archivo compatibles con SIG, como geopackage o shapefiles, acompañados de imágenes en alta resolución para presentaciones y reportes.

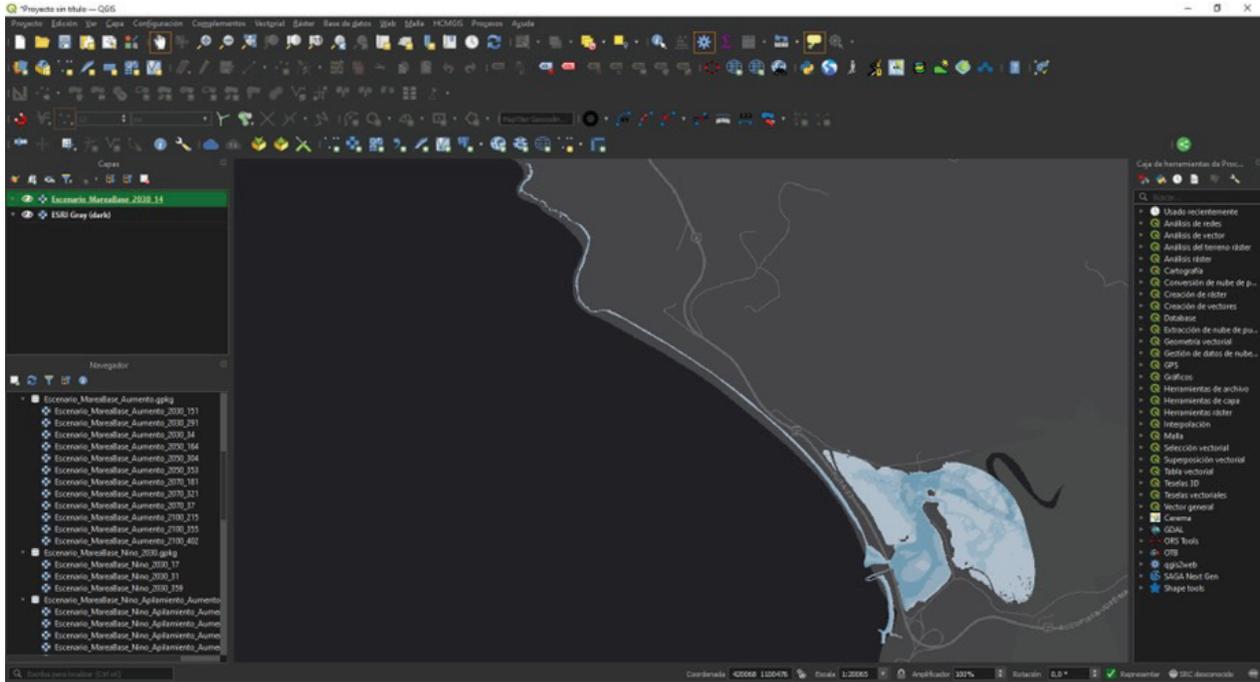
La Figura 33 muestra el proceso secuencial para obtener lo solicitado. Esto es una referencia. Lo que se desea es que puedan contar con los datos de forma estructurada para cada playa, en el formato SIG que permita la interoperabilidad de la información y su uso para la toma de decisiones a nivel institucional. Un ejemplo de cómo se vería estructurada la información en un formato Geopackage en QGIS se aprecia en la Figura 34.

Figura 33 Pasos de la etapa 4 para la generación de los productos cartográficos y extracción de las curvas de inundación



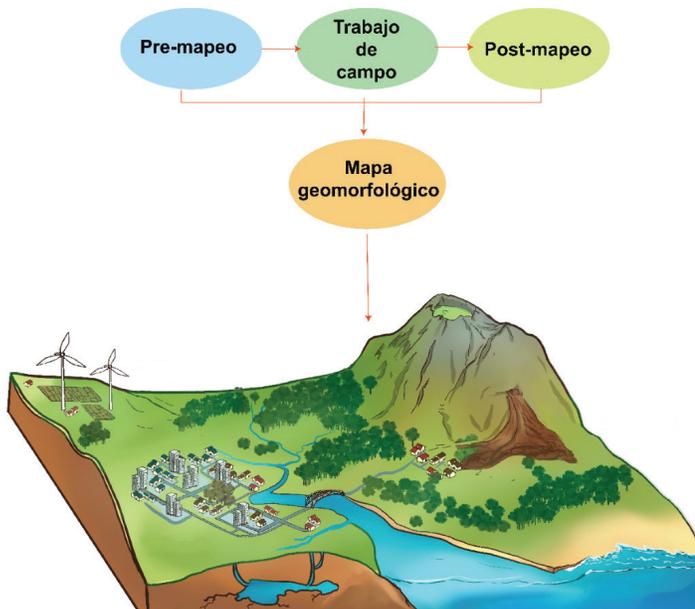
Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 34 Información estructurada en geopackage en QGIS



Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 35 Modelo esquemático de la cartografía geomorfológica.

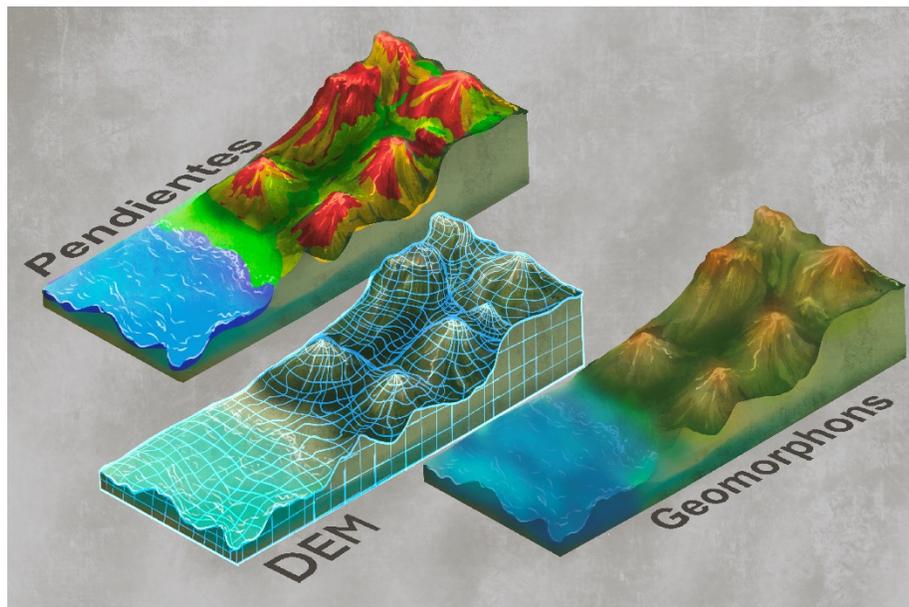


Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.2 Pasos para la generación de la cartografía geomorfológica costera

La cartografía geomorfológica es una herramienta crucial dentro de las ciencias de la tierra. Su importancia ha crecido notablemente en años recientes, debido a su capacidad para ofrecer una comprensión profunda de la superficie terrestre y de los procesos naturales que la configuran (Quesada-Román & Peralta-Reyes, 2023). La creación de mapas geomorfológicos sigue un proceso sistemático dividido en tres fases principales: premapeo, trabajo de campo y posmapeo (Figura 35), lo que asegura la precisión y utilidad de los mapas producidos (Smith et al., 2011).

Figura 36 Modelo de elevación digital (DEM), mapas de pendientes, y Geomorphons como insumos para realizar mapas geomorfológicos.



Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.2.1 Fase de premapeo

La etapa inicial de pre-mapeo implica la recopilación de datos topográficos detallados y la creación de un MED utilizando tecnologías como fotografías aéreas, imágenes satelitales, LiDAR y VANTSs (Figura 36). Estos datos permiten categorizar y mapear las formas del relieve, incluida una leyenda preliminar que distingue entre formaciones fluviales, costeras y procesos erosivos y deposicionales.

En la etapa inicial de premapeo, se utiliza tecnología avanzada como LiDAR (Light Detection and Ranging) y VANTs para obtener un MED detallado del área de estudio. Esto permite capturar con precisión las características topográficas del terreno. Basándose en esta información, se crea una leyenda preliminar utilizando una clasificación morfogenética, que categoriza las formas del relieve según su origen, y distingue entre formaciones fluviales y costeras, y entre procesos erosivos y deposicionales (Quesada-Román & Pérez-Briceño, 2019).

Cuando es posible, esta clasificación se amplía para incluir los primeros metros del relieve submarino mediante datos batimétricos. Herramientas como mapas altimétricos, de pendientes y Geomorphons (Jasiewicz & Stepinski, 2013) se emplean para cartografiar las diversas formas del terreno, considerando su morfología y dinámica. Los Geomorphons o geomorfones son una técnica para clasificar el relieve de un terreno en 10 formas geomorfológicas básicas, usando un MED. Esta clasificación se basa en patrones locales de topografía y pendiente. Especialmente en la última década, el uso de SIG con MEDs a alta resolución (menor a 5 metros) ha permitido el desarrollo de múltiples herramientas para agilizar el proceso de mapeo geomorfológico, tanto morfogenético como morfométrico. La descripción detallada de cada forma de relieve se basa en esta clasificación morfogenética inicial, al proporcionar una base sólida para el trabajo posterior.

#### 3.2.2.1.1 Tecnologías utilizadas

- **Imágenes satelitales:** Las imágenes satelitales son insumos muy importantes cuando se realiza cartografía geomorfológica costera en grandes extensiones, ya que su resolución normalmente no es menor a los 10 m, lo que dificulta detallar procesos

tanto diarios como mensuales o estacionales que suceden en las costas.

- **Fotografías aéreas:** Históricamente las fotografías aéreas han sido desde la Segunda Guerra Mundial un insumo vital para generar mapas geomorfológicos en todo el mundo. De hecho, lo siguen siendo para reconstrucciones históricas y entender mejor la evolución del relieve.
- **Mapas topográficos:** Muchos mapas base son a escalas 1:50 000 o 1:25 000, las cuales dependiendo del objetivo del mapa geomorfológico pueden servir para análisis regionales o iniciales de un territorio. Muchos mapas topográficos provienen de información basada en fotografías aéreas. VANTs: Facilitan la captura de imágenes aéreas detalladas y la generación de modelos tridimensionales. Se utiliza especialmente para áreas pequeñas como secciones de ríos, playas, carreteras, puentes o barrios.
- **LiDAR:** Permite la obtención de datos topográficos de alta precisión mediante el uso de láser. Esta tecnología se adapta por medio de una cámara en VANTs específicos.
- **DEM (Digital Elevation Model) o MDE (Modelo Digital de Elevación):** Representación digital del terreno que es fundamental para el análisis geomorfológico. Normalmente provienen de nubes de miles o hasta millones de puntos, o bien de curvas de nivel generando un archivo ráster que distribuye los valores de elevación en X, Y y Z. En la actualidad estos son los insumos de base para muchos productos cartográficos y se generan a partir de las fotos aéreas, imágenes satelitales, o vuelo de VANTs.
- **Datos batimétricos:** Información detallada del relieve submarino que complementa el análisis de las zonas costeras. Estos valores se levantan con una sonda que toma los valores de profundidad del suelo marino desde una lancha o barco.

#### 3.2.2.1.2 Clasificación morfogenética

- **Formas de relieve fluviales:** Relacionadas con la acción de los ríos y corrientes de agua. Entre ellas destacan formas como valles, fondos de río, laderas de valles, terrazas aluviales, o bien formas que han sido modeladas por el agua como cerros, laderas u otros.
- **Formas de relieve costeras:** Resultantes de la interacción entre el océano y la tierra. De esta interacción también hay que sumarle la relación entre olas, mareas y sedimentos que llegan de los ríos, o bien producto de la misma erosión de las playas. Entre ellas, playas, plataformas de abrasión, salientes rocosas, islas, acantilados, entre otras.
- **Procesos erosivos:** Incluyen la acción de factores como el viento, el agua y el hielo. Además, de las alteraciones del ser humano a las formas originales de relieve. Incluyen el arranque de los materiales y su transporte.
- **Procesos deposicionales o acumulativos:** Reflejan la acumulación de sedimentos transportados por diversos agentes como el agua o el viento, o bien la gravedad.

#### 3.2.2.2 Fase de trabajo de campo

Durante la fase de trabajo de campo, se validan y ajustan los datos obtenidos en la fase de premapeo. Es crucial realizar inspecciones directas en el terreno utilizando herramientas como GNSS, VANTs y cámaras digitales para documentar las características geomorfológicas del área de estudio (Figura 37).

La fase de trabajo de campo es crucial para validar y ajustar los datos obtenidos durante el premapeo. Durante esta etapa, se realizan inspecciones directas en el terreno para confirmar y, si es necesario, redefinir los límites y procesos geomorfológicos identificados previamente (Acuña-Piedra & Quesada-Román, 2021).

Figura 37 Fotografía que evidencia los procesos erosivos en playa Caldera, Esparza



En dicha zona también se usaron tecnologías como los drones para el levantamiento topográfico, equipos GNSS para localizar los puntos de toma de muestras, cálculo de erosión de playas y evidencia mediante cámaras digitales.

#### 3.2.2.2.1 Actividades en el trabajo de campo

- **Inspección visual:** Verificación directa de las características geomorfológicas observadas en los mapas preliminares. Se toman notas en libretas o cuadernos de campo, o audios para posteriormente caracterizar los sitios de estudio a detalle. Es importante pasar rápidamente estas notas a la computadora, para no perder el detalle de lo visto en campo, así como aquellos detalles que se guardan en la memoria.
- **Recolección de muestras:** Obtención de muestras de suelo y sedimentos para análisis posteriores en el laboratorio, por ejemplo, texturas de arenas y suelos. Dependiendo del estudio, pueden ser sólo de arena o bien de detritos o rocas, incluso suelos. Se utiliza bolsas plásticas rotuladas con un marcador permanente para que no se vaya a borrar por la humedad.
- **Mediciones *in situ*:** Uso de equipos portátiles para medir parámetros específicos del terreno como la inclinación (clinómetro) y la composición del suelo (tabla de Munsell). Estos datos nos dan indicios de los procesos de formación de estas formas de relieve.
- **Documentación fotográfica:** Registro visual detallado de las características geomorfológicas observadas. Es importante tener un control cruzado con la localización de donde se toman las fotografías para un mejor registro histórico y de localización. Se puede utilizar cámaras fotográficas de alta resolución o bien los celulares actuales que tienen buena calidad y, sobre todo, que cumplan su objetivo científico.

### 3.2.2.2 Herramientas utilizadas

- **Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS):** Para la geolocalización precisa de puntos de interés. Existen equipos como los navegadores, teléfonos inteligentes o dispositivos portátiles que captan señales de diversos sistemas de satélites como GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou y otros.
- **Cámaras digitales:** Documentación fotográfica del terreno por medio de cámaras digitales o actualmente los teléfonos móviles también tienen alta resolución. Incluso estos últimos tienen la ventaja de generar la fotografía con su localización.
- **Instrumentos de medición:** Para evaluar características específicas del terreno. Estas varían entre otros desde cintas métricas, cuerdas, y niveles.

Figura 38 Fotografía del trabajo de campo y medición de perfiles de playa en playa Manzanillo, Talamanca



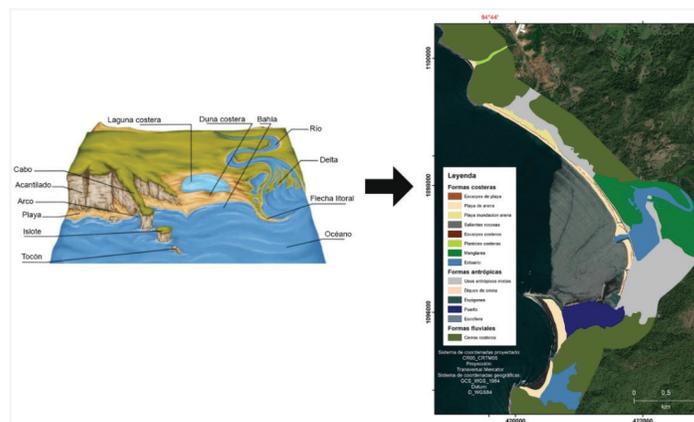
Los cambios en los escarpes erosivos de playa son evidentes a lo largo de la costa de playa Manzanillo.

### 3.2.2.3 Fase de posmapeo

En la fase de posmapeo, se produce el mapa geomorfológico final, acompañado de una leyenda detallada y un documento explicativo (Figura 39). Este mapa representa con precisión las características de las formas y procesos del terreno, además proporciona una herramienta valiosa para la gestión territorial y la evaluación del riesgo.

Una vez completado el trabajo de campo, se elabora el mapa geomorfológico final en un programa de SIG; es recomendable trabajar con un sistema de referencia local, para el caso de Costa Rica sería Costa Rica Transversal de Mercator 2005, con datum CR-SIRGAS (EPSG: 8908). Este mapa se acompaña de una leyenda detallada que utiliza una codificación de colores para representar las distintas formaciones del relieve según su origen. Por ejemplo, las playas arenosas se representan en amarillo o beige, los

Figura 39 Mapas geomorfológicos, del esquema al mapa finalplaya Manzanillo, Talamanca



Fuente: Datos propios, 2024.

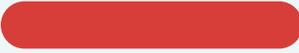
acantilados rocosos en marrón o gris, las dunas costeras en amarillo intenso, los manglares en verde, y las lagunas y estuarios en azul claro. Para formas fluviales, se utilizan tonos de azul y cian, y para formas gravitacionales como deslizamientos, se emplean marrón oscuro o tonos rojizos.

Además, se proporciona un documento explicativo que describe en detalle las formas del relieve y los procesos que las han modelado, especialmente en áreas específicas como las playas (Goudie, 2004; Lugo, 2011). Esta documentación complementaria es fundamental para entender la dinámica del paisaje y su evolución y sirve como una herramienta valiosa tanto para investigadores como para gestores del territorio (Quesada-Román et al., 2023).

### 3.2.2.3.1 Productos finales

- **Mapa geomorfológico final:** Representación detallada y precisa de las características del terreno. Normalmente estos mapas incluyen los principales poblados cercanos, ríos importantes, mares y océanos, y algún otro elemento de distinción geográfica. La Tabla 13 muestra la propuesta de la simbología utilizada y se le asigna un 30 % de transparencia (70 % de opacidad), en caso de utilizar un mapa base como una imagen satelital o un modelo de sombras.
- **Leyenda detallada:** Codificación de colores y símbolos que explican las distintas formaciones del relieve. Estas leyendas se ordenan por ambiente geomorfológico (tectónico, volcánico, gravitacional, fluvial, costero), y en formas de tipo erosivo o deposicional. El código RGB representa colores combinando valores de rojo, verde y azul (0-255). El código HEX usa seis dígitos hexadecimales para representar estos mismos colores (RGB).

Tabla 13 Paleta de colores propuesta para el mapa geomorfológico

Formas	Descripción	Color	Código HEX	Código RGB
Costeras	Escarpes de playa		#d63f3a	214,63,58
	Playas de arena		#fbdd90	251,221,144
	Playa de inundación		#fbdd90 y	251,221,144 y
			#487bb6	72,123,182
	Salientes rocosas		#000000	0,0,0
	Escarpes costeros		#d5733a	213,115,58
	Manglares		#ffffff y	255,255,255 y
			#becf50	190,207,80
	Estuarios		#3e7fbd	62,127,189

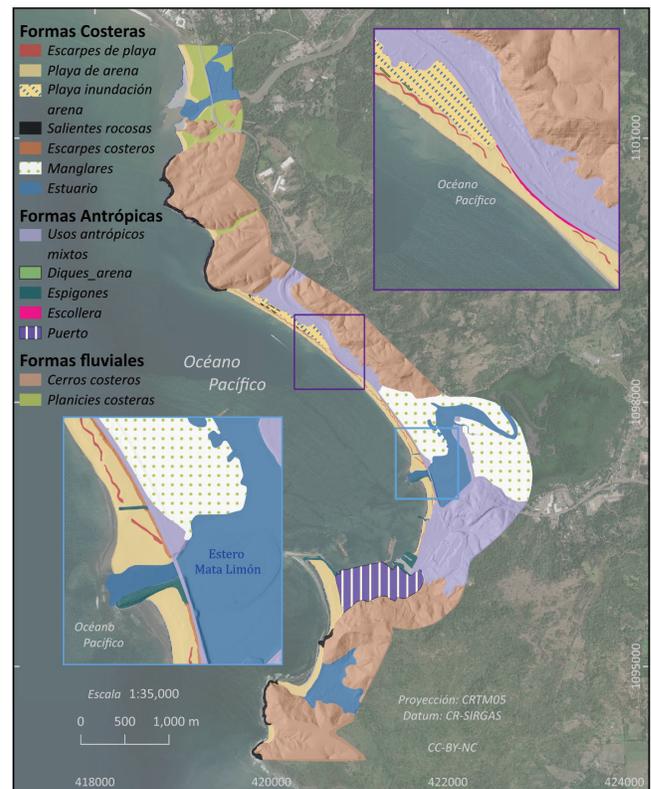
Formas	Descripción	Color	Código HEX	Código RGB
Antrópicas	Usos antrópicos mixtos		#b7ace1	183,172,225
	Diques de arena		#85b66f	133,182,111
	Espigones		#155c61	21,92,97
	Escollera		#ff0191	255,1,145
	Puerto		#684ae1 y #ffffd7	104,74,225 y 255,252,215
Fluviales	Cerros Costeros		#d59b7a	213,155,122
	Planicies Costeras		#becf50	190,207,80

Fuente: Datos propios, 2024.

- **Documento explicativo:** Descripción exhaustiva de las formas del relieve y los procesos geomorfológicos. Se detallan desde la génesis (tipos de roca, sedimentos o suelos), dinámica (ambiente morfogenético como lo fluvial, costero, gravitacional), morfología (laderas, llanuras, cuál es su inclinación), evolución (que existía antes y hacia cuáles procesos va dominando el relieve actualmente), y edad (geológica).

Por tanto, en la Figura 40, se visualiza el producto final visual donde se integra los colores indicados en la Tabla 13. Es importante resaltar que la simbología debe ser agrupada por el tipo de forma para una mejor interpretación del mapa.

Figura 40 Ejemplo de cartografía geomorfológica



Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.2.3.2 Implicaciones del uso de la cartografía geomorfológica

- **Gestión del territorio:** Facilita la planificación y gestión de áreas naturales, urbanas y rurales. La cartografía geomorfológica brinda unidades de relieve explicadas según sus formas y procesos, lo que indica las características de estas para diversos usos rurales, agrícolas, urbanos, industriales y costeros.
- **Evaluación de riesgos naturales y antrópicos:** Ayuda a identificar zonas susceptibles a deslizamientos, inundaciones y otras amenazas como la erosión costera. Dado que las formas de relieve tienen dinámicas particulares, estas favorecen los análisis de riesgos naturales entendiendo su magnitud y recurrencia.
- **Investigación científica:** Los mapas geomorfológicos proporcionan una base de datos sólida para estudios geológicos, geográficos, ambientales y de cambio climático.
- **Educación y concienciación:** La geomorfología es una herramienta educativa para la comprensión de los procesos geomorfológicos y su impacto en el entorno.

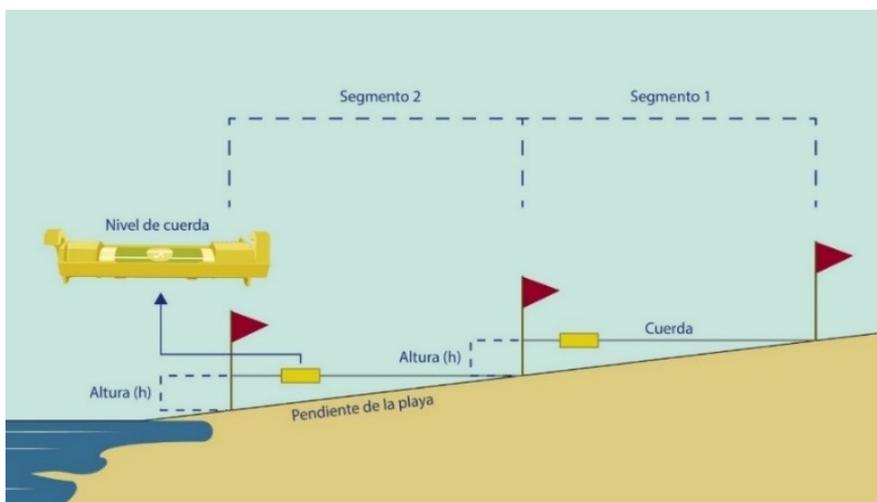
Esta metodología ha sido empleada en Costa Rica para mapear la geomorfología costera de Caldera en el Pacífico y Manzanillo en el Caribe. Sin embargo, estos pasos metodológicos pueden ser aplicados a otras playas y zonas costeras del país, así como a distintas zonas del mundo dada su versatilidad, replicabilidad y adaptabilidad.

## 3.2.3 Pasos para analizar la erosión costera

### 3.2.3.1 Levantamiento de perfiles de erosión

Para el levantamiento de perfiles de erosión, se usa la metodología definida por Pino & González (2008) y utilizada por Pérez-Briceño (2017). En primer lugar, se evalúa el área de estudio de cada playa y se determina la cantidad de perfiles representativos; para este estudio, se seleccionan cinco perfiles con base en el criterio de experto. Es importante manifestar que cada perfil es característico de un mismo paisaje costero se tomó en cuenta la presencia de infraestructura, estado de la vegetación y morfología de la playa, así como las zonas más críticas por erosión costera. Los perfiles de playa se realizan en marea baja, en el caso de la costa del Pacífico, se debe trabajar máximo tres horas antes y tres horas después de la bajamar.

Figura 41 Segmentos y perfiles de erosión de playas.



Fuente: Datos propios, 2024.

A partir de un punto fijo (como una palmera o un poste de electricidad, para que pueda ser replicable en el futuro) se colocó una cuerda de nylon (de construcción) perpendicular al mar y se marcaron segmentos cada dos metros en la horizontal (Figura 41). Esta medida de dos metros se puede ajustar de acuerdo con las particularidades de la playa, pero es importante mencionar que, si se observaba algún cambio abrupto en el perfil, la medida horizontal puede variar para que quede registrado, por ejemplo, en el caso de presencia de gradas de erosión o un cambio de pendiente.

Con ayuda del nivel, se mide la diferencia de altura entre un punto A y un punto B, entre

el punto B y C (Figura 41), y así sucesivamente con todos los segmentos del perfil (Pino & González, 2008). Esto permitirá la obtención de tablas en formatos X y Y (Figura 42) para obtener el perfil de cada playa, que posteriormente se compara con el perfil de equilibrio. Los gráficos son generados en RStudio (entorno de programación con R) con el paquete de ggplot2. En la Figura 43 se muestra parte del código utilizado y en la Figura 44 la visualización del código.

Figura 42 Ejemplo de tabla de datos del perfil de erosión

Estación	Distancia Horizontal	Distancia Horizontal Acumulada	Desnivel	Desnivel Acumulado	Observaciones
0	0	0	0	0	Punto de amarre
1	2	2	-11	-11	
2	1,26	3,26	-13,5	-24,5	
3	2,21	5,47	-64	-88,5	
4	0,58	6,05	-97	-185,5	
5	3	9,05	-20	-205,5	

Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 43 Código en R para la generación de los perfiles

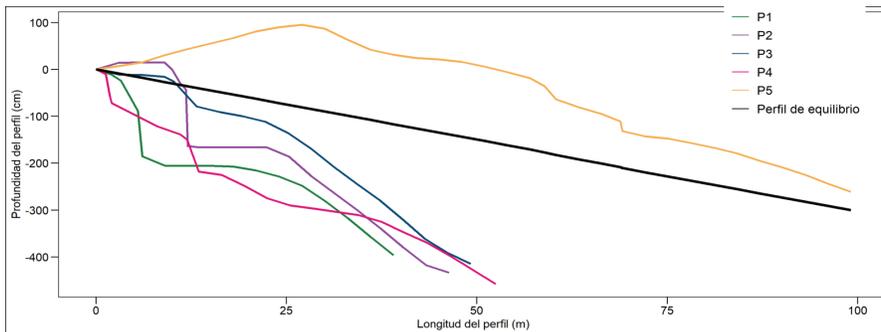
```

8 PC <- Perfiles_caldera
9
10 ggplot(data = PC,
11         mapping = aes(x = x, y = PP, color = Perfil, size = Tamaño)) +
12   geom_line(aes(group = Perfil, linetype = ifelse(Perfil == "Perfil de Equilibrio", "solid",
13         labs(x = "Longitud del perfil (m)", y = "Profundidad del perfil (cm)")) +
14   theme_base() +
15   theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"),
16         axis.text = element_text(size = 12),
17         axis.title.x = element_text(size = 12),
18         axis.title.y = element_text(size = 12),
19         legend.text = element_text(size = 13),
20         legend.title = element_text(size = 12),
21         legend.position = c(0.887, 0.85),
22         legend.key.width = unit(0.75, "cm"),
23         legend.key.size = unit(20, "pt"),
24         legend.box = "vertical")) +
25   scale_color_manual(values = c("#238443", "#984ea3", "#034e7b", "#f0027f", "#feb24c", "black"))
26   guide = guide_legend(override.aes = list(size = 5))) +
27   scale_size_manual(values = c(ancho = 1.5, no_ancho = 0.5), guide = FALSE) +
28   scale_linetype_manual(values = c("solid", "dashed"), guide = FALSE)
29
30
31 (Top Level)
R Script

```

Fuente: Datos propios, 2024.

Figura 44 Ejemplos de perfiles de playa generados en R



Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.3.2 Granulometría de arenas

El conocer el tamaño de los granos en la playa proporciona información valiosa sobre la dinámica ambiental, las fuentes de sedimento y los procesos sedimentarios activos en la región. Este conocimiento es crucial para la gestión costera, la conservación de hábitats y la comprensión de la evolución geomorfológica de la playa. Hay que recordar que la playa es una zona de alta energía y producto de esto nunca es la misma playa de un día para otro. Las partículas de arena están sometidas principalmente al oleaje que hace que los granos se muevan de manera irregular a lo largo de la playa y por el perfil. En cada uno de los perfiles se recolectaron dos muestras de arenas, una en la zona intermareal hasta donde llegaba la marea baja y otra en la zona de la berma (zona seca).

A partir de una granulometría de arenas se determina el porcentaje de arenas por tamaño de grano, para ello se utiliza un set de tamices ASTM. Las arenas van desde los 2 mm hasta 0,063 mm, de acuerdo con Friedman & Sanders (1978). La Tabla 14 muestra el número de tamiz utilizado, el diámetro en milímetros y la descripción cualitativa de la arena. El tiempo de movimiento en el agitador es de 15 minutos para cada muestra procesada. En este estudio, la granulometría fue realizada por el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, por una cuestión de facilidad de respuesta, pero puede ser en otro laboratorio que cuente con el equipo necesario.

Tabla 14 Tamices utilizados para la granulometría de arenas

Tamiz	Milímetros	U.S Departamento de Agricultura
18	1.000	Arena muy gruesa
35	0.500	Arena gruesa
60	0.250	Arena Media
120	0.125	Arena muy fina
230	0.063	Arena muy fina

Fuente: Friedman & Sanders (1978) y USDA (1987).

La presencia de granos gruesos en una playa generalmente indica un ambiente de alta energía. Las olas fuertes, las corrientes rápidas y la acción del oleaje tienen la capacidad de transportar y depositar partículas más grandes. En contraste, los ambientes de baja energía, como las lagunas o los estuarios, tienden a depositar sedimentos más finos. Playas con pendientes pronunciadas y expuestas a fuertes tormentas tienden a tener sedimentos más gruesos. La dinámica de los procesos costeros, como la abrasión y la selección sedimentaria, también juega un papel en la presencia de granos gruesos. Estos procesos pueden romper y clasificar los sedimentos, dejando en la playa partículas más grandes.

Los resultados se presentan en curvas granulométricas, que son gráficas que muestran la distribución del tamaño de los granos en una muestra de sedimento. Estas curvas son fundamentales en estudios sedimentológicos, geotécnicos y ambientales, ya que proporcionan información detallada sobre la composición y las características del material estudiado. En el caso de la erosión costera, permite comprender cómo es el proceso de sedimentación y deposición en la playa. A partir de esta gráfica se extrae el valor de la mediana (D50) que representa el tamaño de la partícula en el que el 50% del material es más pequeño y el 50% es más grande.

### 3.2.3.3 Perfil de equilibrio

Para determinar el perfil de equilibrio de la playa, se aplicó la ecuación de Bruun (1954), que depende de la pendiente y el tamaño de grano predominante, es decir el D50 (CEPAL et al., 2012). La ecuación se expresa como  $h = Ax^{\frac{2}{3}}$ , donde h es la profundidad del agua a una distancia x de la costa y A es un parámetro que depende de las características del sedimento (tamaño del grano; Dean, 1991; Knezek, 1997). Para calcular el valor A, se utilizó la ecuación  $A = kw^{0.44}$ , donde w está en función de la velocidad de caída del grano (deposición) y está dada en  $\frac{m}{s}$ . El valor propuesto para k por Dean (1987) en CEPAL et al. (2012) es de 0.51. La manera de calcular w es:

$$w\left(\frac{m}{s}\right) = 1.1 \times 10^6 D^2(m) \quad D < 0.1mm$$

$$w\left(\frac{m}{s}\right) = 273 D^{1.1}(m) \quad 0.1 < D < 1mm$$

$$w\left(\frac{m}{s}\right) = 4.36 D^{0.5}(m) \quad D > 1mm$$

Donde D es el diámetro del sedimento, que corresponde al D50, es decir la mediana (CEPAL et al., 2012). Posteriormente, se realizó una comparación entre los perfiles levantados en campo y el perfil de equilibrio.

### 3.2.3.4 Índice de erosión y sedimentación Costera (IE-SC)

Es una metodología que establece el grado de erosión presente en la playa de forma semicuantitativa (Cárdenes y Obando, 2006). Se evalúa el paisaje en busca de evidencias de erosión costera que esté afectando la zona de interés, utilizando de referencia la Tabla 15.

Tabla 15 Niveles del índice de erosión y sedimentación Costera (IE-SC).

Nivel	Descripción	Vegetación	Infraestructura	Físico-geológico
1	Erosión-sedimentación no apreciable		No presenta mayores modificaciones "equilibrio dinámico"	
2	Erosión-sedimentación muy leve	Raíces de las plantas ligeramente expuestas en el límite de la marea alta normal	No está comprometida	Terrazas de erosión menores a 50 cm
3	Erosión-sedimentación media	Exposición de raíces de las plantas dentro de la zona de la marea alta normal  Vegetación de gran tamaño (>5 m) basculadas en el límite de la marea alta  Raíces cortadas por acción marina	Está alejada al menos 5 m del límite  No se presenta en construcciones que tengan como fin la contención de los procesos de erosión-sedimentación costera	Terrazas de erosión menores a 50 cm  Terrazas pueden oscilar entre 50 cm y 1 m

Nivel	Descripción	Vegetación	Infraestructura	Físico-geológico
4	Erosión-sedimentación fuerte	Fuerte exposición radicular, en algunos casos las raíces han sido eliminadas y solo queda la parte cercana al tronco  Vegetación de gran tamaño (>5 m) se encuentra tumbada a lo largo de la zona intermareal e incluso removida hacia el mar	Fuerte posibilidad de ser afectada si la erosión se mantiene o aumenta  Se utilizan sistemas de estabilización costera (diques de sacos de arena, muro de roca como chatarra, llantas, muros de cemento, gaviones)	Terrazas pueden oscilar entre 1 m y 1.5 m
5	Erosión-sedimentación fuerte	Sistemas radicales se encuentran rotos, totalmente expuestos y desarticulados  El sustrato de las palmeras y árboles adultos (>5 m) están socavados tumbados y removidos por las corrientes	Se utilizan sistemas de estabilización de la costa, los cuales no han sido efectivos. Presentan señales evidentes de destrucción, socavamiento, colapso parcial o total, hasta enterrados  Las bases de la infraestructura son falseadas, hay colapso de techos y paredes llegando incluso a la pérdida total de la infraestructura	Terrazas > 1.5

Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.3.5 Productos finales

- **Perfiles de playa:** A partir de los perfiles de playa y la granulometría, es posible comparar el estado actual de la playa con el perfil de equilibrio teórico que debería presentar, según la metodología de Bruun. Esta comparación permite identificar desviaciones en la inclinación natural de la playa, y donde se revela zonas donde hay acumulación o erosión. Estas visualizaciones gráficas facilitan la identificación de áreas críticas, ya que muestran de manera clara y detallada dónde la playa acumula sedimentos y dónde está siendo erosionada. De esta forma, se pueden tomar decisiones informadas para la gestión costera y la protección de estas áreas, especialmente en zonas vulnerables o con infraestructuras cercanas.

Tabla 16 Paleta de colores para el mapa de Índice de erosión y sedimentación costera

Índice	Descripción	Color	Hex	Código RGB
1	Erosión-sedimentación no apreciable		#55b94c	85,185,76
2	Erosión-sedimentación muy leve		#a8c348	168,195,75
3	Erosión-sedimentación media		#fbc94a	251,201,74
4	Erosión-sedimentación fuerte		#f88943	248,137,67
5	Erosión-sedimentación muy fuerte		#ee4740	268,71,54

Fuente: Datos propios, 2024.

- **Cartografía del Índice de erosión y sedimentación costera:** una vez identificados los sectores, se procede a generar el mapa de los diferentes grados de erosión con su respectiva simbología y de forma complementaria la Tabla 15. La Tabla 16 muestra la paleta de colores para la cartografía del índice de erosión costera y se le asigna un 30 % de transparencia (70 % de opacidad), en caso de utilizar un mapa base como una imagen satelital o un modelo de sombras.

Por tanto, la Figura 45 es un ejemplo de cómo se visualiza el índice de erosión y sedimentación costera. Se observa que se utiliza el polígono para marcar la zonificación porque la escala lo permite; pero en caso de que la escala sea muy pequeña, se puede sustituir por una línea que delimite cada región en la playa.

### 3.2.4 Pasos para el análisis multicriterio

#### 3.2.4.1 Identificación de criterios ambientales

Para el análisis multicriterio se toman en cuenta los siguientes criterios:

**a. Batimetría:** Se procede a la obtención de la profundidad del lecho marino para ambos sitios, que puede influir en la intensidad y propagación de eventos como mareas, oleaje y marejadas. Esto se debe obtener en función de cada sitio para entender la dinámica costera.

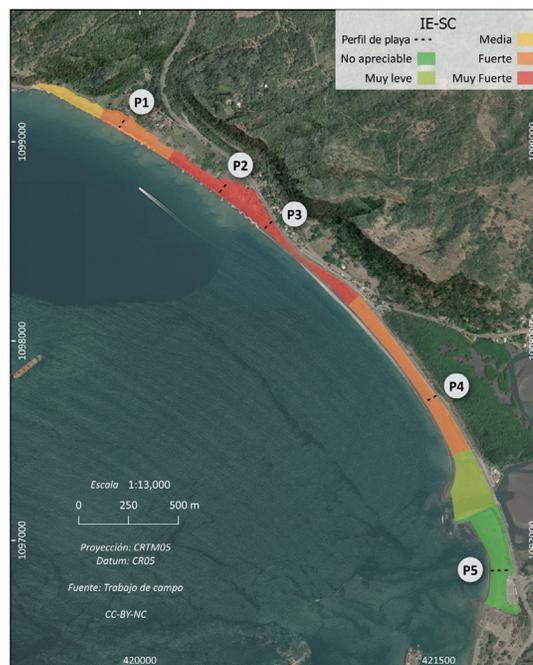
**b. Topografía:** Se trabaja con la elevación del terreno ajustada obtenida de los datos LiDAR con que cuenta la CNE para ambos sitios, con el fin de determinar la susceptibilidad a inundaciones por aumento del nivel del mar y sus variables asociadas (apilamiento y ENOS). En caso de no contar con información existente se debe proceder al levantamiento de la información como se mencionó en apartado superiores de esta guía metodológica.

**c. Mareas (máximas, extraordinarias, ENOS, apilamiento):** Se trabaja con los valores de las mareas máximas y extraordinarias que indican el nivel máximo al que puede llegar el agua en determinadas circunstancias. Se tomará en cuenta el incremento que puede darse debido a eventos del ENOS (El Niño - Oscilación del Sur) que pueden influir en la intensidad y frecuencia de mareas extremas. Adicionalmente se tomará en cuenta el apilamiento, que se refiere a la relación de mareas altas y de oleaje significativo favoreciendo el aumento del riesgo de inundaciones costeras. Esto varía en función de las regiones oceanográficas indicadas en esta guía.

**d. Oleaje:** Otra de las variables es el oleaje tomando en cuenta la altura y dirección de las olas que pueden provocar o favorecer la erosión costera y el posible daño sobre las infraestructuras y estructuras cercanas. Esta capa se debe generar para cada sitio en función de lo mencionado anteriormente en esta guía.

**e. Nivel del mar (calentamiento global):** Se toma en cuenta las tendencias del aumento del nivel del mar debido al calentamiento global, lo cual incrementa la vulnerabilidad costera a partir de lo indicado por el IPCC en los escenarios de la SSP que indica que para un SSP3-7.0 (escenario con alta concentración de CO<sub>2</sub>, pero no extremo). Se presentan las siguientes proyecciones para Puntarenas y Limón (Tabla 17).

Figura 45 Ejemplo de la cartografía del Índice de erosión y sedimentación costera



Fuente: Datos propios, 2024.

Tabla 17 Aumento del nivel del mar por escenario de concentración

Año	2030	2050	2070	2100
Puntarenas	0,11m	0,24m	0,41m	0,75m
Limón	0,12m	0,25m	0,42m	0,76m

Fuente: Datos propios, 2024.

**f. Erosión costera:** Se realiza la evaluación de la velocidad y magnitud de la erosión de la costa, considerando factores como la pendiente de la playa, la vegetación costera y la acción de las olas. Se debe realizar la medición de perfiles costeros en cada sitio.

**g. Geomorfología:** Se procede a la generación de la geomorfología costera a detalle para cada sitio a partir de las características geológicas y geomorfológicas que afectan la estabilidad del terreno, debido a sus dinámicas fluvio-costeras y la exposición a amenazas como deslizamientos de tierra y erosión costera. Esta capa se debe generar para cada playa.

### 3.2.4.2 Normalización de datos

1. Se procede a la normalización de cada uno de los datos para cada criterio en una escala común (valores de 1 a 5, 1 menor riesgo, 5 mayor riesgo ante los eventos oceanográficos).

### 3.2.4.3 Ponderación de criterios

1. Ponderación basada en la importancia relativa de cada criterio, según la valoración experta del comité técnico:

- Topografía: 10%
- Mareas: 40%
- Oleaje: 15%
- Geomorfología: 20%
- Erosión Costera: 15%

2. Se hace uso de la herramienta superposición ponderada (Weighted Overlay Analysis) en el programa ArcGIS. Si no se cuenta con la herramienta, se debe aplicar la fórmula de superposición ponderada para evaluar el riesgo y clasificar las ubicaciones, con base en el valor del riesgo en cualquier otro software de información geográfica.

**Resultado Riesgo**= $0,40 \times A + 0,20 \times B + 0,15 \times C + 0,15 \times D + 0,10 \times E$

**Donde:**

**A:** Capa que contiene la información zonificada con los siguientes componentes: ENOS, apilamiento de oleaje, marea base y aumento del nivel del mar.

**B:** Capa de geomorfología definida en función de la afectación por el aumento del nivel del mar.

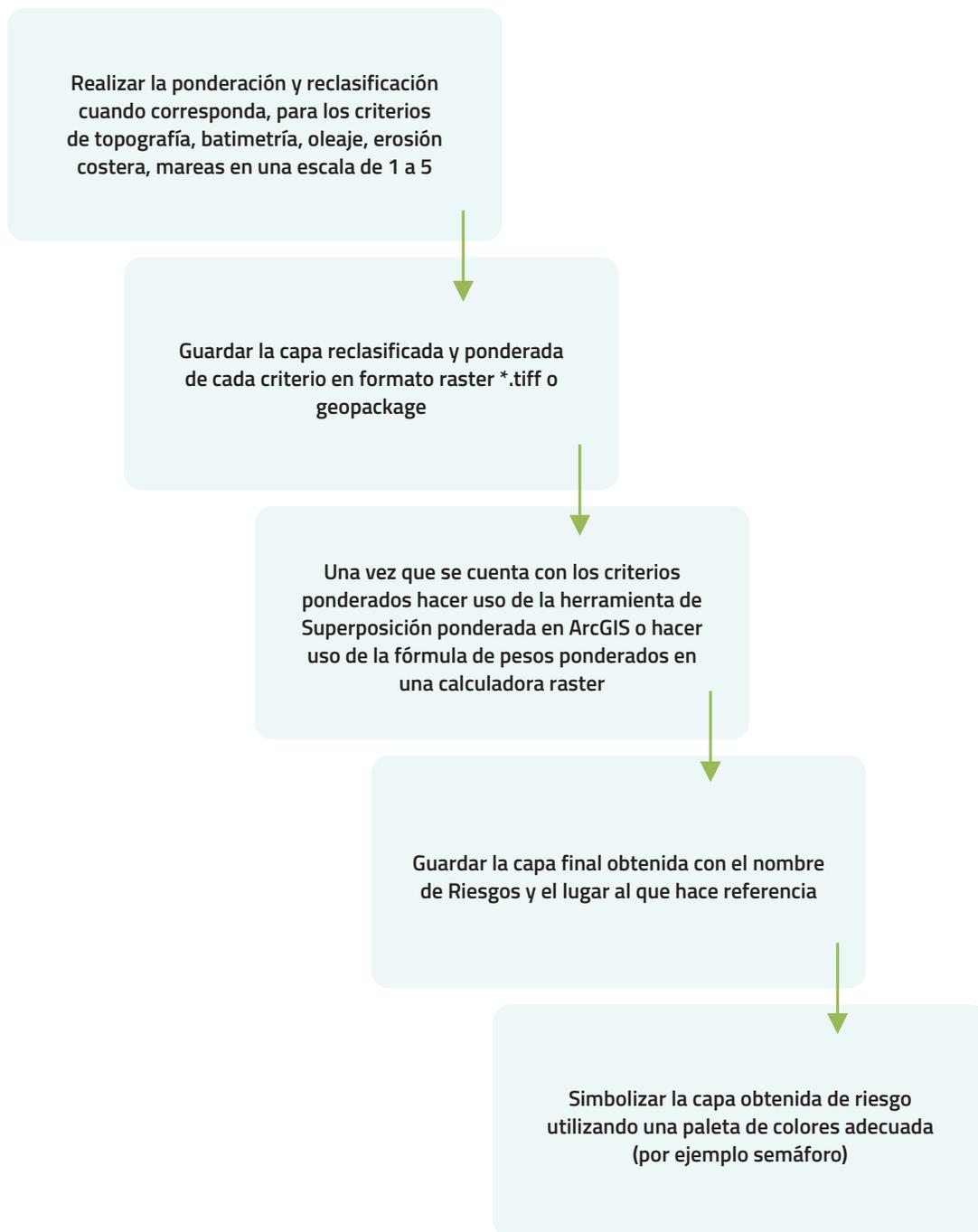
**C:** Oleaje. Definido a partir de un polígono que representa la extensión de la rompiente a partir de un oleaje entre 2.8 y 3 m.

**D:** Índice de erosión costera: resultado obtenido del grado de cambio presente sobre el área costera.

**E:** Modelo de elevación digital reclasificado para conocer las elevaciones más bajas en el frente costero.

Es importante mencionar que esta herramienta proporciona una manera sistemática de evaluar la amenaza y clasificar las ubicaciones en función de esta para cada sitio de estudio, lo que facilita la identificación de áreas críticas que requieren atención prioritaria en temas asociados a la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial. La Figura 46 muestra la síntesis de los pasos necesarios para la obtención del mapa de amenazas ante eventos costeros.

Figura 46 Pasos de la etapa 5 para la generación del mapa síntesis final de amenazas costeras



Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.4.4 Cartografía del análisis multicriterio

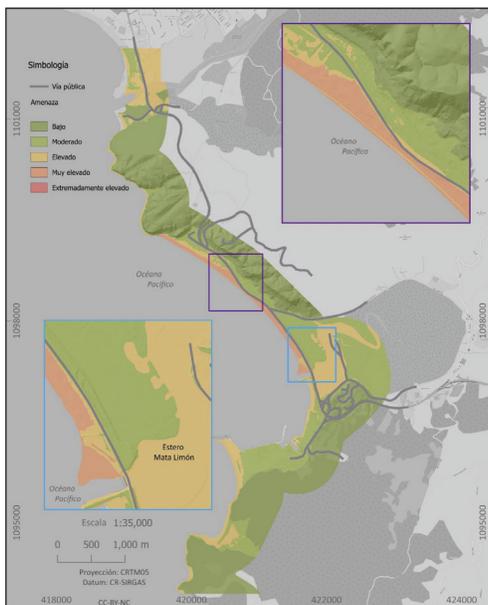
Una vez terminado el análisis, se procede a generar el mapa temático de las diferentes categorías con su respectiva simbología. La Tabla 18 muestra la paleta de colores utilizada y se le asigna un 30 % de transparencia (70 % de opacidad), en caso de utilizar un mapa base como una imagen satelital o un modelo de sombras. Al final deben obtener un producto síntesis, similar al mostrado en la Figura 47 para el caso de Caldera.

Tabla 18 Paleta de colores para el mapa de análisis multicriterio

Índice	Categoría	Color	Código HEX	Código RGB
1	Bajo		#55b94c	85,185,76
2	Moderado		#a8c348	168,195,75
3	Elevado		#fbc94a	251,201,74
4	Muy elevado		#f88943	248,137,67
5	Extremadamente elevado		#ee4740	268,71,54

Elaboración propia

Figura 47 Mapa Índice Multiamenaza para Caldera.



Fuente: Datos propios, 2024.

### 3.2.4.5 Beneficios adicionales

- Con el uso de esta metodología propuesta por el equipo de trabajo y los resultados por obtener, se pretende:
- La identificación de áreas prioritarias para la implementación de medidas de mitigación y adaptación ante este tipo de fenómenos.
- Mejorar la capacidad de planificación y respuesta ante eventos extremos.
- Reducir la vulnerabilidad de la población y las estructuras presentes, frente a amenazas naturales y antropogénicas (riesgos asociados a la navegación y el transporte marítimo, la pérdida de vegetación costera entre otras).

### 3.2.5 Procedimiento para el análisis de exposición ante riesgos e integración con planes reguladores costeros

La exposición ante riesgos y su integración en los planes reguladores costeros son esenciales para garantizar un desarrollo sostenible y resiliente en las zonas costeras de Costa Rica. Es fundamental que los tomadores de decisiones en instituciones públicas y municipalidades consideren la alta exposición de las comunidades y la infraestructura a fenómenos naturales, como el aumento del nivel del mar, la intrusión salina y la erosión costera. Para mitigar estos riesgos, los planes reguladores deben incluir zonas de amortiguamiento alrededor de áreas protegidas, como lo son la Zona Protectora Tivives y el Corredor Biológico Guacimal-Tivives (en Caldera) así como el Refugio de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo (en Manzanillo), que actúan como barreras naturales ante inundaciones y tsunamis. Por otro lado, las zonas naturales como humedales (estuarinos, lacustrinos, o palustrinos) deben tener especial atención y protección ante las presentes y futuras presiones de crecimiento poblacional y urbanas. Además, la planificación territorial debe restringir el uso del suelo en áreas de alta vulnerabilidad y evitar la construcción de infraestructuras permanentes en zonas expuestas, donde fenómenos como la erosión costera, la licuefacción, los movimientos en masa y las inundaciones son probables.

Asimismo, es crucial integrar los estudios de riesgo y las proyecciones de cambio climático en los planes de ordenamiento territorial, pues permite un monitoreo continuo de las condiciones costeras. Los tomadores de decisiones deben priorizar la adaptación mediante el desplazamiento progresivo de infraestructuras críticas alejadas de la costa y la restauración de humedales y manglares, los cuales ofrecen funciones esenciales para la mitigación de inundaciones y la protección ante tsunamis. La inclusión de estas medidas en los planes reguladores fortalecerá la capacidad de las comunidades para adaptarse a los riesgos, al proteger tanto a las personas como a los activos construidos. Para que quienes toman las decisiones en instituciones públicas, municipalidades, ONG y empresas privadas puedan revisar de manera efectiva la exposición a riesgos y su integración con los planes reguladores territoriales en las zonas marítimo-terrestres, es fundamental seguir un enfoque estructurado que incluya tanto aspectos biofísicos como socioeconómicos. La Figura 48 muestra el esquema de integración de estos estudios dentro de los planes reguladores.

Figura 48 Esquema de la incorporación de estudios costeros en planes reguladores



Fuente: Datos propios, 2024.

A continuación, se describen los pasos clave y aspectos a tomar en consideración en cada uno de ellos:

#### **a. Identificación de las áreas de análisis:**

Para delimitar el área de estudio, se toma como referencia la Ley 6043 de Zona Marítimo Terrestre (ZMT), que establece una franja de 200 metros dividida en dos secciones: los primeros 50 metros corresponden a zona pública y los siguientes 150 metros, zona concesional. La entidad rectora es la municipalidad de cada cantón, salvo en las Áreas Silvestres Protegidas (ASP) y los centros urbanos establecidos en el reglamento de la misma ley, como Puntarenas, Jacó y Golfito. Por tanto, las zonas marítimo-terrestres específicas deben revisarse considerando tanto la legislación vigente e instituciones rectoras correspondientes. En algunos casos, se puede incluir al Instituto Costarricense de Turismo (ICT), si se cuenta con la presencia de puertos o atracaderos.

Es importante analizar si la municipalidad cuenta con plan regulador en general y, en particular, con un plan regulador costero específico. Esto permite identificar los límites de la zonificación definidos por los planes reguladores municipales, así como las características dentro de esas delimitaciones. Además, facilita la identificación de infraestructura crítica, el uso del suelo y la densidad de la población.

La normativa nacional, desde la Constitución Política hasta legislación específica como la Ley de Planificación Urbana, Ley Orgánica del Ambiente, Ley Forestal, Ley de Biodiversidad, entre otras, tienen injerencia en la forma de reglamentan el Patrimonio Natural del Estado, incluyendo la zona pública dentro de la ZMT. Las instituciones públicas responsables de las zonas marítimo-terrestres deben colaborar estrechamente con las municipalidades para garantizar que los límites geográficos estén bien definidos y respeten los ecosistemas costeros y las áreas protegidas.

#### **b. Revisión de mapas biofísicos, dinámica costera y escenarios de cambio climático:**

Este paso implica analizar los mapas que detallan las características geográficas y ecológicas de la zona, como topografía, geomorfología costera, ecosistemas marino-costeros (como manglares, arrecifes de coral, pastos marinos, entre otros), áreas de amortiguamiento y zonas de amenaza como inundaciones y erosión costera. Es imperativo incluir las proyecciones de cambio climático, según los modelos de última generación del IPCC y tomar la decisión de cuáles escoger y la temporalidad, para producir los escenarios de inundación de costera con el fin de proyectar a futuro las zonas amenazadas.

La información espacial debe coincidir en el mismo detalle, es decir que la escala sea equivalente. Por ejemplo, se puede trabajar con escenarios de una resolución de 1 metro al igual que la topografía. Idealmente, la información debe estar en el rango entre 1:1000 y 1:10000 para poder basarse en datos de alta resolución. En este paso se sabe que la información disponible en Costa Rica no siempre está al alcance, a pesar de que se solicita a las instituciones encargadas o que la escala requerida no es compatible; por lo que se necesita un esfuerzo grande en la generación de esta información, lo que puede inclusive llevar a desarrollar otro estudio completo y, en consecuencia, un significativo aumento de recursos económicos y de personal.

Es crucial que las entidades responsables de la gestión territorial utilicen datos actualizados e históricos, incluidas imágenes satelitales, fotografías aéreas y análisis geoespaciales, para identificar áreas vulnerables y ecosistemas claves que requieren protección. La colaboración con organizaciones como ONG especializadas en conservación y medio ambiente puede proporcionar información valiosa para este análisis.

#### **c. Análisis socioeconómico:**

Paralelamente, se debe revisar los mapas que contienen información socioeconómica, como la distribución de la población, infraestructura crítica, actividades económicas predominantes (como turismo, pesca, y transporte) y la presencia de asentamientos humanos vulnerables. Las municipalidades y ONG pueden desempeñar un papel clave en la recolección de estos datos, mientras que

las empresas privadas deben asegurarse de que sus actividades comerciales sean sostenibles y compatibles con el ordenamiento territorial. Es esencial que este análisis contemple factores de vulnerabilidad, como la pobreza y la exposición de infraestructuras y personas al riesgo, para priorizar áreas de intervención. La Figura 49 muestra los datos mínimos necesarios para este análisis.

Figura 49 Datos necesarios el análisis socioeconómico



Fuente: Datos propios, 2024.

**d. Integración de datos biofísicos y socioeconómicos:** Una vez revisados ambos tipos de mapas, los tomadores de decisiones deben integrarlos en una plataforma de análisis territorial, como un SIG, para evaluar la superposición de riesgos y vulnerabilidades. Esto permitirá identificar zonas críticas donde la exposición de la población y la infraestructura a los riesgos sea mayor, y donde sea necesario priorizar la acción.

**e. Propuesta de medidas de mitigación y adaptación:** Finalmente, basándose en los resultados del análisis integrado, se debe proponer y coordinar estrategias de mitigación y adaptación que alineen los intereses de los diferentes actores (públicos y privados). Las instituciones públicas y municipalidades deben liderar la implementación de estas estrategias en los planes reguladores, mientras que las ONG y empresas privadas deben colaborar activamente en las acciones de conservación, relocalización de infraestructuras y restauración de ecosistemas.

## 4. Sección D: Recomendaciones dirigidas a los gobiernos locales

Es esencial destacar la complejidad del análisis de riesgos, el cual debe considerar múltiples dimensiones. El impacto del aumento del nivel del mar y la erosión costera abarca aspectos estructurales, sociales, económicos y ambientales, lo que requiere una evaluación integral más allá de los cambios físicos en la costa. Aunque el estudio se centra en los escenarios generados, es fundamental llevar a cabo investigaciones complementarias que faciliten una toma de decisiones más informada y efectiva. Los mapas ráster disponibles son útiles para una visualización inicial, pero no contienen todos los datos necesarios para un análisis exhaustivo; por lo tanto, se recomienda incorporar información digital de alta resolución en futuros estudios, lo que puede implicar el desarrollo de estudios paralelos para la obtención de esta información.

Desde el punto de vista estructural, es crucial que los gobiernos locales evalúen cómo el aumento del nivel del mar podría afectar infraestructuras críticas como carreteras, puentes, puertos, acueductos y sistemas de drenaje. Estas infraestructuras son especialmente vulnerables en zonas cercanas a la costa y pueden sufrir daños significativos tanto a corto como a largo plazo. Se sugiere que los gobiernos prioricen estudios técnicos para evaluar la vulnerabilidad de estas estructuras e implementen medidas de ingeniería adecuadas, como barreras de protección o la elevación de infraestructuras en áreas altamente susceptibles.

En el ámbito social, es importante considerar los efectos directos e indirectos sobre las comunidades costeras. Uno de los impactos más preocupantes es la salinización del agua, que puede afectar el suministro de agua potable y la agricultura local, lo cual genera problemas de salud pública y compromete los medios de vida. La degradación de la calidad del agua tiene repercusiones profundas en el bienestar social y económico; por consiguiente, se debe planificar estrategias de adaptación que incluyan mejoras en la gestión del agua y tecnologías para la desalinización o conservación de fuentes de agua dulce.

Desde una perspectiva económica, los impactos del aumento del nivel del mar no solo afectan a las comunidades locales, sino que también pueden tener repercusiones en el ámbito nacional. Las áreas costeras como Caldera y Manzanillo son vitales para sectores económicos claves, como el turismo, la pesca y el transporte marítimo. Los gobiernos deben analizar los posibles costos económicos derivados de la pérdida de áreas costeras valiosas, así como su impacto en ingresos y empleo. También es recomendable realizar un análisis costo-beneficio sobre las medidas de adaptación por implementar, considerando opciones como la construcción de infraestructuras resilientes o soluciones basadas en la naturaleza.

Finalmente, no se debe pasar por alto los impactos ambientales, especialmente en ecosistemas vulnerables como manglares y otros hábitats costeros. Estos ecosistemas son esenciales para la biodiversidad y proporcionan servicios ecosistémicos cruciales, como protección natural contra tormentas y captura de carbono. La erosión costera y el aumento del nivel del mar pueden degradar estos ecosistemas, lo que aumenta la vulnerabilidad de las áreas circundantes. Los gobiernos locales deben trabajar en colaboración con actores nacionales e internacionales para explorar soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de manglares, al promover una adaptación basada en ecosistemas (AbE) que proteja tanto a las comunidades humanas como al entorno natural. En la Figura 50 se presenta algunos ejemplos de medidas de AbE, se aclara que cada una de ellas podría requerir de estudios previos con el fin de validar y sustentar las recomendaciones respectivas.

Figura 50 Ejemplos de adaptación basadas en ecosistemas (AbE)



Fuente: Datos propios, 2024.

A continuación, se detalla cada una de las medidas:

### Restauración y protección de manglares

Los manglares son barreras naturales altamente efectivas contra el aumento del nivel del mar y la erosión costera. Además de su función protectora, estos ecosistemas actúan como sumideros de carbono y proporcionan hábitats para una variedad de

especies. La restauración de manglares degradados y la protección de las áreas existentes no solo contribuirían a estabilizar las costas, sino que también potenciarían la biodiversidad local y mejorarían los medios de vida de las comunidades que dependen de los recursos marinos.

### **Rehabilitación y contención de la erosión de playas**

Las playas desempeñan un papel crucial como defensa natural contra la erosión y las inundaciones. Implementar programas de rehabilitación que incluyan la plantación de vegetación nativa, como árboles, arbustos y gramíneas, puede fortalecer la estructura de las playas y aumentar su capacidad para absorber el impacto de las olas. Este enfoque no solo mejora la resiliencia del ecosistema, sino que también proporciona hábitats para especies nativas y enriquece el paisaje natural.

### **Construcción y restauración de arrecifes**

Los arrecifes de coral, así como los arrecifes artificiales, actúan como barreras naturales que reducen la energía de las marejadas y, por tanto, disminuyen la erosión costera. La restauración de arrecifes de coral, junto con la construcción de nuevos arrecifes artificiales, no solo protege las costas, sino que también favorece la biodiversidad marina. Estos ecosistemas son fundamentales para actividades económicas como la pesca y el turismo sostenible, lo que resalta la importancia de su conservación.

### **Bosques ribereños y reforestación costera**

Establecer cinturones de vegetación nativa o bosques ribereños en áreas vulnerables es una estrategia efectiva para estabilizar el suelo y reducir la erosión. Los árboles y arbustos actúan como barreras naturales que absorben el agua de lluvia, minimizando así la erosión por salpicadura y la escorrentía excesiva. Este enfoque no solo ayuda a mitigar los efectos del cambio climático, sino que también mejora la calidad del agua, proporciona refugio para la vida silvestre y contribuye a la regeneración de ecosistemas degradados.

### **Zonas de amortiguamiento con humedales**

La creación o restauración de humedales costeros (palustrinos, lacustrinos o estuarinos) representa una solución eficaz para absorber el exceso de agua causado por marejadas ciclónicas o aumentos en el nivel del mar. Estos ecosistemas funcionan como esponjas naturales que reducen el impacto de las inundaciones y protegen las zonas interiores. Además, los humedales poseen un alto valor ecológico al proporcionar hábitat a numerosas especies de aves, peces y otros organismos, al mismo tiempo que capturan carbono y mejoran la calidad del agua.

## 5. Bibliografía

- Acuña-Piedra, J. F., & Quesada-Román, A. (2021). Multidecadal biogeomorphic dynamics of a deltaic mangrove forest in Costa Rica. *Ocean & Coastal Management*, 211, 105770. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105770>
- Barrantes-Castillo, G., & Ortega-Otárola, K. (2023). Coastal erosion and accretion on the Caribbean coastline of Costa Rica long-term observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104371. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104371>
- Belliard, J-P, Dominguez, L.E.-Granda, L.E., Ramos-Veliz, J.A., Mishell, A. Rosado-Moncayo, J,N, Govers, G., Gourgue, O. y Temmerman,S. (2021). *Global and Planetary Change* (203). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818121001144>.
- Cárdenes, G., y L. Obando. 2005. "Índice de erosión - sedimentación costera (IE-SC): Una aplicación para la costa del Pacífico Central de Costa Rica". *Revista Geológica de América Central* (32):33-43.
- Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. 2012. "Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Efectos teóricos".
- Dean, R. G. (1977). *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts*. Department of Civil Engineering, Report 12, University of Delaware, Newark.
- Friedman, Gerald, y Sanders, John. 1978. "Chapter 3: Properties of Sedimentary Particles". Pp. 58-81 en *Principles of Sedimentology*. New York: John Wiley & Sons.
- Goudie, A. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, Taylor & Francis Group. England. 1156 pp.
- Hedges, T.S. y Mase, H. 2004. Modified Hunt's Equation Incorporating Wave Setup-. *J. of Water, port, coast, and ocean Engineer*, 109-113.
- IPCC. (2021). Fox-Kemper, B., H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, A. B. A. Slangen, Y. Yu, 2021, Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In press.
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Knezek, E. (1997). *Equilibrium Beach Profile. Measurement and Sediment Analysis: Mustang Island, Texas*. (Tesis inédita de maestría). Texas A&M University, Texas.
- Lizano, O.G. (1997). Las Mareas Extraordinarias de 1997 en la Costa del Pacífico de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 4 (2), 169-179.
- Lizano, O.G. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*. 24: 51-64.

- Lizano, O.G. (2007). Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 25 (1-2): 43-56.
- Lizano, O.G. (2009). Batimetría, modelos de elevación digital y sus aplicaciones. *Azimuth*, 4(10): 18-21.
- Lizano, O. G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, 14(27), 06-27.
- Lizano, O.G. y D. M. Salas. (2001). Variaciones geomorfológicas de la Isla Damas, Quepos en los últimos 50 años. "Ecosistemas Acuáticos de Costa Rica". *Rev. Biol. Trop.* 49 (Supl. 2): 171-177.
- Lugo, J. (2011). *Diccionario Geomorfológico*. Instituto de Geografía, UNAM. Ciudad de México, México. 479 pp.
- Olaya, V. (2020). Parte 3. Análisis en *Sistemas de Información Geográfica*. <https://volaya.github.io/libro-sig/index.html>
- Pérez-Briceño, P.M. (2017). Erosión en las playas del Pacífico de Costa Rica: análisis desde la perspectiva de gestión integral de áreas costeras tropicales. Tesis de Maestría, Gestión Integrada de Áreas Costeras Tropicales, Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José, Costa Rica. 185 p.
- Pérez-Briceño, P. M., & Lizano, O. G. (2021). Erosión costera y estabilidad de playas en Limón, Mar Caribe, Costa Rica. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, (1), 96-110.
- Pino, M., & González, C. (2008). Guía Práctica de geología costera y playas. En J. P. Bergoing G, & L. G. Brenes Quesada, *Prácticas de la Geografía* (Vol. 2, pp.119-138). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Quesada-Román, A., & Pérez-Briceño, P. M. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica. *Journal of maps*, 15(2), 363-371. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1600592>
- Quesada-Román, A. (2021). Review of the geomorphological effects of the 1991 Limón earthquake. *Revista Geológica de América Central*, (65), 370-395. <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v0i65.46697>
- Quesada-Román, A., & Peralta-Reyes, M. (2023). Geomorphological mapping global trends and applications. *Geographies*, 3(3), 610-621. <https://doi.org/10.3390/geographies3030032>
- Quesada-Román, A., Umaña-Ortíz, J., Zumbado-Solano, M., Islam, A., Abioui, M., Tefogoum, G. Z., Kariminejad, N., Mutaqin, B. W., & Pupim, F. (2023). Geomorphological regional mapping for environmental planning in developing countries. *Environmental Development*, 48, 100935.
- Smith, M. J., Paron, P., & Griffiths, J. S. (2011). *Geomorphological mapping: methods and applications* (Vol. 15). Elsevier.
- USDA. (1987). "Soil Mechanics Level I. Module 3: USDA Textural Soli Clasification, Study Guide."