













# Estudios y proyecciones de aumento en el nivel del mar y erosión costera para las dos costas del país, 2024

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.

Estos estudios forman 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.

# Estudios y proyecciones de aumento en el nivel del mar y erosión costera para las dos costas del país, 2024

I aumento del nivel del mar es un fenómeno inevitable y preocupante, tal como se detalla en el Sexto Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (AR6-IPCC). Desde 1900, el nivel medio global del mar ha aumentado aproximadamente 20 cm, con una aceleración notable en las últimas décadas. Las proyecciones indican que podría incrementarse hasta 1,01 m para el año 2100 si se mantienen altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Costa Rica, que cuenta con más de 1300 km de costa en los océanos Pacífico y Caribe, ya está experimentando los efectos de esta subida, incluyendo la erosión costera que amenaza ciudades como Puntarenas, Quepos y Golfito. Estos cambios exponen a estas áreas a inundaciones, pérdida de tierras, deterioro económico y migraciones forzadas. Este estudio se centra en analizar los impactos del aumento del nivel del mar y la erosión costera en dos regiones críticas: Caldera (Pacífico Central) y Manzanillo (Caribe). La metodología empleada incluye datos de alta resolución (escala de 1:5000 a 1:1000) y considera factores oceanográficos como El Niño, marejadas de huracanes y apilamiento de agua, así como ajustes isostáticos y tectónicos. Se proyectan escenarios para los años 2030, 2050, 2070 y 2100, evaluando tanto los impactos directos como indirectos sobre las infraestructuras, ecosistemas costeros (como manglares, arrecifes de coral y praderas marinas) y comunidades locales. Finalmente, la planificación a largo plazo basada en escenarios detallados es crucial para aumentar la resiliencia de las comunidades costeras, minimizar riesgos y conservar la biodiversidad ante el cambio climático. Este enfoque integral es esencial para asegurar la sostenibilidad y el bienestar de las generaciones futuras.

# Tabla de contenidos

contenido de riguras	
Contenido de tablas	<b></b>
Glosario	<b>9</b>
Acrónimos y siglas	12
1. Presentación de la guía	13
2. Justificación	
2.1 Importancia socioeconómica y ambiental	15
2.2 Disponibilidad de datos y relevancia nacional	15
3. Metodología	15
3.1 Generación de escenarios de inundación por aumento	
del nivel del mar	
3.1.1 Etapa 1: Levantamiento de campo	15
3.1.2 Etapa 2: Procesamiento de datos	16
3.1.3 Etapa 3: Generación del MED	
3.1.4 Etapa 4: Generación de productos finales	
3.2 Mapa geomorfológico	
3.3 Evolución de erosión costera	
3.3.1 Etapa 1: Levantamiento de perfiles de erosión	
3.3.2 Etapa 2: Granulometría de arenas	
3.3.3 Etapa 3: Perfil de equilibrio	
3.3.4 Etapa 4: Índice de erosidón y sedimentación costera (IE-SC)	
3.4 Análisis multicriterio	
3.4.1 Identificación de criterios	
3.4.2 Criterios para el análisis multicriterio	
3.4.3 Normalización de datos	
3.4.4 Ponderación de criterios	
4. Casos de estudio	25
4.1 Playa Caldera	
4.1.1 Delimitación espacial	
4.1.2 Escenarios de inundación por aumento del nivel del mar	
4.1.2.1 Principales resultados	
4.1.2.1.1.1 Modelo batimétrico	27
4.1.2.1.1.2 Oleaje	28
4.1.2.1.1.3 Resumen de parámetros posibles a utilizar en la	
elaboración de escenarios del nivel del mar	
4.1.2.2 Mareas máximas, apilamiento oleaje y ENOS	
4.1.3 Mapa geomorfológico costero de Playa Caldera	
4.1.4 Evaluación de la erosión costera	
4.1.5 Análisis multifactorial de las amenazas	49
4.1.6 Conclusiones	51

# Tabla de contenidos

4.1.7 Limitaciones	53
4.1.8 Recomendaciones	53
4.2 Playa Manzanillo	54
4.2.1 Delimitación espacial	54
4.2.2 Escenarios de inundación por aumento del nivel del mar	56
4.2.2.1 Principales resultados	56
4.2.2.1.1.1 Modelo batimétrico	56
4.2.2.1.1.2 Oleaje	57
4.2.2.1.1.3 Resumen de parámetros posibles a utilizar en la	
elaboración de escenarios del nivel del mar	
4.2.2.2 Mareas máximas, apilamiento oleaje y ENOS	
4.2.3 Mapa geomorfológico costero de Playa Caldera	
4.2.4 Evaluación de la erosión costera	
4.2.5 Análisis multifactorial de las amenazas	
4.2.6 Conclusiones	
4.2.7 Limitaciones	
4.2.8 Recomendaciones	
i. Bibliografía	
5. Anexos	
A. Lista de contactos o instituciones	
B. Cronograma	
C. Validación en campo del modelo en Puntarenas	
D. Productos iMares	
E. Cartografía de otros escenarios de aumento del nivel del mar	
i. Caldera	
ii. Manzanillo	90
Contenido de figuras	
Figura 1 Segmentos y perfiles de erosión de playas	19
	26
Figura 3 Batimetría de Caldera en 2D	
Figura 4 Modelo batimétrico y topográfico de Caldera	28
Figura 5 Variación de la altura de las marejadas (m) frente a Caldera	
(en agua profunda), Pacífico de Costa Rica, entre 2013 y 2024	28
Figura 6 Variaciones del período (seg) de las marejadas frente a Caldera, Pacífico de	
Costa Rica, entre 2013 y 2024	29
Figura 7 Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 1,4 m en	
proyectada a 2030 en Playa Caldera	34
Figura 8 Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 2,8 m en	٠,
proyectada a 2030 en Playa Caldera	34

<i>Figura 9</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3,29 m en	
proyectada a 2030 en Playa Caldera	35
<i>Figura 10</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 2,54 m proyectado al 2030 en Caldera	35
<i>Figura 11</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 3,94 m proyectado al 2030 en Caldera	35
Figura 12 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 4,43 m en proyectada a 2030 en Playa Caldera	35
Figura 13 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 2,67 m en proyectada a 2050 en Playa Caldera	36
Figura 14 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 4,07 m en proyectada a 2050 en Playa Caldera	36
<i>Figura 15</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 4,56 m en	
proyectada a 2050 en Playa Caldera	36
<i>Figura 16</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 2,84 m en proyectada a 2070 en Playa Caldera	36
Figura 17 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 4,24 m en proyectada a 2070 en Playa Caldera	37
<i>Figura 18</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 4,73 m en proyectada a 2070 en Playa Caldera	37
<i>Figura 19</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 3,18 m en proyectada a 2100 en Playa Caldera	37
<i>Figura 20</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 4,58 m en proyectada a 2100 en Playa Caldera	37
Figura 21 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 5,07 m en proyectada a 2100 en Playa Caldera	38
<i>Figura 22</i> Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS,	
apilamiento con una marea de 4,43 m proyectada a 2030	40
<i>Figura 23</i> Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS,	
apilamiento con una marea de 4,56 m proyectada a 2050	40
<i>Figura 24</i> Figura 24 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar,	
ENOS, apilamiento con una marea de 4,73 m proyectada a 2070	40
<i>Figura 25</i> Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS,	
apilamiento con una marea de 5,07 m proyectada a 2100	40
Figura 26 Mapa geomorfológico de playa Caldera	43
<i>Figura 27</i> Diques de arena en el Barrio Espíritu Santo	44
<i>Figura 28</i> Edificación abandonada debido a la erosión costera en Caldera	45
<i>Figura 29</i> Ubicación de los perfiles de playa	46
Figura 30 Curvas granulométricas para Playa Caldera	46
<i>Figura 31</i> Perfiles de playa levantados en campo y el perfil de equilibrio	
en Playa Caldera	47
<i>Figura 32</i> Evidencias de erosión costera en Caldera, 2024	48
<i>Figura 33</i> Índice de erosión y sedimentación Costera (IE-SC) en Caldera, 2024.	49
<i>Figura 34</i> Índice de amenazas multifactorial en Caldera, 2024	51

<i>Figura 35</i> Área de Estudio: Manzanillo	55
<i>Figura 36</i> Batimetría de Manzanillo en 2D	56
<i>Figura 37</i> Modelo batimétrico y de elevación digital en Playa Manzanillo	57
<i>Figura 38</i> Serie de alturas de ola mayores a 2.5m frente a Manzanillo entre el 2013 y	
2024	57
<i>Figura 39</i> Variación del periodo de ola (seg) frente a Manzanillo, Limón, Costa Rica	58
Figura 40 Escenarios Marea 0,15 m	61
Figura 41 Escenarios de Marea 0,36 m	61
<i>Figura 42</i> Escenarios ante el aumento del nivel del mar con una marea de 0,49 m	
proyectado al 2030, Manzanillo	61
Figura 43 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,32 m proyectado al 2030, Manzanillo	62
Figura 44 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,53 m proyectado al 2030, Manzanillo	62
<i>Figura 45</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,66 m proyectado al 2030, Manzanillo	62
Figura 46 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,45 m proyectado al 2050, Manzanillo	62
Figura 47 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,66 m proyectado al 2050, Manzanillo	63
Figura 48 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,79 m proyectado al 2050, Manzanillo	63
Figura 49 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,62 m proyectado al 2070, Manzanillo	63
<i>Figura 50</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,83 m proyectado al 2070, Manzanillo	63
<i>Figura 51</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,96 m proyectado al 2070, Manzanillo	64
Figura 52 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 1,96 m proyectado al 2100, Manzanillo	64
<i>Figura 53</i> Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 2,17 m proyectado al 2100, Manzanillo	64
Figura 54 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea	
de 2,30 m proyectado al 2100, Manzanillo	64
<i>Figura 55</i> Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS,	
apilamiento con una marea 1,66 m proyectada a 2030	66
<i>Figura 56</i> Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS,	
apilamiento con una marea 1,79 m proyectada a 2050	66
<i>Figura 57</i> Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS,	
apilamiento con una marea 1,96 m proyectada a 2070	67
<i>Figura 58</i> Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS,	
apilamiento con una marea 2,30 m proyectada a 2100	67
Figura 59 Mapa geomorfológico Playa Manzanillo	69

Figura 60 Ubicación de los perfiles de Playa en Manzanillo	69
Figura 62 Perfiles de playa y perfil de equilibrio para Manzanillo	
Figura 63 Evidencias de erosión costera en Manzanillo, 2024	
Figura 64 Índice de erosión y sedimentación costera para Playa Manzanillo	73
Figura 65 Índice de amenazas multifactorial Manzanillo, 2024	
Contenido de tablas	
Contenido de tablas	
Tabla 1 Tamices utilizados para la granulometría de arenas	19
Tabla 2 Niveles del Índice de erosión y sedimentación Costera (IE-SC)	
Tabla 3 Aumento del nivel del mar por escenario de concentración	
Tabla 4 Características del oleaje (en agua profunda) en caso de evento que produjo	
impacto en Caldera, identificados con videos o registros fotográficos	29
Tabla 5 Frecuencia mensual de marejadas desde direcciones S y SW en Caldera	
Tabla 6 Magnitudes de parámetros del oleaje al frente de Caldera	
Tabla 7 Magnitudes de parámetros y escenarios del nivel del mar al frente de Caldera	
Tabla 8 Combinaciones seleccionadas para generar los escenarios de inundación	
Tabla 9 Frecuencias mareas mayores a 3m y extraordinarias de 3,29m en el Pacífico	
Central	34
Tabla 10 Zonificación ante el aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento de oleaje	
para Caldera	
Tabla 11 Resultados D50 de las muestras de arena en Playa Caldera	47
Tabla 12 Categorías del índice de amenazas multifactorial para Caldera, 2024	
Tabla 13 Frecuencia mensual de oleajes altos (≥2,5m) en Manzanillo	
Tabla 14 Magnitudes de parámetros del oleaje al frente de Manzanillo	
Tabla 15 Magnitudes de parámetros al frente de Manzanillo	59
Tabla 16 Combinaciones seleccionadas para generar los escenarios de inundación en	
Manzanillo	60
Tabla 17 Frecuencias de mareas extraordinarias en el Mar Caribe	61
Tabla 18 Zonificación ante el aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento de oleaje	
para Manzanillo	65
Tabla 19 Resultados D50 de las muestras de arena en Playa Manzanillo	
Tabla 20 Categorías del índice de amenazas multifactorial para Manzanillo, 2024	



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>&gt;</b> A	
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.

\_\_

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.

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.

**ENOS** 



<b>E</b>	
erosión costera	El proceso de desgaste y retracción de las costas causado por la acción de las olas, corrientes, mareas y actividad humana.
geopackage	Es un formato de archivo universal construido sobre la base de SQLite, para compartir y transferir datos espaciales vectoriales y ráster.
inundación costera	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.
intrusión salina	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.
longitud de onda	Es la distancia horizontal entre dos crestas de ola sucesivas.
<b>M</b>	
manglares	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).
mareas	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.
marea astronómica	Se refiere al ascenso y descenso del nivel del agua producido exclusivamente por las interacciones gravitacionales entre la Tierra, la Luna y el Sol.
marea de sicigia	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.
marejada de fondo	Oleaje de formación remota que ha escapado de la tormenta que las forma.
modelos de elevación digital	Es la representación digital del terreno construido a partir de curvas de nivel o datos de elevación.
modelos de proyección del nivel del mar	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.



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

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

CRO5-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

RPAS Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT's)

SAGA-GIS Sistemas de Información Geográfica

SSP Ruta Socioeconómica Compartida, por sus siglas en inglés



# 1. Presentación

n el Sexto Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (AR6-IPCC) se menciona que el aumento en el nivel del mar es claro y alarmante. Desde 1900 a nivel mundial ha aumentado unos 20 cm y con una aceleración notable en las últimas décadas. Es prácticamente seguro que el nivel medio global del mar seguirá subiendo durante el siglo XXI. En relación con 1995-2014, el aumento probable del nivel medio global del mar para 2100 es de 0,28-0,55 m en el escenario de emisiones de GEI muy bajas (SSP1-1,9); de 0,32-0,62 m en el escenario de emisiones de GEI bajas (SSP1-2,6); de 0,44-0,76 m en el escenario de emisiones de GEI intermedias (SSP2-4,5); y de 0,63-1,01 m en el escenario de emisiones de GEI muy altas (SSP5-8,5) (IPCC, 2019).

Nuestro país ha sido testigo de los efectos del aumento del nivel de los océanos (Lizano, 1997; Lizano y Salas, 2001; Lizano, 2013), recordando su posición geográfica dentro del istmo centroamericano posee dos costas: Pacífica y Caribe, por lo que está expuesta a sus impactos en el futuro cercano. Como lo indica Díaz (1999), Costa Rica tiene más de 1100 km de línea de costa en el océano Pacífico y más de 200 km en el mar Caribe. Patrones de erosión desde leves, moderados y hasta severos ya se están viendo en las costas de Costa Rica, como lo señala Lizano (2013) y Lizano & Pérez-Briceño (2021), tanto en el Pacífico como en el Caribe.

Retomando las proyecciones del AR6, se esperaría que ciudades como Puntarenas, Quepos y Golfito sean inhabitables por ser sitios que presentan una topografía muy plana cercana al litoral, lo cual hace que se vean expuestos ante una serie de fenómenos como el aumento del nivel del mar que se puede traducir en zonas vulnerables ante la subida del mar, que causaría inundaciones, pérdida de tierras y erosión costera. Adicionalmente, puede existir una afectación sobre la economía local ocasionando la pérdida de biodiversidad marina y una disminución también del atractivo turístico, así como la productividad económica, lo que provocaría una disminución en la calidad de vida y una posible migración poblacional. Existen escenarios que fueron simulados en varias regiones de la costa Pacífica de Costa Rica, pero los niveles del mar trazados en la costa se hicieron con levantamientos topográficos poco precisos (Díaz-Andrade, 1999). Por esto, en este estudio se trabaja a una escala local entre 1:5000 a 1:1000 para generar productos de alta resolución espacial para la zona de Caldera (Pacífico Central) y Manzanillo (en la zona Caribe) del país.

Hay que reconocer que el aumento del nivel del mar no es un componente aislado, se debe tomar en cuenta la relación con otros fenómenos océano-atmosféricos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), marejadas de huracanes y el apilamiento del agua por el rompimiento del oleaje, así como forzantes externos como los son las mareas astronómicas altas y extraordinarias como las que se esperan para el 11 marzo y 18 setiembre del 2028 (Pugh, 2004). La superposición de distintos fenómenos puede lograr que el nivel del mar sea más alto de lo que se espera, justo como se verá más adelante en este estudio. Es por ello por lo que es imperativo tomar medidas de adaptación ante este tipo de fenómenos influenciados por el cambio climático.

Por otro lado, también existen posibles ajustes isostáticos en la costa, debido a movimientos tectónicos, como ocurrió con el terremoto de Limón de abril del 2001 (Denyer et al., 1994) y el terremoto de Guanacaste de setiembre del 2012 (Protti et al., 2014). De igual manera, diversos investigadores han propuesto un área de ruptura en la zona de Wadatti-Benioff que se extiende en superficie desde Marbella hasta Corozalito en Guanacaste, que puede estar relacionado con las diferencias de acumulaciones de esfuerzos quizás debidas a la segmentación de la placa Coco cerca de esta área con diferencias en las velocidades de crecimiento por adición de materia, como en los depósitos minerales o los continentes y el proceso de hundimiento de una placa litosférica bajo el borde de otra placa y subducción que deben ser tomados en cuenta para el ajuste del modelo como se profundizará en la metodología.

Con el fin de abordar esta problemática a una escala local, se presenta este estudio los escenarios de aumento del nivel del mar para los años 2030, 2050, 2070 y 2100, así como sus efectos en la costa y directamente en las playas arenosas que enfrentan la

erosión costera, tomando en cuenta los escenarios de última generación SSP y las condiciones locales de dos áreas específicas: Caldera (costa del Pacífico) y Manzanillo (costa Caribe). En el apartado siguiente se detalla la metodología, además de los casos de estudio con sus respectivos resultados, conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

Estos estudios son importantes en temas relacionados con la planificación de las zonas marino-costera, ya que permiten conocer las áreas susceptibles ante el aumento del nivel del mar. De acuerdo con los escenarios de última generación SSP, las comunidades costeras enfrentarán inundaciones más frecuentes por este aumento, así como problemas de erosión costera e intrusión salina en acuíferos o cultivos cercanos a estas áreas. Lo anterior puede poner en peligro las infraestructuras cercanas a estas áreas, sistemas de agua dulce, entre otros.

Otra de las problemáticas que puede traer el aumento del nivel del mar son los cambios y afectaciones que podrían presentarse en los ecosistemas costeros como manglares, arrecifes de coral, marismas y praderas fanerógamas que son vitales en procesos de conservación de la biodiversidad. Adicionalmente, estos ecosistemas funcionan como barreras de protección contra tormentas, así como para la captura del dióxido de carbono.

Dentro de las afectaciones debido al cambio climático, el aumento del nivel del mar es uno de los impactos más evidentes y directos que existen. Por lo anterior, es vital realizar estudios detallados como el presente, para que se pueda comprender la magnitud de la afectación, las tasas de aumento del nivel del mar y cuáles serán las zonas más impactadas en un mediano y largo plazo, de tal manera que sirvan como base científica para desarrollar estrategias efectivas de adaptación en estas zonas identificadas de mayor riesgo. Esto implicaría una planificación de la infraestructura costera tomando en cuenta la alta dinámica de la zona; realizar construcciones resilientes, gestión sostenible de los recursos costeros, y mejorar la planificación de los usos de la tierra, con la finalidad de minimizar la exposición y maximizar la resiliencia de las comunidades y los ecosistemas presentes en estas áreas.

Es importante resaltar que el aumento del nivel del mar es un proceso gradual que ocurre a lo largo del tiempo; no es algo que ocurre de un día para otro, es un aumento gradual dónde incide el derretimiento de los glaciares y el aumento de la temperatura del planeta, debido a los gases de efecto invernadero. El contar con estos escenarios de aumento del nivel del mar para los años 2030, 2050, 2070 y 2100 permite generar una planificación pensada a largo plazo que permita una mejor adaptación y mitigación de los impactos de estos fenómenos producidos por el cambio climático y la influencia antrópica. Estos plazos proporcionan una visión más amplia y permiten tomar medidas preventivas y proactivas, en lugar de respuestas reactivas ante los cambios repentinos que generan afectaciones. Adicionalmente, este tipo de estudios permiten mejorar los procesos de planificación a largo plazo; así como la toma de decisiones con base en datos de alta calidad, disponibles para identificar las áreas bajo amenaza y riesgo, con el fin de establecer metas para las comunidades afectadas y generar con ello una sensibilización y participación pública ante este tipo de fenómenos. Estos escenarios proporcionan una visión clara del futuro, al permitir una gestión efectiva y sostenible de las zonas costeras en el contexto del cambio climático.

# 2. Justificación

n este apartado se explicará la importancia de realizar estudios de la dinámica costera ante escenarios de aumento del nivel del mar, no solo abarcando las inundaciones, sino también otros procesos físicos como los cambios en la línea de costa y la erosión en las playas a escala local (1:1000 a 1:3000). Es importante señalar que cada costa tiene sus particularidades respecto de mareas, geomorfología y variables oceánicas, por lo que es necesario contar con estos estudios específicos para la toma de decisiones. Se hace la aclaración de que no es idóneo utilizar estudios de playas cercanas, ya que las condiciones pueden variar.



# 2.1 Importancia socioeconómica y ambiental

Afectaciones estructurales: Ambas áreas seleccionadas son vulnerables a eventos climáticos extremos y erosión costera, lo que amenaza la infraestructura y las comunidades locales.

Afectaciones socioeconómicas: Las actividades económicas como la pesca y el turismo dependen de la estabilidad de estas zonas costeras. Los impactos negativos pueden afectar los ingresos y el sustento de las comunidades.

Afectaciones ambientales: La biodiversidad única en estas áreas está en riesgo debido a la contaminación y la degradación del hábitat, lo que afecta la fauna, flora y la calidad de vida de las comunidades, al ver afectado su modo de vida por este tipo de amenaza costera, lo que eventualmente en ocasiones planteen el tema de migrar por el impacto que estos fenómenos tiene en su diario vivir.

# 2.2 Disponibilidad de datos y relevancia nacional

Datos previos disponibles: Se cuenta con información histórica sobre eventos oceanográficos, así como datos topográficos detallados, proporcionando una base sólida para la aplicación de la metodología propuesta, para ambos sectores de análisis.

Importancia socioeconómica: Las áreas seleccionadas tienen una relevancia económica significativa tanto local como nacionalmente, en especial Caldera, ya que se encuentra localizado el segundo puerto más importante del país y es vital para el comercio marítimo.

Diversidad ambiental: La rica biodiversidad presente en estas áreas destaca la importancia de abordar las afectaciones ambientales para la conservación de los ecosistemas marinos y terrestres.

# 3. Metodología

# 3.1 Generación de escenarios de inundación por aumento del nivel del mar

# 3.1.1 Etapa 1: Levantamiento de campo

e hará uso de los datos LIDAR con que cuenta la CNE para cada una de las zonas de interés (Manzanillo y Caldera), esto permitirá la obtención de modelos de elevación, de muy alta resolución espacial del orden de 25-10 cm. Estos datos son facilitados por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), consultado el 10 de enero de 2024 (https://www.cne.go.cr/). Como paso previo, se revisará y validará los datos LIDAR de acuerdo con la clasificación internacional de la ASPRS, se procederá a verificar la calidad y ajustar aquellos datos que se encuentren en la categoría de no clasificados y que correspondan a valores de terreno para tener la mejor nube de puntos disponible.

Con los datos filtrados, se procede a realizar el trabajo de campo, que permita realizar las mediciones del nivel del mar para cada uno de los sitios anteriormente mencionados y la batimetría de cada lugar. Con el uso de las predicciones de marea (Lizano, 2006), se establecerá la diferencia de la marea con el nivel "0" (cero) de referencia (marea de sicigia). Es importante aclarar que las diferencias de marea son distintas para cada una de las zonas de estudio. Adicionalmente, para cada playa se debe realizar el levantamiento de puntos de control terrestre (PCT) con un receptor geodésico que permita obtener las señales de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (en inglés GNSS) con respecto al "0" de marea. Con ello se obtiene alturas referidas al modelo



geoidal y elipsoidal en el que está el LIDAR, para realizar el ajuste en función al nivel "0" de marea (esto se propone debido a que el país aún carece de un modelo geoidal que sea dinámico). Esto permitirá generar una diferencia entre las alturas, lo que permite obtener un delta "Δ" que vendría a hacer la diferencia entre las elevaciones geoidales-elipsoidales con respecto al nivel "0" de marea de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta GE = GE2 - GE1$$

- ΔGE: diferencia geoidal-elipsoidal
- · GE2: geoide-elipsoide del punto conocido
- · GE1: geoide-elipsoide con respecto al nivel 0 de marea

La diferencia permite obtener lo que se conoce como el factor de ajuste necesario, para poder llevar los puntos de elevación conocidos a una superficie de referencia como lo es el "0" de mareas, de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$EF = \Delta GE - PCT$$

- EF: elevación final referida al 0 de marea
- ΔGE: diferencia geoidal-elipsoidal
- PCT: elevación punto control terrestre

En esta etapa, se debe realizar el mapeo geomorfológico para cada playa, así como obtener la batimetría, las estructuras. Asimismo, se debe realizar la medición de los cuatro perfiles de playa por cada sitio, así como la obtención de las muestras a procesar para valorar la erosión costera.

Los mapas geomorfológicos se realizan en tres fases: pre-mapeo, trabajo de campo y post-mapeo (Otto & Smith, 2013). En la primera etapa, utilizamos LIDAR y vuelos con drones para obtener un DEM detallado. Se elaborará una leyenda inicial basada en una clasificación morfogenética (Gustavsson et al., 2006), que separa las formas de relieve según su origen en formas de relieve fluviales o costeras, tanto erosivas como deposicionales. De ser posible, se extiende dicha geomorfología a partir de datos batimétricos a los primeros metros de relieve submarino. La descripción de cada forma de relieve parte de la clasificación morfogenética realizada en la primera leyenda preliminar. En la fase de trabajo de campo, se sale a campo para verificar los límites y procesos del relieve. Una vez finalizado el mapa geomorfológico final se acompaña de una leyenda que correlaciona los colores, según su génesis además de un documento explicativo de las formas y procesos que han formado y modelan las playas en estudio.

## 3.1.2 Etapa 2: Procesamiento de datos

Una vez obtenida la nube de puntos con la elevación corregida, se deben unificar los niveles de referencia topográficos y batimétricos, de manera que se obtenga en una sola capa para realizar el modelo de elevación requerido que sirva como base para obtener los distintos escenarios ante el aumento del nivel del mar en la etapa 3. En este punto se contará con la capa generada en la proyección CRTMO5 con el datum CRO5-SIRGAS. Es importante mencionar que el nivel "0" del mar (nivel de sicigias) al que se refirieron los datos fue establecido utilizando como referencia los datos de mareas de Puntarenas para el caso de Caldera (que es cómo se comportan las mareas para la zona del Pacífico Central del país). Se debe establecer un promedio entre el valor de



los datos dados por el LIDAR y los obtenidos en campo que sí tienen el nivel de referencia al "0" de la marea. Con ello se espera obtener la diferencia de altura a partir de los datos de campo (marea) y el punto base a nivel terrestre luego de realizar la medición y los ajustes respectivos. Este factor se debe restar a los puntos del LIDAR con el fin de homologarlos al nivel "0" del mar, que corresponde al promedio de sicigias (Lizano, 2006, 53; 2009, 19).

Para trabajar la información de mareas astronómicas se utilizará el software Tidal & Currents (Lizano, 2006, 53), cuyas predicciones incluidas en el programa van desde el año 1901 hasta el año 2099. En el caso de Limón se utilizan las predicciones de marea de Limón para establecer los valores de ajuste batimétricos y topográficos.

Para la construcción de los escenarios, se utiliza una combinación entre el modelo propuesto por Lizano (2010), Lizano y Lizano (2010), así como por Balstrøm (2024). Se construyen a partir de un ráster constante que contenga la información de la marea base más las otras variables como el aumento del nivel del mar, el ENOS y el apilamiento del oleaje. Luego de generarlos, se procede a realizar una resta mediante la técnica de álgebra de mapas sobre la superficie de terreno corregida al 0 de marea, con lo que posteriormente se reclasifican obteniendo con ellos las áreas inundables en el frente costero.

Es importante mencionar que el modelo ha sido validado para Puntarenas, donde se ha obtenido resultados que reflejan esta realidad y que se consigna en visitas a campos e informes aportados a la CNE (Ver Anexo C). Adicionalmente, el modelo se ha evaluado a través de otro software como el Coast de Blue Marble y del complemento INASAFE obteniéndose los mismos resultados.

En el caso del modelo Coast utiliza datos espaciales que representan la elevación del terreno y los activos que deben modelizarse, así como los escenarios del modelo vinculados específicamente a los datos espaciales. Los escenarios están definidos por tormentas, la subida del nivel del mar y las adaptaciones utilizadas para producir los resultados del modelo BlueMarble (consultado el 19 de mayo de 2024 https://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-25-1/COAST\_Topics/COAST\_Model.htm).

INASAFE es un proyecto (Inasafe.org) que se puso en marcha para proporcionar una herramienta a los gestores de catástrofes que quieren comprender cuáles serán las posibles repercusiones de una catástrofe. Inicialmente, las actividades se centraron en Indonesia, un país muy vulnerable a distintas catástrofes, como inundaciones, tsunamis, volcanes, terremotos y otras catástrofes localizadas, como corrimientos de tierras e incendios forestales. Con el tiempo, se ha trabajado también en la generación de modelos de peligro de inundación donde se ha probado y se ha obtenido los mismos resultados al modelo planteado en este documento. Se basa en una clasificación de peligros utilizada para definir un rango de umbrales de gravedad (clases) para una capa de peligros. La clasificación se utilizará para crear clases de datos que presenten cada una un nivel de peligro similar. Durante el análisis, se evaluará cada característica de exposición para determinar con qué clase de peligro coincide y, a continuación, se determinará si es probable que la característica de exposición se vea afectada por el peligro y de qué manera INASAFE (consultado el 19 de mayo de 2024 <a href="https://changelog.inasafe.org/en/inasafe/lesson/introduction-to-inasafe/detail/7/?q=1.4">https://changelog.inasafe.org/en/inasafe/lesson/introduction-to-inasafe/detail/7/?q=1.4</a>).

El modelo de inundación costera no utiliza la hidráulica de inundaciones, pero sí utiliza las formas costeras que aparecen en el modelo de elevación digital en las playas en un momento dado, entendiendo la dinámica costera existente y variable a lo largo del tiempo para cada área costera.

# 3.1.3 Etapa 3: Generación del MED

Una vez que se tienen los datos debidamente corregidos, se procederá a la generación de las distintas proyecciones de aumento del nivel del mar tomando como referencia los años 2030, 2050, 2070 y 2100. Para ello se utilizó el software de Información Geográfica "QGIS" (pueden hacer uso también de la solución de ArcGIS y ArcGIS Pro) que permitirá generar los modelos de mareas, asumiendo los aumentos del nivel del mar propuestos en esta metodología, según las Proyecciones del nivel del mar del IPCC (2021) u otros informes como el de la CEPAL (2012). Además, se usará la herramienta de las proyecciones de nivel del mar (Sea



Level Projection Tool), según el 6to Reporte de la Evaluación sobre las proyecciones del nivel del mar usando proyecciones medias del aumento del nivel del mar global y regional, en relación con una línea de base de 1995-2014. Se seleccionará un escenario promedio-alto, no extremo, según una Ruta Económica Compartida (SSP3-7.0: Shared Socioeconomic Pathway, ver Apéndice A), como una forma de esperar que las emisiones de CO2 no sean particularmente altas y también la de aerosoles, pero esto dependerá de las políticas públicas de los países.

Aunque se han seleccionado estos escenarios, es meritorio mencionar que existen escenarios para el año 2150 de esta misma ruta, cuyo promedio es de 1,31 m y su rango máximo de incertidumbre alcanza hasta los 1,82 m o más, según los modelos extremos. Es importante mencionar que se estaría incluyendo en las modelaciones las combinaciones que pueden existir referente al apilamiento del oleaje y ENOS.

### 3.1.4 Etapa 4: Generación de productos finales

Con base en lo generado, se termina de procesar en el software de información geográfica de código abierto y libre QGIS, así como en SAGA GIS para generar las superficies batimétrica-topográfica, las de nivel de marea (de referencia) y las que incorporan otras variables oceanográficas incluidas en este estudio como el aumento del nivel del mar, oleaje, ENOS y apilamiento del oleaje. Asimismo, dónde estarían incluidas las variables de geomorfología, estructuras, diques y que permitan generar con ello las capas finales de los escenarios de inundación y las curvas de inundación en formato shapefile y geopackage (total de 12 mapas para Caldera más 4 que incorporen apilamiento y ENOS, y además 8 para la zona de Manzanillo apilamiento y La Niña), la información se entrega en formato de cartografía estática y archivos editables.

# 3.2 Mapa geomorfológico

Los mapas geomorfológicos se realizan en tres fases: pre-mapeo, trabajo de campo y post-mapeo (Otto & Smith, 2013). En la primera etapa, utilizamos LIDAR y vuelos con drones para obtener un DEM detallado. Se elaborará una leyenda inicial basada en una clasificación morfogenética (Gustavsson et al., 2006), que separa las formas de relieve según su origen en formas de relieve fluviales o costeras, tanto erosivas como deposicionales. De ser posible, se extiende dicha geomorfología a partir de datos batimétricos a los primeros metros de relieve submarino. La descripción de cada forma de relieve parte de la clasificación morfogenética realizada en la primera leyenda preliminar. En la fase de trabajo de campo, se sale a campo para verificar los límites y procesos del relieve. Una vez finalizado el mapa geomorfológico final se acompaña de una leyenda que correlaciona los colores según su génesis además de un documento explicativo de las formas y procesos que han formado y modelan las playas en estudio.

## 3.3 Evaluación de erosión costera

# 3.3.1 Levantamiento de perfiles de erosión

Se hará uso de la metodología definida por Pino & González (2008) y utilizada por Pérez-Briceño (2017). Para cada playa se realizaron cinco perfiles para evaluar el estado general de la playa y así identificar las zonas más críticas por erosión costera. Se evaluó el área de estudio de cada playa y se determinó cuáles cinco perfiles serían representativos. 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. 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 1). 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, y así sucesivamente con todos los segmentos del



perfil (Pino & González, 2008). Esto permitirá la obtención de tablas en formatos X y Y 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.

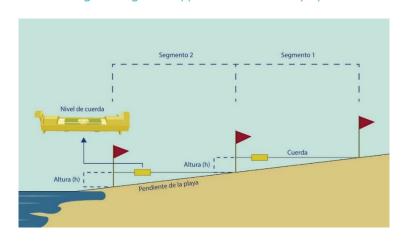


Figura 1 Segmentos y perfiles de erosión de playas

Elaboración propia, 2024

#### 3.3.2 Granulometría de arena

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). 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.

A partir de una granulometría de arenas, se determinó el porcentaje de arenas por tamaño de grano, para ello se utilizó un set de tamices ASTM. Las arenas van desde los 2mm hasta 0.063 mm, de acuerdo con Friedman & Sanders (1978). La Tabla 1 muestra el número de tamiz utilizado, el diámetro en milímetros y la descripción cualitativa de la arena. El tiempo de movimiento en el agitador fue de 15 minutos para cada muestra procesada. La granulometría fue contratada al Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. La presencia de granos gruesos en una playa generalmente indica un ambiente de alta energía. Las

**U.S. Departamento Tamiz** Milímetros 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

Tabla 1 Tamices utilizados para la granulometría de arenas

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



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.

### 3.3.3 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^(2/3), donde h es la profundidad del agua a una distancia x de la costa. A es un parámetro que depende en 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 (depositación) y está dada en 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:

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

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

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

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.

# 3.3.4 Índice de erosión y sedimentación costera (IE-SC)

Es una metodología que establece el grado de erosión presente en la playa de forma semi-cuantitativa (Cárdenes y Obando, 2006). Se evalua el paisaje en busca de evidencias de erosión costera que esté afectando la zona de interés, utilizando de referencia la Tabla 2.



Nivel	Descripción	Vegetación	Infraestructura	Físico-geológico
1	Erosión- sedimentación no apreciable	No presenta	a mayores modificaciones "equilib	rio 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	Está alejada al menos 5 m del límite	Terrazas pueden oscilar entre 50 cm y 1 m
		Vegetación de gran tamaño (>5 m) basculadas en el límite de la marea alta Raíces cortadas por acción marina	No se presenta en construcciones que tengan como fin la contención de los procesos de erosión- sedimentación costera	
4	Erosión- sedimentación fuerte	Fuerte exposición radicular, en algunos casos las raíces han sido eliminadas y solo queda la parte cercana al tronco	Fuerte posibilidad de ser afectada si la erosión se mantiene o aumenta	Terrazas pueden oscilar entre 1 m y 1.5 m
		Vegetación de gran tamaño (>5 m) se encuentra tumbada a lo largo de la zona intermareal e incluso removida hacia el mar	Se utilizan sistemas de estabilización costera (diques de sacos de arena, muro de roca coma chatarra, llantas, muros de cemento, gaviones)	
5	Erosión- sedimentación muy fuerte	Sistemas radicales se encuentran rotos, totalmente expuestos y desarticulados	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	Terrazas >1.5
		El sustrato de las palmeras y árboles adultos (>5 m) están socavados tumbados y removidos por las corrientes	Las bases de la infraestructura son falseadas, hay colapso de techos y paredes llegando incluso a la pérdida total de la infraestructura	

Elaboración propia.



#### 3.4 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio es una técnica que permite evaluar diversas alternativas en función de múltiples criterios, cada uno de los cuales puede tener diferentes niveles de importancia o ponderación. En este contexto, se emplea para evaluar la amenaza costera considerando criterios ambientales clave, como la batimetría, la topografía, las mareas, el oleaje, el nivel del mar, la geomorfología y la erosión costera. Estos criterios se identificaron y normalizaron para permitir comparaciones entre ellos; luego, se les asignan ponderaciones, según su importancia relativa en la evaluación de la amenaza en función del criterio experto emitido por el grupo de trabajo.

#### 3.4.1 Identificación de criterios

Lo primero será la identificación de criterios ambientales, que se base en la identificación de elementos físicos que están presentes en la zona costera de estudio, donde destacan los siguientes:

- batimetría
- topografía
- mareas (máximas, extraordinarias, ENOS, apilamiento)
- oleaje
- · nivel del mar (calentamiento global)
- erosión costera
- · geomorfología

### 3.4.2 Criterios para el análisis multicriterio

#### a. Criterios ambientales

- **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.
- **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).
- c. Mareas: Se utilizan 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.
- d. Oleaje: Otra de las variables será 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.
- e. Nivel del mar (calentamiento global): Se tomará 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 Ruta Socioeconómica Compartida (SSP) que indica que para un SSP3-7.0 (escenario con alta concentración de CO2, pero no extremo) tiene las siguientes proyecciones para Puntarenas y Limón (ver Tabla 3).



Tabla 3 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

Elaboración propia.

- **f. Geomorfología:** Se procederá 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 riesgos como deslizamientos de tierra y erosión costera.
- g. Erosión costera: Se realizará 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.

#### 3.4.3 Normalización de datos

Posterior a lo anterior se procede a la normalización de los datos para cada criterio con el fin de que estén en una escala común (1 a 5, siendo uno el menor grado y 5 el mayor) y que sean comparables entre sí.

#### 3.4.4 Ponderación de criterios

La ponderación de estos criterios se da a partir del intercambio del criterio experto de los miembros que forman parte del equipo técnico seleccionado para el presente estudio, por lo que las ponderaciones siguientes se dan en función su importancia relativa en la evaluación de la amenaza.

#### Datos normalizados y ponderaciones asignadas

- 1. Criterios ambientales
  - a. Topografía: 10% (normalizado: 0.1)
  - c. Mareas 40%:
    - Mareas máximas y extraordinarias: 10% (normalizado: 0.1)
    - Eventos ENOS (El Niño Oscilación del Sur): 10% (normalizado: 0.1)
    - Apilamiento: 10% (Normalizado: 0.1)
    - Nivel del mar (calentamiento global): 10% (normalizado: 0.1)
  - d. Oleaje: 15% (normalizado: 0.15)
  - f. Geomorfología: 20% (normalizado: 0.2)
  - g. Erosión costera: 15% (normalizado: 0.15)



Oleaje (0.15)

Geomorfología (0.20)

#### Propuesta de elección de ponderaciones

**Topografía (0.10)**Se define una ponderación del 10%, para reconocer su relevancia en la identificación de áreas vulnerables en la parte costera.

Mareas (0.40)

Se asigna una ponderación del 40% ya que refleja la importancia de estos factores en la evaluación del riesgo costero. Se toma en cuenta las mareas, especialmente las máximas y extraordinarias, así como los eventos ENOS y el apilamiento, pueden aumentar el riesgo de inundaciones costeras, así como el aumento del nivel del mar debido al calentamiento global aumentando con ello la vulnerabilidad costera.

Se define una ponderación del 15% refleja su influencia en la evaluación del riesgo costero.

Se propone la asignación de una ponderación del 20% con el fin de reflejar su influencia en la evaluación del riesgo costero.

**Erosión costera (0.15)**Una ponderación del 15% refleja su importancia en la evaluación del riesgo costero.

En este caso, se ha normalizado los valores de ponderación para que estén en una escala entre 1 a 5, donde 5 representa la máxima importancia y 1 la mínima. Estos valores normalizados pueden variar en función de la importancia relativa de cada criterio en su contexto específico, y pueden ser ajustados según las preferencias y necesidades de los interesados en la gestión del riesgo.

Finalmente se hará uso de la siguiente fórmula de superposición ponderada utilizando el software QGIS.

### Resultado = 0.40 x A + 0.20 x B + 0.15 x C + 0.15 x D + 0.10 x E

#### Donde:

- A: Capa que contiene la información zonificada que contenga: ENOS, apilamiento de oleaje, la marea base y el 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 proporcionará una manera sistemática de evaluar la amenaza para cada sitio de estudio, lo que facilitará la identificación de áreas críticas que requieren atención prioritaria en temas asociados a la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial.

Si cuentan con alguna licencia de ArcGIS pueden realizar el proceso a través de la herramienta Weighted Overlay Analysis que se encuentra dentro de las herramientas de análisis espacial.



#### **Beneficios adicionales**

Con el uso de la 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).

# 4. Casos de estudio

# 4.1 Playa Caldera

### 4.1.1 Delimitación espacial

Caldera es una localidad ubicada en la provincia de Puntarenas, en la costa del Pacífico de Costa Rica. Se encuentra a aproximadamente 30 kilómetros al sureste de la ciudad de Puntarenas.

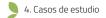
La economía de Caldera está principalmente impulsada por el puerto de Caldera, uno de los puertos más importantes del país. El puerto maneja una gran cantidad de carga comercial, incluyendo productos agrícolas, minerales y mercancías generales. Además, el turismo también juega un papel significativo en la economía local, con atracciones como playas y actividades acuáticas (Arias et al., 2019).

El puerto de Caldera tiene una historia que se remonta a la época colonial, cuando era un punto de desembarque importante para el comercio y la comunicación con otras regiones. En las últimas décadas, ha sido modernizado para manejar el creciente volumen de comercio internacional (INCOP, 2024).

La región de Caldera es rica en biodiversidad, con ecosistemas marinos y costeros que albergan una variedad de especies de flora y fauna. Las áreas cercanas incluyen manglares, playas y arrecifes de coral, que son vitales para la conservación de especies marinas y aves migratorias.

El puerto de Caldera está bien desarrollado, con instalaciones modernas para el manejo de carga y contenedores. Además, se localiza infraestructura turística básica, como hoteles, restaurantes y servicios de transporte que facilitan el acceso a las atracciones locales (Sociedad Portuaria Puerto Caldera, 2024).

En la Figura 2 se puede apreciar la ubicación del área de estudio, que se puede dividir en sectores a los que se hará referencia a lo largo del documento y ayudará al lector a ubicarse en el contexto espacial. Para iniciar, en el norte se encuentra "cerca del acantilado", conocido localmente como La Cueva o El Vivero, que es una zona donde la playa es corta y hay acumulaciones grandes de arena con una pendiente fuerte hacia la playa, la vegetación es escasa y se encuentra limitada por la roca del acantilado. El segundo sector hacia el sur se ubica el barrio Espíritu Santo, que es donde se encuentran casas y un par de canchas de futbol abandonadas, las cuales se pueden identificar por la presencia de los marcos de portería, y ruinas de casas. Seguidamente, se encuentra el sector más crítico actual de Caldera donde en ocasiones se ve afectado por el oleaje. En esta área la Municipalidad



de Esparza ha colocado grandes rocas calizas como medida de contención y de protección a la ruta 23. Continuando hacia el sur, hay todo un sector al oeste de la ruta 23 donde se localizan ventas ambulantes en su mayoría ofreciendo "churchill", caldosas, entre otros. Finalmente, el último sector "antes del puente" es una zona de acumulación de arena y se encuentra muy cerca del puerto de Caldera. En esta zona se construyó un parqueo con baños públicos que es administrado por la Cruz Roja Costarricense.



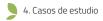
Figura 2 Área de estudio playa Caldera

**Datos propios. CC-BY-NC** 

de Esparza ha colocado grandes rocas calizas como medida de contención y de protección a la ruta 23. Continuando hacia el sur, hay todo un sector al oeste de la ruta 23 donde se localizan ventas ambulantes en su mayoría ofreciendo "churchill", caldosas, entre otros. Finalmente, el último sector "antes del puente" es una zona de acumulación de arena y se encuentra muy cerca del puerto de Caldera. En esta zona se construyó un parqueo con baños públicos que es administrado por la Cruz Roja Costarricense.

# 4.1.2 Escenarios de inundación por aumento del nivel del mar

En esta sección se presentan los escenarios ante el aumento del nivel del mar para la zona de playa Caldera en el Pacífico Central de Costa Rica para los años 2030, 2050, 2070 y 2100. Estos escenarios son el resultado de lo que se proyecta actualmente que podría llegar a ocurrir bajos distintas condiciones ambientales. La información aquí presentada es un insumo clave para toma de acciones en el plano del reordenamiento territorial, la planificación urbana y la toma de decisiones a nivel costero y nacional, ya se basa en evidencia y datos científicos.



#### 4.1.2.1 Principales resultados

Dentro de los principales resultados se tiene un modelo de elevación digital (MED) de muy alta resolución (a nivel de cm). Este MED permitió obtener la geomorfología costera, así como diversos escenarios ante el aumento del nivel del mar para la zona de playa Caldera y la combinación de otros fenómenos como el ENOS y el apilamiento del oleaje. Además, se generaron cuatro mapas de zonificación ante el aumento del nivel del mar en combinación con las variables de ENOS y apilamiento de oleaje. Todo esto es información base que debe incorporarse en temas de planificación urbana y reordenamiento territorial. Además, para Caldera la mayor elevación se tiene sobre la carretera conectada con una elevación de 156,08 m sobre el nivel 0 establecido en este estudio. Este punto está al este del frente costero de la playa sobre la formación de Roca Carballo. La altura topográfica promedio para playa Caldera es de 32,25 m. A continuación, se detallarán los resultados obtenidos a partir de las mareas máximas considerando la influencia del aumento del nivel del mar, el ENOS y el apilamiento del oleaje.

#### 4.1.2.1.1 Modelo batimétrico

Los resultados de los muestreos de profundidad en Caldera se muestran en la siguiente Figura 3 (cuyos valores de las curvas batimétricas están en metros). Con estos sondeos se elaboró un modelo de elevación digital (representación gráfica en 2 dimensiones), que por un lado permiten evaluar la pendiente del fondo marino y su relación con el ataque del oleaje en el borde costero, así como también las posibles fuentes de arena frente a esa zona. Se nota una región con una pendiente muy fuerte en el borde costero y más regular hacia la parte más profunda. Como se menciona más adelante, está pendiente muy pronunciada que tiene toda la playa es una de las causas por las que esta playa no tiene el amortiguamiento necesario de oleaje en caso de eventos extremos.

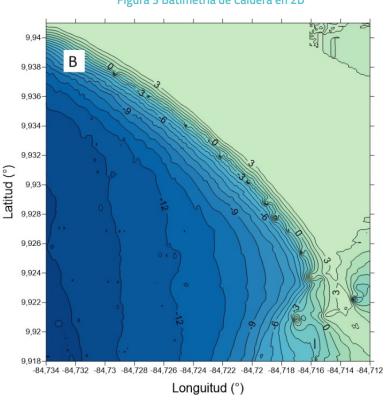
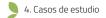


Figura 3 Batimetría de Caldera en 2D



La Figura 4 muestra la unión del modelo batimétrico con el de elevación digital. Los modelos poseen diferente resolución espacial, pero se homologó a 20 metros para dar una idea de la morfología del lugar.

Modelo batimétrico-topográfico, Caldera

Simbología

Via pública

Batimetría-Topografía

156.31

14.5

Escala 1:21,000

Datum: CRIMOS
Datum: C

Figura 4 Modelo elevación y profundidad de Caldera

**Datos propios. CC-BY-NC** 

#### 4.1.2.1.2 Oleaje

La serie de alturas del oleaje y tipo marejada de fondo para Caldera se muestra en la Figura 5. En la figura también se muestra la línea de tendencia y la ecuación de esa línea.

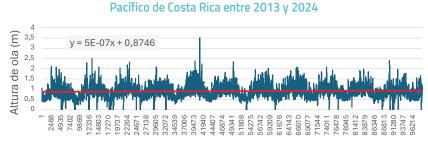


Figura 5 Variación de la altura de las marejadas (m) frente a Caldera (en agua profunda),

Número de valores horarios

**Fuente: NCEP-NOAA** 



Como se ve desde el gráfico y de la ecuación insertada de la tendencia, la serie no tiene una tendencia positiva significativa, es decir, **no hubo un aumento de la altura de ola en esos últimos 10 años**. La altura máxima de esa serie (3,51m) fue generada el 6 de octubre de 2017 tras el paso de la tormenta tropical Nate por el mar Caribe de Costa Rica.

Nota la línea de tendencia desprecia todos los valore bajos de 0,8746, si se cuentan picos son más los altos desde esta línea que los bajos, quizás lo anterior se ajusta a un análisis de promedios móviles u otra función cuadrática de ajuste.

La serie de períodos de ola, que es el tiempo que hay entre cresta y cresta, se muestran en la Figura 6.

Período de ola (Seg)

Número de valores horarios

Período de ola (Seg)

Número de valores horarios

Período de ola (Seg)

Número de valores horarios

Figura 6 Variaciones del período (seg) de las marejadas frente a Caldera, Pacífico de Costa Rica entre 2013 y 2024

Fuente: NCEP-NOAA

Esta serie muestra una ligera tendencia negativa de los períodos de las olas que no es significativa para el estudio. En el dado caso, si fuese muy fuerte, indicaría que está cambiando la forma del oleaje que está llegando a la costa y eso si tuviese consecuencias para la dinámica de Caldera. Se realizó un muestreo de la evidencia de oleajes utilizando videos disponibles a través de fuentes varias como las cámaras del MIO-CIMAR, otros medios digitales y redes sociales como Facebook y de medios de prensa entre 2002 y 2024, en los cuales se pudo identificar un evento de oleaje que se saliera en la carretera. Todos los casos que muestra la tabla fueron los eventos en los que el oleaje produjo algún impacto, se asociaron a las características de oleaje respectivas y se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4 Características del oleaje (en agua profunda) en caso de evento que produjo impacto en Caldera, identificados con videos o registros fotográfico

Año	Mes	Día	Aprox hora	Hs(m)	Tp(seg)	Az(°)	Hmarea	Comentario
2002	05	27	18:00	2.25	14.0	190	3.1	Se destruye el rompeolas de Caldera
2007	06	25	18:00	2.35	15.0	192		Olas enormes en Palo Seco
2009	06	22		2.0	16	180	2.9	
2012	08	04	16:22	1.8	16.5	187	2.9	
2014	07	04	07:25	2.0	21.0	194	2.5	Olas enormes en Caldera



Año	Me	es Día	Aprox hora	Hs(m)	Tp(seg)	Az(°)	Hmarea	Comentario
201	5 05	5 13	09:37	1.4	18.0	205	2.5	
201	7 08	3 14	07:03	1.46	12.1			
202	3 05	5 21	16:22	1.7	15.0	192	2.82	
202	3 05	5 23	17:40	1.27	17.0	193	2.6	
202	3 05	5 28	07:57	2.26	16.5	195	2.2	
202	3 06	5 07		0.67	6.35	175		
202	3 06	5 11		1.05	14.5	192	3.2	
202	3 09	02		0.9	8.6	189	3.06	
202	4 03	3 12	18:45	1.3	17.0	190	3.2	
202	4 04	10	18:02	1.42	15.0	195	3.18	
202	4 06	06	12:00	1.5	15.0	225	2.95	No hubo impacto

**Donde:** Hs es la altura significativa de ola, **Tp** es el período de ola, **Az** es la dirección desde donde vienen las olas con respecto al norte, **Hmarea** es la atura de la marea máxima para ese día.

Como lo muestra la Tabla 4, la mayoría de los eventos que produjeron algún impacto en la playa de Caldera, están con ángulos (Az) de entre 175 a 195° con respecto al norte; esto es en direcciones del oleaje desde el sur (S) y sur-suroeste (SSO). Una vez identificado que la dirección de las olas que producen impacto en Caldera es principalmente de dirección sur-suroeste (SSO), se filtró el registro de marejadas de fondo de esas direcciones para estudiar la frecuencia y características mensuales de esos eventos. La Tabla 5 resumen esas estadísticas.

Tabla 5 Frecuencia mensual de marejadas desde direcciones S y SW en Caldera

Año	N. de eventos	Condición
2013	13	
2014	77	El Niño + intenso
2015	39	El Niño + intenso
2016	0	La Niña leve
2017	29	La Niña leve
2018	0	El Niño leve
2019	0	El Niño leve
2020	0	La Niña medio
2021	13	La Niña medio
2022	0	La Niña medio
2023	37	El Niño fuerte
2024 (hasta Junio)	0	El Niño fuerte

Elaboración propia, 2024



Como muestra la tabla anterior, muchos eventos se dieron alrededor de 2014 y 2015. El otro período importe de eventos fue en 2023 (NOAA, 2024), se deduce que estas frecuencias tienen un mayor número de eventos alrededor de fenómenos El Niño, catalogados como eventos intensos (BBC, 2019) y en menor medida, en fase La Niña.

Utilizando los valores estadísticos de la serie de las alturas significativas de las marejadas de fondo que alcanzan Caldera y un programa open source en línea (swellbeat.com) para calcular algunos parámetros de oleaje asociado (que se van a utilizar en los escenarios de nivel del mar, como SO en la Tabla 6), se obtuvieron los siguientes resultados. Algunos de estos parámetros de los artículos de Lizano y Lizano (2010 y 2020) fueron actualizados para este proyecto y se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6 Magnitudes de parámetros del oleaje al frente de Caldera

Parámetro	Valor	
Hs (promedio)	2,2m	
Hmax	2,5 m	
Tp (promedio)	16,9 seg	
Tp (máximo)	20,0 seg	
НЬ	2,93 m	
hb	4,84 m	
Sw	0,73m	

#### Donde:

- Hs (promedio): altura de ola significativa promedio
- Hmax: altura de ola 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

#### 4.1.2.1.3 Resumen de parámetros posibles a utilizar en la elaboración de escenarios del nivel del mar

Con los resultados anteriores y utilizando información adicional que se encontró en la literatura (como el aporte sobre el nivel del mar de El Niño en 2024), se elaboraron los principales componentes oceanográficos que va a ser utilizados en los escenarios de nivel del mar y que contribuyen al aumento del nivel del mar en Caldera durante eventos de oleaje alto.

Los siguientes son los valores calculados para Caldera en el Pacífico de Costa Rica (Tabla 7).



Tabla 7 Magnitudes de parámetros y escenarios del nivel del mar al frente de Caldera

Parámetro	Valor
Marea promedio	1,40 m
Marea alta	2,80 m
Marea máxima	3,29 m
El Niño	0,30 m
Apilamiento de oleaje	0,73 m
Nivel del mar 2050	0,24 m
Nivel del mar 2100	0,75 m

Fuente: elaboración propia

El valor especificado como marea alta es el valor promedio de las mareas altas de sicigias (Lizano, 2006), nivel considerado como límite superior promedio que alcanzan las mareas más altas en un registro de al menos 20 años. Por ejemplo, en Puntarenas se calculó los años comprendidos entre 1949 y 1970, pero puede ser cualquier periodo de 20 años.

El aumento del nivel del mar del componente de El Niño se obtuvo de Lizano (1997) y con observaciones que se realizaron en Quepos durante la fase de El Niño de 1998 (Lizano y Salas, 2001). Este valor es reforzado por los niveles del mar reportados en Ecuador para El Niño del 2023, donde se midieron 40 cm como aumento adicional del mar debido a este fenómeno (Belliard et al. 2013). Como Costa Rica está un poco (10°) al norte del ecuador geográfico y con anomalías de temperatura superficial del mar que fueron de alrededor de 1° menos que las registradas en Ecuador (país). Es razonable el valor que se ha seleccionado para nuestra región (0,30m), ya que el aumento del nivel del mar que se dio en todo el Pacífico tropical.

Para el cálculo del apilamiento de oleaje debido al rompimiento de oleaje en la costa se utilizó la ecuación (Sw= 5/6 Hb, donde y= 0,73) actualizada y publicada en (Hedges y Mase, 2004). Particularmente para Caldera, este valor podría ser mayor que el dado en el Tabla 7, debido a la gran pendiente de la playa y a la reflexión del oleaje que se da en esa pendiente y en el muro de rocas de contención que se construyó en la parte más vulnerable de la playa y carretera.

Los escenarios del nivel del mar se obtuvieron de los escenarios del IPCC (2021) según los escenarios de la Ruta Socioeconómica Compartida (SSP, por sus siglas en inglés) que indica que para un SSP3-7.0 (escenario con alta concentración de CO2, considerado de medio a alto, pero no extremo como el SSP-8.5) tiene las proyecciones para el 2050 y 2100 que se indican en la Tabla 7. Por supuesto, tal y 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 es posible que los valores sean mayores.

#### 4.1.2.2 Mareas máximas, apilamiento oleaje y ENOS

Para este trabajo, se utilizan las mareas máximas cuyos valores son de 1,4 m que es la marea promedio, así como 2,80 m (mareas comunes para la zona del Pacífico Central costarricense y que suceden varias veces al año). El nivel de 2,80 m es el nivel de marea



astronómica límite al borde de la vegetación en los lugares estudiados y que, con otro proceso oceánico adicional que aumente, puede inundar la zona. El nivel de 3,29 m es la marea astronómica máxima para esta región y se considera un nivel que ya inunda las zonas bajas de esta región, como se muestra más adelante, y que, por supuesto, con algún fenómeno océano-meteorológico adicional produce mayor impacto en la región.

Adicionalmente, se incluyó el fenómeno de El Niño que induce un aumento del nivel del mar de 0,30 m en promedio y un apilamiento del oleaje (causado por tormentas que ocurren en el Pacífico Sur de nuestro planeta) que inducen un aumento de otros 0,73 m en función de las mareas.

Lo anterior permitió generar múltiples escenarios para la zona de estudio a partir de estos dos niveles de mareas astronómicas: nivel "0", nivel promedio de referencia (2,80 m) y marea extraordinaria (3,29 m), sumado a las distintas combinaciones de componentes mareográficos, en este caso, como el aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento del oleaje. Los escenarios se obtienen a partir de aquellos niveles ante el aumento del nivel del mar que tienen potencial de inundación para la zona de estudio. Las combinaciones seleccionadas de estos niveles se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8 Combinaciones seleccionadas para generar los escenarios de inundación

Año	Marea (m)	Niño (m)	Apilamiento (m)	Aumento del nivel del mar por cambio climático (m)	Marea + Niño + apila- miento + aumento (m)
2030	1,4	0,3	0,73	0,11	2,54
2030	2,8	0,3	0,73	0,11	3,94
2030	3,29	0,3	0,73	0,11	4,43
2050	1,4	0,3	0,73	0,24	2,67
2050	2,8	0,3	0,73	0,24	4,07
2050	3,29	0,3	0,73	0,24	4,56
2070	1,4	0,3	0,73	0,41	2,84
2070	2,8	0,3	0,73	0,41	4,24
2070	3,29	0,3	0,73	0,41	4,73
2100	1,4	0,3	0,73	0,75	3,18
2100	2,8	0,3	0,73	0,75	4,58
2100	3,29	0,3	0,73	0,75	5,07

Fuente: Elaboración propia. \*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.

La Tabla 9 muestra la frecuencia de las mareas más alta que se pueden esperar para el 2050 y el 2100 comparado con un estudio del 2000 al 2020, es decir, un periodo de 20 años.



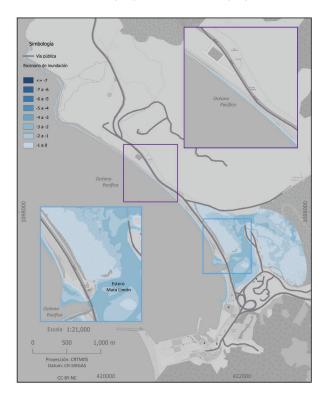
Tabla 9 Frecuencias mareas mayores a 3m y extraordinarias de 3,29m en el Pacífico Central

Altura de marea	Histórico (actual)	2050	2100
≥ 3,00m	42,3	391	1141,7
≥ 3,29m	4,25	90,5	776,1

Nota: los datos están indicados en veces por año.

Las figuras de las 7 a la 9 corresponden a las mareas sin aumento, ni ENOS ni apilamiento de oleaje para el área de estudio para el 2030. A partir de la Figura 10, Figura 11 y Figura 12, se tiene los escenarios tomando como base las mareas indicadas en la Tabla 8 con aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento de oleaje para el año 2030. Bajo los mismos escenarios se tienen la Figura 14 y Figura 15 que muestran los respectivos para el año 2050. La Figura 16, Figura 17 y Figura 18 muestran para el año 2070 y finalmente las Figura 19, Figura 20 y Figura 21 para el año 2100. Es importante mencionar que estos escenarios son creados a partir de los valores indicados en la Tabla 6 (marea + El Niño + apilamiento + aumento).

Figura 7 Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 1,4 m en proyectada a 2030 en playa Caldera



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 8 Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 2,8 m en proyectada a 2030 en playa Caldera

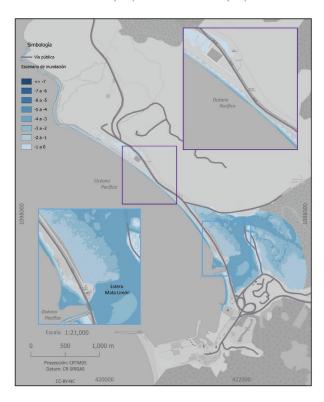
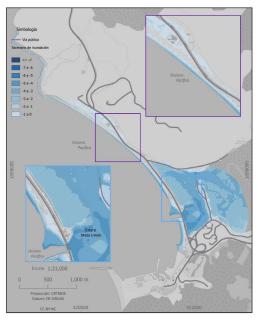
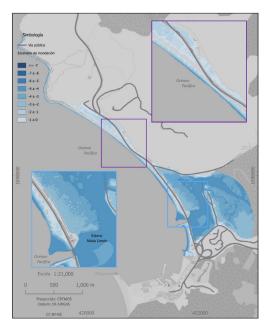


Figura 9 Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3,29 m en proyectada a 2030 en playa Caldera



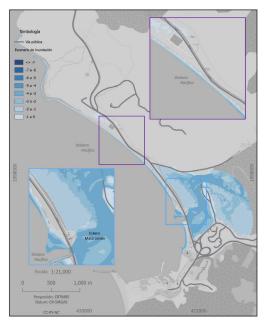
Datos propios. CC-BY-NC

Figura 11 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 3,94 m proyectado al 2030 en Caldera



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 10 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 2,54 m proyectado al 2030 en Caldera



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 12 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 4,43 m en proyectada a 2030 en playa Caldera

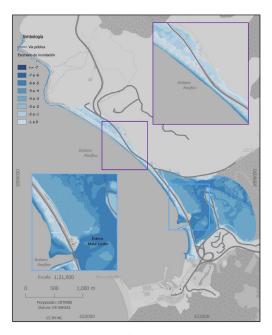
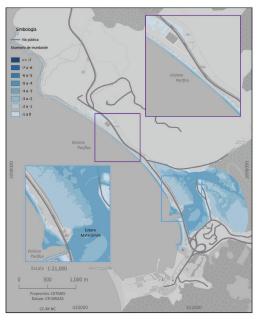
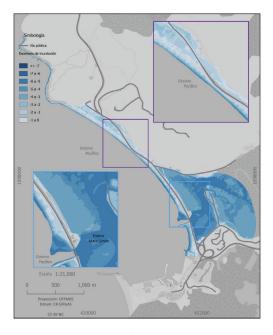


Figura 13 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 2,67 m en proyectada a 2050 en playa Caldera



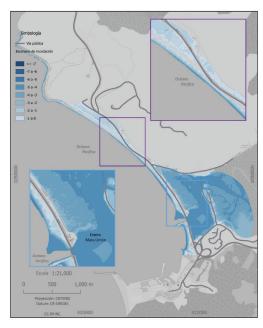
Datos propios. CC-BY-NC

Figura 15 Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 4,56 m en proyectada a 2050 en playa Caldera



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 14 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 4,07 m en proyectada a 2050 en playa Caldera



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 16 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 2,84 m en proyectada a 2070 en playa Caldera

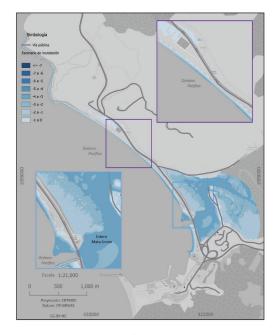
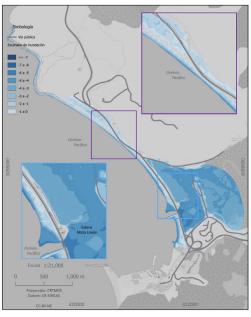
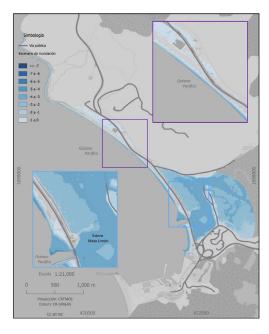


Figura 17 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 4,24 m en proyectada a 2070 en playa Caldera



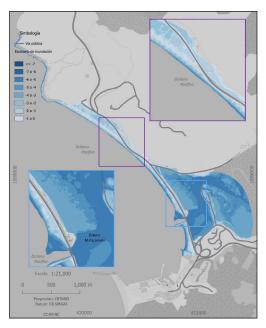
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 19 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 3,18 m en proyectada a 2100 en playa Caldera



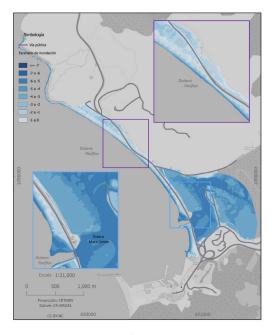
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 18 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 4,73 m en proyectada a 2070 en playa Caldera



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 20 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 4,58 m en proyectada a 2100 en playa Caldera





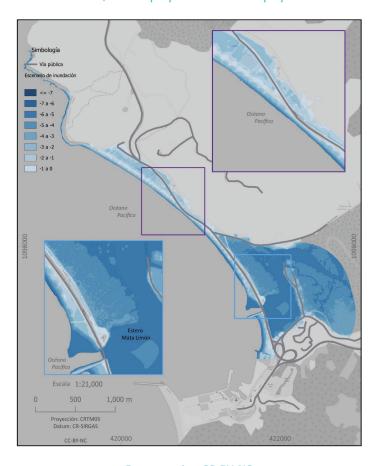
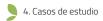


Figura 21 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 5,07 m en proyectada a 2100 en playa Caldera

**Datos propios. CC-BY-NC** 

Los escenarios anteriores muestran las áreas de estudio que son más propensas a inundación ante el aumento del nivel del mar y la asociación con fenómenos como el apilamiento del oleaje (tren de olas de tormentas en mar abierto) y el fenómeno del ENOS (El Niño). Algunos de estos fenómenos son recurrentes año tras año (como el caso del apilamiento) o en un período específico, como el de El Niño, ya que puede variar el período y su intensidad, lo que puede ocasionar aumento del nivel del mar por la expansión térmica del océano entre 30 cm en un evento de El Niño moderado o hasta 60 cm en un evento fuerte o extremo. Para el caso de playa Caldera, estas áreas son las cercanas a los esteros (la primera se encuentra sobre el estero de Mata de Limón). Luego se tiene todo el frente costero que se vería impactado generando aún mayor desequilibrio por erosión costera, lo que pone en peligro gran parte del tramo de la ruta 23 en este sector. Las principales afectaciones resultarían en mareas mayores a 3,94 m a partir del 2030 en combinación con oleajes de largos períodos (muy energéticos). Otro sector de importancia se ubica hacia la comunidad de Caldera por la cancha de fútbol de la comunidad, un área crítica ante este tipo de fenómenos. Es probable que la vía principal tenga una mayor afectación hacia el 2030 por una marea de 4,43 m y en posteriores años de acuerdo con las proyecciones. Para 2100 se tendría una marea de 5,07 m, cuyo impacto se vería sobre todo el frente de la playa, iniciando en el estero de Mata de Limón hasta la comunidad de Caldera (la secuencia de lo anterior queda reflejado a partir de las figuras 21 a la 24).

Generalmente el proceso de llenado (ascenso de la marea más el resto de los componentes como ENOS, apilamiento y aumento del nivel del mar) se ve favorecido por la entrada de los esteros ocasionando un desbordamiento hacia áreas con menor elevación



cercanas a estas zonas, con lo cual se muestra la presencia de áreas de manglar en las áreas por inundarse. Estas áreas son dependientes del aumento del nivel del mar; a mayor aumento, más áreas potencialmente por inundarse con el consecuente problema de generar intrusión salina en pozos cercanos a la zona -por mencionar un ejemplo- ocasionando que las fuentes de agua dulce se conviertan en salobre (para este caso las áreas con mayor afectación se tendrían en las entradas de los esteros por lo anteriormente mencionado).

Respecto de la playa, la mayor afectación se daría en el frente costero, lo que podría causar el aumento de problemas de erosión costera al seguir perdiendo el equilibro existente, influenciado por el aumento del nivel de mar. Por ejemplo, las olas en combinación con las mareas altas tienen un mayor alcance hacia el interior, llegando más lejos en la costa. Esto significaría que el agua puede penetrar más en la tierra y erosionar con mayor fuerza la playa y elementos cercanos a la costa. Adicionalmente, el aumento del nivel del mar podría hacer que las tormentas y las marejadas ciclónicas sean más destructivas. Las tormentas costeras causan erosión debido a las olas y las corrientes fuertes; pero cuando se combina con un nivel del mar más alto, el impacto podría ser mucho más severo que el descrito en este informe.

Con base en los escenarios generados, se procedió a establecer cuatro mapas de vulnerabilidad ante el aumento del nivel del mar siendo representativos la marea de 3,94 m para el 2030, 4,07 m para el 2050, 4,24 m para el 2070 y 4,58 m para el año 2100, estos se muestran en la Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25. La Tabla 10 muestra los valores utilizados para establecer los rangos por el impacto de cada marea.

Tabla 10 Zonificación ante el aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento de oleaje para Caldera

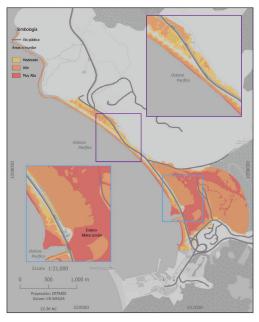
Valores de inundación (m)	Zonificación ante el aumento del nivel del mar y otras variables
-5 a -4	Muy alta
-4 a -2	Alta
-1 a 0	Moderada
0 a 5	Baja
5 a más	Muy baja

Datos propios.

Esta zonificación se obtiene a través de una reclasificación del mapa obtenido para cada marea en función de las áreas a inundar y el impacto que pueden representar en las áreas costeras. Es importante evaluar cada costa, pues tienen sus particularidades a nivel de mareas, apilamiento, geomorfología, oleaje por nombrar algunos elementos que se deben contemplar.

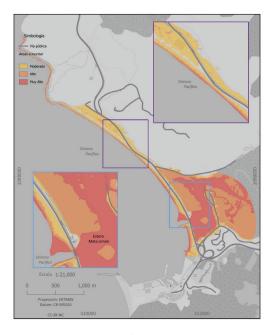
Adicionalmente, es importante mencionar que el concepto de vulnerabilidad para este caso está asociado al potencial impacto que tendría el aumento del nivel del mar para esta zona de estudio y que está estrechamente ligado a los escenarios anteriormente presentados en este informe.

Figura 22 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea de 4,43 m proyectada a 2030



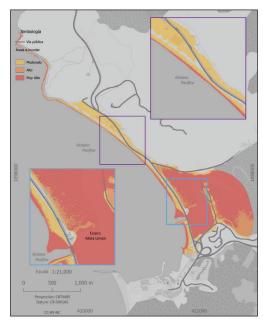
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 24 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea de 4,73 m proyectada a 2070



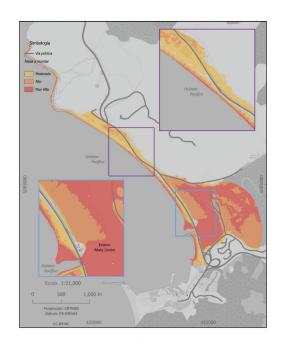
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 23 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea de 4,56 m proyectada a 2050



Datos propios. CC-BY-NC

Figura 25 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea de 5,07 m proyectada a 2100



**Datos propios. CC-BY-NC** 



De acuerdo con los resultados, se muestra claramente cómo en los sectores correspondientes a la entrada del estero de Mata de Limón (puente sobre la ruta 23), hay un favorecimiento del ingreso de las mareas y, por consiguiente, del proceso de inundación por el aumento del nivel de esta, así como en sectores del frente costero con una posible afectación en el corto, mediano y largo plazo (esto de acuerdo con los escenarios de zonificación para los años 2030, 2050, 2070 y 2100). Es necesario prestar atención al tramo de la ruta 23, ya que según se muestra en la Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25 es evidente que se ubica en una zona de media inundación. Es necesario definir una solución definitiva para proteger o trasladar esta infraestructura vial, con el fin de mejorar su capacidad de resiliencia para garantizar la continuación del servicio que brinda. Se nota también un impacto que afectará los ecosistemas marino-costeros (por ejemplo, los manglares) que aparecen en color naranja y rojo. Esto podría afectar el ecosistema desde un aumento de la salinidad del suelo, con lo que se puede ver afectada la salud y el crecimiento de las plantas que existen en el manglar.

Además, puede favorecer la erosión costera debido a las mareas y tormentas más intensas, lo que puede llevar a la pérdida de terreno y a la desestabilización de las raíces de los manglares más próximos al frente costero. Al alterar las condiciones ambientales, puede favorecer algunas especies sobre otras cambiando la composición de estas dentro del manglar. También esto influye en la reducción de la efectividad de estos sitios para proteger las áreas costeras, lo que aumenta la vulnerabilidad de las comunidades cercanas ante este tipo de eventos. Finalmente, los manglares son importantes captadores de carbono; por lo tanto si se llegan a degradar, comienza un proceso de reducción en la captura y almacenamiento de carbono.

Las zonas inundables con un impacto medio (según definiciones técnicas) ante el aumento del nivel del mar se encuentran sobre todo el frente costero con un mayor impacto sobre la zona donde depositaron las rocas calizas que sirven como un rompeolas sobre el margen izquierdo de la ruta 23 sentido San José-Puntarenas, situación que según las modelaciones realizadas para los escenarios de los años 2030, 2050, 2070 y 2100 siguen siendo zonas de alta exposición en la comunidad de Caldera y sobre el sector de ubicación de las rocas calizas (zona crítica en la Figura 2). Adicionalmente, las zonas con una exposición alta y moderada se dan principalmente sobre el manglar de Mata de Limón, como se puede apreciar en los cuatro períodos indicados con anterioridad.

Las estructuras presentes sobre el poblado de Caldera y las que se encuentran al margen derecho de la ruta 23 sentido San José-Puntarenas presentan una exposición media de impacto que se ve incrementado conforme pasen los años. Sin embargo, se recomienda el uso de estos mapas para informar y priorizar medidas de mitigación y adaptación que permitan reducir o minimizar la vulnerabilidad de las comunidades afectadas. Como recomendación, se podría pensar en la construcción de defensas costeras, como lo menciona IMARES (Cap. 5. 5.2 a 5.50, 2013) en el estudio para la estabilización de playa Caldera en las alternativas propuestas, las cuales indican:

- Actuación en la playa mediante la construcción de ocho espigones perpendiculares a esta.
- Actuación en la playa mediante la construcción de cuatro espigones perpendiculares a la playa con aporte de arena en el tramo de mayor afectación de la ruta 23.
- Actuación en la playa mediante la construcción de un dique exento y dos perpendiculares a la playa con aporte de arena en el tramo de mayor afectación de la ruta 23.
- Actuación en la playa mediante la construcción de siete espigones perpendiculares a esta y con aporte de arena en el tramo de mayor afectación de la ruta 23 y rehabilitación de espigón existente.
- Actuación en la playa mediante la construcción siete espigones perpendiculares a la esta y con aporte de arena en el tramo de mayor afectación de la ruta 23 y rehabilitación de espigón existente.
- Reubicación del sector de la ruta 23 afectado por la dinámica del oleaje.

Las imágenes de la propuesta pueden consultarse en el Anexo E. Es importante aclarar que debe valorarse integralmente cualquier



tipo de intervención en función del costo-beneficio y el mantenimiento de cualquier obra realizada a largo plazo, debido a que las infraestructuras oceánicas están constantemente expuestas a condiciones extremas, como el oleaje, corrientes fuertes, corrosión por salinidad y la acción por marejadas de tormentas. Esto significa que el desgaste y deterioro de las estructuras es inevitable, lo que requiere mantenimiento frecuente y costoso. Adicionalmente, los daños causados por tormentas o la acción constante del mar o algún fenómeno extraordinario pueden requerir reparaciones frecuentes en estas. La logística de movilizar equipos y materiales al sitio puede volverse complicado y costoso, lo que aumenta también el gasto en el mantenimiento de las obras.

A medida que la tecnología avanza, las infraestructuras pueden volverse obsoletas o menos eficaces, lo que requeriría inversiones adicionales para modernizarlas o sustituirlas en función de las condiciones oceanográficas de la zona. También, es importante llamar la atención de que la construcción de barreras y otras estructuras puede alterar los ecosistemas marinos, lo que afectaría la pesca y la biodiversidad de la zona e impactar negativamente sobre la economía de la comunidad de Caldera.

A todo lo anterior se suma también la incertidumbre de que aún existe sobre el cambio climático, por lo que un mayor aumento del nivel del mar del proyectado puede ocasionar que aquellas infraestructuras no sean suficientes para proteger o equilibrar las áreas costeras y generaría con ello pérdidas significativas sobre las posibles intervenciones planteadas.

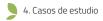
Se debe valorar por ejemplo la construcción de un viaducto o el traslado de la carretera como se planteará más adelante. Se debe valorar la reubicación de las comunidades, restauración de los ecosistemas costeros y promocionar prácticas de construcción sostenible.

## 4.1.3 Mapa geomorfológico costero de playa Caldera

El mapa geomorfológico costero de Caldera se digitalizó a escala 1:1000 o incluso superior en algunas morfologías, se compone de diversas formas de relieve costeras, antrópicas y fluviales (Figura 26). Las de origen costero son escarpes de playa, playas de arena, playa de inundación de arena, salientes rocosas, escarpes costeros, planicies costeras, manglares y estuarios. Los escarpes de playa son pendientes formadas en la playa por la acción del oleaje, que crean desde pequeños taludes hasta de más de 2 metros de altura en pendientes superiores a los 75°, especialmente cercanos al acantilado y la zona de edificaciones abandonadas luego de la escombrera al NO de playa Caldera. Estos escarpes pueden formarse rápidamente durante tormentas o marejadas. Indicativos de procesos de erosión costera activa pueden afectar la estabilidad de estructuras cercanas (Lizano, 2013). Muchos de estos escarpes son de menores alturas entre la escombrera hacia el SE hasta el espigón que limita con el estuario de Mata de Limón.

Las playas de arena son zonas costeras cubiertas de arena, formadas por la deposición de sedimentos traídos por las olas y las corrientes. En Caldera se localizan próximas a la calle con una orientación NO-SE. Las playas pueden cambiar de forma y tamaño, debido a la dinámica costera. Actúan como amortiguadores naturales contra el oleaje, pero son altamente susceptibles a la erosión y la acumulación de arena. Por su parte, debido al aumento del nivel en la región de Caldera ha dado lugar a la formación de playas de inundación de arena, donde grandes cantidades de sedimento arenoso han cubierto áreas residenciales y recreativas, incluidas casas y plazas de fútbol. Este fenómeno ha transformado la geomorfología costera y ha tenido un impacto significativo en las actividades humanas locales (Bird, 2008).

Por otro lado, las salientes rocosas son prominencias de roca o plataformas de abrasión que sobresalen en la línea de costa. Estas formaciones suelen ser resistentes a la erosión y pueden influir en la dinámica de las corrientes y la deposición de sedimentos. Proporcionan estabilidad a la costa y pueden crear hábitats únicos, pero también pueden desviar las corrientes y causar erosión en áreas adyacentes. En Caldera se localizan al NO en el promontorio montañoso y acantilado, como producto de las caídas de material (deslizamientos) en la base de la costa. Lo mismo sucede, pero en menor proporción de altura de los taludes al sur de Caldera después del muelle. Los escarpes costeros son pendientes o taludes abruptos formados por la acción de la erosión marina, que separan niveles de terreno diferentes. Los escarpes costeros se encuentran comúnmente en zonas de acantilados y pueden



ser naturales o reforzados artificialmente. Actúan como barreras naturales o artificiales contra la erosión y las inundaciones, aunque pueden ser inestables y propensos a pequeños movimientos en masa (deslizamientos). En Caldera se localizan a lo largo del límite entre la carretera y la acera con la playa, formando un frente de entre 60 y 90 grados de inclinación donde topan las mareas más extraordinarias.

Las planicies costeras son áreas relativamente planas y bajas que se extienden desde la costa hacia el interior. Estas zonas pueden estar sujetas a inundaciones y la deposición de sedimentos. Son altamente dinámicas y susceptibles a cambios debido a la acción del oleaje y la sedimentación. Se localizan como una depresión entre dos promontorios rocosos hacia el NO después del acantilado de Caldera. Además, se extienden en las zonas adyacentes de la desembocadura o boca del río Barranca. Dada su riqueza ecológica, esta área cuenta con los manglares como ecosistemas costeros dominados por árboles y arbustos tolerantes a la salinidad. Los manglares se encuentran en áreas intermareales y son cruciales para la protección de la costa y la biodiversidad. Reducen la erosión costera, estabilizan los sedimentos y proporcionan hábitats vitales para numerosas especies. Además, el estuario de Mata de Limón donde se localizan estos manglares es una zona donde los ríos se encuentran con el mar, creando un ambiente mixto de agua dulce y salada. Los estuarios son áreas de alta biodiversidad y productividad biológica. Actúan como amortiguadores naturales contra inundaciones y filtradores de sedimentos y contaminantes. Este es el caso de la boca del río Barranca donde se presentan alrededor de las planicies costeras.

En el caso de las formas antrópicas, en Caldera se presenta los usos antrópicos mixtos como áreas costeras que combinan diversos

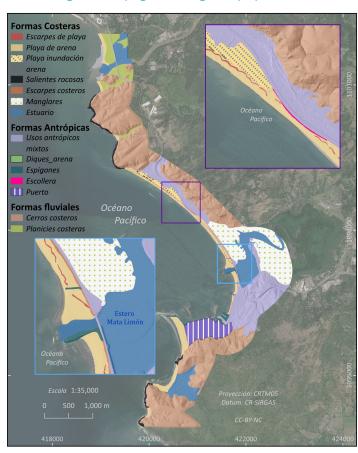


Figura 26 Mapa geomorfológico de playa Caldera



usos humanos, incluidos residenciales, comerciales, industriales y recreativos. Estas zonas son altamente modificadas por la actividad humana y pueden incluir estructuras como edificios, carreteras, puentes y otras infraestructuras. La urbanización y construcción en estas áreas pueden alterar la dinámica costera natural y afectan procesos de erosión, sedimentación y flujo de agua.

Entre las formas de relieve construidas por el ser humano para proteger de la erosión costera están los diques de arena, los espigones y las escolleras. En el caso de los diques de arena, estos son promontorios no mayores a 5 metros construidos de material arenoso, con el propósito de detener las subidas del nivel del mar que afectan infraestructuras costeras (Figura 27); mientras que los espigones son estructuras construidas perpendicularmente a la línea de costa para interrumpir las corrientes y prevenir la erosión. Los espigones atrapan sedimentos y estabilizan las playas. Alteran las corrientes costeras y la deposición de sedimentos, ayudando a preservar las playas, pero a veces causan erosión en otros lugares.



Figura 27 Diques de arena en el barrio Espíritu Santo

Fotografía propia, tomada el 27 de abril, 2024 en barrio Espíritu Santo

El puerto de Caldera resume las instalaciones construidas para el atraque, carga y descarga de embarcaciones. Pueden alterar significativamente la dinámica costera, modificando las corrientes y la sedimentación y, a veces, contribuyendo a la erosión costera. Por último, la escollera localizada sobre la ruta nacional 23 (Barranca-Caldera) es una estructura de roca o concreto de 450 metros de longitud construida para proteger la costa de la erosión y las olas. Las escolleras se extienden hacia el mar y actúan como barreras contra el oleaje. Modifican las corrientes costeras y la deposición de sedimentos, y protegen la costa, pero a veces causan erosión en áreas adyacentes no protegidas. Las formas de relieve de origen fluvial únicamente contienen a los cerros costeros, los cuales son elevaciones de terreno ubicadas cerca de la costa. Los cerros costeros pueden estar formados por procesos tectónicos y erosionados por la acción del agua. Influencian el drenaje local y pueden actuar como barreras naturales contra vientos y oleajes. En la Figura 28 se observa una edificación abandonada y al fondo se observa una primera escollera que fue erosionada y la reciente escollera hecha con bloques de caliza para resguardar la ruta 23 (Barranca-Caldera).

El análisis geomorfológico facilita mediante la interpretación de formas de relieve entender la razón del porqué ciertas áreas de la playa están proyectadas con mayores aumentos en el nivel del mar. Este fenómeno impactará directamente en diversas formaciones costeras, tales como playas, escarpes de erosión, diques de arena, espigones, y zonas con usos antrópicos mixtos. En particular, los manglares y estuarios de Mata de Limón se verán gravemente afectados, con grados de impacto clasificados



como altos o muy altos, según las proyecciones de diferentes niveles de incremento del mar. En la misma línea, se proyecta que la boca del río Barranca experimentará afectaciones significativas, atribuidas a su composición geomorfológica que incluye playas y planicies costeras. Estas áreas, caracterizadas por su vulnerabilidad inherente a la erosión y otros procesos dinámicos, estarán expuestas a un riesgo elevado debido a los cambios anticipados en el nivel del mar.



Figura 28 Edificación abandonada debido a la erosión costera en Caldera

Fotografía propia, tomada el 27 de abril, 2024

#### 4.1.4 Evaluación de la erosión costera

En la Figura 29 se observa la ubicación de los cinco perfiles levantados en campo: el primer perfil (P1) es representativo del sector cerca del acantilado, el P2 muestra la pendiente en el sector de las casas abandonadas, P3 la forma de la playa cerca de la zona crítica. Aquí es importante aclarar que, por seguridad del recuso humano, el perfil no fue levantado al frente de la escollera. El P4 ejemplifica el sector de "venta de churchill" y finalmente el P5, que es el más extenso, se realizó en la zona de acumulación en Caldera.

Las muestras de arenas de los cinco perfiles en playa Caldera se caracterizaron por tener granos gruesos. Es poco el porcentaje de arenas muy finas presentes a lo largo de la playa. 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. Además, los granos gruesos pueden provenir de la erosión de rocas cercanas, acantilados o de depósitos fluviales. La proximidad a una fuente de material rocoso y el tipo de roca presente en la región influirán en la composición del sedimento de la playa (Friedman & Sanders, 1978). Factores como la pendiente de la playa, la frecuencia y magnitud de las tormentas, y la actividad tectónica pueden influir en la distribución y tamaño de los sedimentos. Playas con pendientes pronunciadas y expuestas a fuertes tormentas tienden a tener sedimentos más gruesos, como es el caso de Caldera.

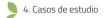




Figura 29 Ubicación de los perfiles de playa

**Datos propios. CC-BY-NC** 

La Figura 30 muestra las curvas granulométricas de las once muestras de arena. Un patrón general que se identifica es que las muestras recolectadas poseían partículas mayores a las 2mm, lo que ya no se clasifica como arena, es decir que existe material grueso producto de la alta energía que existe en la playa. Las curvas granulométricas de las muestras de zonas intermareales identificadas con la letra B presentan mayor porcentaje de granos más finos, mientras que las que se recolectaron en la berma (letra A) poseen granos más gruesos y fueron depositados en la zona durante un evento extraordinario, como se señala en la Tabla 5.

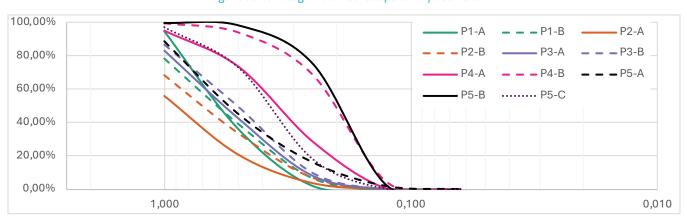


Figura 30 Curvas granulométricas para Playa Caldera



De cada curva se extrajo el valor de la mediana (D50) y de los once valores se sacó el promedio para determinar el perfil de equilibrio de la playa. La Tabla 11 muestra las D50 de cada muestra y el promedio para playa Caldera, el cual es de 0,50 mm. La arena se considera gruesa, también se puede observar que la arena de los perfiles más hacia el norte es más gruesas y hacia el sur se catalogan como arena media.

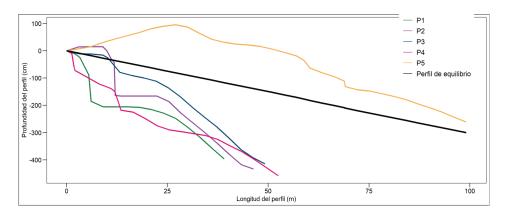
Tabla 11 Resultados D50 de las muestras de arena en playa Caldera

ID	D50	Arena
P1-A	0,6	muy gruesa
P1-B	0,6	muy gruesa
P2-A	0,85	muy gruesa
P2-B	0,7	muy gruesa
РЗ-А	0,6	muy gruesa
РЗ-В	0,5	gruesa
Р4-А	0,35	media
P4-B	0,21	fina
P5-A	0,55	gruesa
P5-B	0,2	fina
P5-C	0,38	gruesa
Promedio D50	0,50	gruesa

Nota: A: recolectada en la zona intermareal cerca de la marea baja, B en la berma y C en zona intermareal a mitad del perfil de playa levantado.

A partir de este valor D50, se calculó la ecuación de Brunn, donde se obtuvo un valor de w= 128,378 y A= 4,318. Por lo tanto, la Figura 31 muestra los perfiles levantados en campo en contraposición del perfil de equilibrio. Todo lo que está por debajo de la línea negra indica erosión, mientras que lo que está encima es sedimentación.

Figura 31 Perfiles de playa levantados en campo y el perfil de equilibrio en playa Caldera





Los perfiles del 1 al 4 todos presentan erosión bastante evidente y un perfil de playa bastante corto. En el sitio del primer perfil que corresponde a la zona conocida como La Cueva o El Vivero (cerca del acantilado, Figura 32a), se puede observar una grada de erosión mayor a 1 metro. La vegetación presente son especies colonizadoras y hay evidencias de vegetación volcada hacia la playa. El sitio de inicio fue una palmera que aún sobrevive a la erosión. En el sitio del perfil 2 —ubicado en el barrio Espíritu Santo (Figura 32b y c)— la erosión es crítica. Aquí hay infraestructura totalmente afectada y que en la actualidad se encuentra en estado de abandono. Además, la grada de erosión es de más de un metro de altura y con una pendiente fuerte (Figura 31). En perfil 3 (Figura 32d) hay presencia de exposición radicular, vegetación volcada hacia el mar (la poca que queda), y además presencia de material de contención (rocas de gran tamaño). En esta zona es donde se ve afectada la ruta 23 cuando hay eventos extraordinarios. Este material es colocado por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) por ser una ruta nacional.

En el sitio del perfil 4 se observó un doble desnivel, por la presencia de cuspados a lo largo de la costa, los cuales son una forma de relieve triangular o de "cúspide" que sobresale hacia el mar y se crea por la acumulación de sedimentos por acción del oleaje y las corrientes marinas. Ellos pueden ayudar a la estabilidad de la playa, ya que la protegen frente a la erosión. La grada de erosión se forma al unir la playa con la acera que está construida a la par de la playa. En el perfil 5 que se ubica al sur de la salida del estero de Mata Limón y posee acumulación de sedimentos finos. Observando los resultados de los perfiles de erosión y la ubicación de estos, se puede afirmar que los perfiles del P1-P4 tienen erosión, porque no poseen fuente de alimentación de sedimentos y se quedan atrapados dentro del estero de Mata Limón, lo anterior es consecuente con lo encontrado por Guell-Vargas et al. (2000), quienes demuestran cómo el cambio en la salida del manglar ha contribuido a que los sedimentos nos salgan hacia la playa. El P5 es alimentado por la arena que sale del puerto de Caldera y queda atrapada en el rompeolas que está al lado del puente sobre la ruta 23.



Figura 32 Evidencias de erosión costera en Caldera 2024

Fotografías propias. CC-BY-NC



Una vez analizados los perfiles de playa, el perfil de equilibrio y la observación en campo, se presenta el índice de erosión y sedimentación costera (Figura 33), donde se identifican las zonas más críticas de erosión con un nivel 5 (muy fuerte) y 4 (fuerte), mientras que hacia el sur de la playa el índice tiene un nivel 1 (no apreciable) y 2 (leve), que es en la salida del estero de Mata Limón por el puente de la ruta 23.

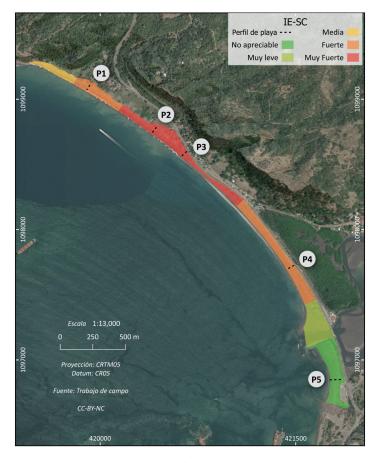


Figura 33 Índice de erosión y sedimentación costera (IE-SC) en Caldera, 2024

**Datos propios. CC-BY-NC** 

# 4.1.5 Análisis multifactorial de la amenaza

Se obtuvo un modelo donde se integran las variables utilizadas en este estudio y da como resultado la Figura 34 de la zona de Caldera. Es importante mencionar que se utiliza una marea de 3,94 m para el 2030 con combinación de los componentes: aumento del nivel del mar, marea máxima, apilamiento de oleaje y ENOS. Para el caso de Caldera, se tiene como resultado los valores de la Tabla 12.

Podemos hablar esto, pero el análisis multifactorial es de amenazas: mareas máximas y extraordinarias, apilamiento de oleaje, eventos ENOS severos, aumento significativo del nivel del mar, geomorfología muy compleja y vulnerable, oleaje alto y frecuente, alta erosión costera, baja elevación. Si bien se acepta que geomorfología y manglares son vulnerables en la dimensión ecológica, esto no permitiría decir el riesgo.

El riesgo se define como una función convolutiva R = F (A, V) y Exp= F (A, elementos expuestos)

Tabla 12 Categorías del índice de amenazas multifactorial para Caldera, 2024

Nivel	Categoría	Descripción		
5	extremadamente elevado	Las áreas de extremadamente elevadas resultan de una combinación de factores críticos que incluyen mareas máximas y extraordinarias, apilamiento de oleaje, eventos ENOS severos, aumento significativo del nivel del mar, geomorfología muy compleja y vulnerable, oleaje alto y frecuente, alta erosión costera, baja elevación. Estas zonas tienen una alta probabilidad de sufrir impactos severos y rápidos, requiriendo medidas urgentes de mitigación y adaptación.		
4	muy elevado	Las áreas indicadas resultan de una combinación de factores que representan una amenaza muy elevada debido a la suma de mareas máximas, apilamiento de oleaje, ENOS, aumento del nivel del mar, geomorfología compleja, alto oleaje, alta erosión costera, baja elevación.		
3	elevado	Las áreas que presentan un elevado nivel de amenaza debido a factores significativos, pero no extremos en comparación con las zonas etiquetadas como "muy alto riesgo". Estas áreas incluyen áreas con mareas y oleaje significativos, apilamiento de oleaje, ENOS, geomorfología moderadamente compleja, erosión costera significativa.		
<b>Zonas con oleaje y mareas moderadas, geomorfolog</b>		Las áreas que presentan una amenaza moderada tienen condiciones intermedias. Pueden ser zonas con oleaje y mareas moderadas, geomorfología estable, pero con algunos puntos críticos a los que se les debe prestar atención para anticipar los posibles impactos, erosión costera baja.		
1	bajo	Finalmente, las áreas con baja amenaza presentan condiciones favorables, según los criterios evaluados. Estas áreas pueden tener mareas y oleaje bajos, geomorfología estable, baja erosión costera, elevaciones altas y seguras, así como estructuras y caminos bien construidos y lejos de cualquier problema relacionado a la parte marina-costera.		

Elaboración propia.



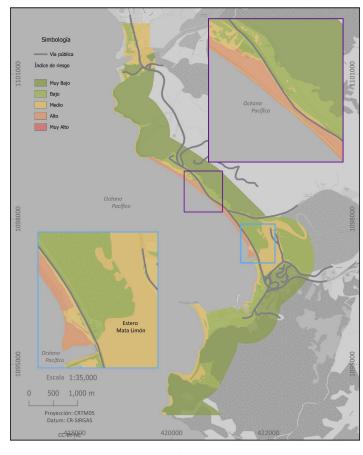


Figura 34 Índice de amenazas multifactorial en Caldera, 2024

**Datos propios. CC-BY-NC** 

Para el caso de Caldera, las zonas sobre el poblado, así como en las márgenes del estero de Mata de Limón y la ruta 23 tienen impactos moderados y elevado. En la zona de entrada al estero es donde tenemos la zona de extrema amenaza propiamente sobre el margen izquierdo. Esto surge de la combinación de todos los datos indicados en este informe como se aprecia en la Figura 34.

Además, se muestra el grado de afectación sobre el sector de colocación de las calizas que sirven como un rompeolas para evitar la pérdida de estabilidad de la base, sobre la cual se encuentra la calzada (carretera), sector que se muestra con un grado alto de afectación en la vista en detalle en la parte superior derecha de la Figura 34. Es importante mencionar que conforme pasen los años y los eventos aumenten, estas áreas aumentarán su riesgo en el mediano y largo plazo. Esto convierte los valores a riesgos altos y muy altos, que afectarán de mayor forma la estabilidad de la carretera con el consecuente problema de un socavamiento de la base sobre la cual se encuentra la carpeta de rodamiento en este sector.

Otras zonas de afectaciones se dan sobre el ingreso a calle Salinas hacia el poblado de Mata de Limón en las vías cercanas a los restaurantes Costa del Sol, Leda, Marisquería Don Mario y el camino que comunica hacia el nuevo puente colgante.

#### 4.1.6 Conclusiones

La erosión costera, el aumento del nivel del mar, el ENOS y el apilamiento del oleaje tendrán repercusiones en poblaciones o



comunidades costeras. La zona de estudio del sector de Caldera es un claro ejemplo de esta realidad y los escenarios generados (ver figuras de la 7 a la 24), los cuales demuestran la necesidad de prepararse ante las posibles afectaciones de estos fenómenos o sus combinaciones en el futuro cercano. Es esencial adoptar medidas que permitan mitigar, prevenir y adaptarse a los escenarios proyectados.

Los escenarios a futuro de Caldera muestran que se verá afectada ante el aumento del nivel del mar. Si además se le suman otros fenómenos que puedan presentarse para un día particular –como la influencia del fenómeno ENOS, el apilamiento del oleaje, u otra variable que pueda afectar el frente costero, o que en un mismo día varios o todos estos fenómenos puedan superponerse—, implicaría aumentos importantes en el nivel del mar, al punto que podrían ocasionar inundaciones mayores a las mostradas en los resultados de los modelos de este estudio.

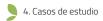
Es meritorio aclarar que en este estudio se han tratado los distintos niveles mareográficos como una superposición de niveles pasivos (aumento del nivel del mar sobre la marea base para el día correspondiente más el aumento por el ENOS y el apilamiento del oleaje), sin tomar en cuenta que la dinámica de ciertos componentes oceanográficas, como las olas y las corrientes, que tienen la capacidad de modificar la geomorfología costera, en un corto tiempo ante eventos extraordinarios. Esto puede desequilibrar el sistema costero. Las formas de relieve actual de playa Caldera indican avanzados procesos erosivos con decenas de metros de escarpes de erosión de varios decímetros hasta más de un metro, así como perfiles de playa erosivos a lo largo de esta playa. Además, es evidente el impacto que ya ha sufrido la infraestructura pública (aceras, sectores de la carretera, plaza de fútbol) como privada (edificios y casas), y las medidas de contención, como los diques de arena que se han identificado para detener el avance de estos procesos de inundación y erosión costera en Caldera.

Los procesos de inundación costera son favorecidos por la presencia de esteros, al tener estos la capacidad del transporte del agua y sedimentos en una marea alta, lo que favorece el derrame de la marea hacia zonas más bajas. Al aumentar el nivel del mar, más áreas se verían afectadas en playas que tengan este tipo de morfología marina como el caso de Caldera y donde queda evidenciado por la información generada. Adicionalmente, se debe contemplar el problema que podría ocasionar la intrusión salina en estas zonas (por si hay existencia de algunos pozos que estén hasta unos 500 metros tierra adentro a partir del nivel 0 del mar). Esto es de resaltar y se debe tomar en cuenta para temas de ordenamiento territorial.

De acuerdo con los escenarios generados, existe una afectación sobre la ruta nacional 23 en un tramo de aproximadamente 200 m (zona crítica) ubicado entre la estación del tren y el parque de Caldera, en las coordenadas geográficas centrales latitud norte 9° 56′ 00″ longitud oeste 84° 43′ 19.43″. Por tanto, se recomienda una intervención pronta, con el fin de que las comunidades no queden incomunicadas o tengan que buscar rutas alternas que aumenten el tiempo de desplazamiento en un futuro cercano por este tipo de fenómenos. Lo anterior queda evidenciado en los escenarios presentados en las figuras 7 a la 10.

Para el caso de Caldera, se aprecia un proceso erosivo a lo largo de la playa siendo más intenso sobre la curva que conecta con calle La Moncha (donde se pusieron los bloques de rocas calizas) y sobre el poblado de Caldera; es decir, la zona crítica identificada en la Figura 2. Esta relación eventualmente podría causar la pérdida de terreno, la ruta nacional 23 y la intrusión salina si existen acuíferos subterráneos cercanos a las zonas de inundación.

Es crucial señalar que a medida que el nivel del mar aumente en la zona de Caldera y junto con los otros factores mencionados en este informe, la exposición a la amenaza multifactorial aumentará gradualmente en valores altos y extremadamente altos con el tiempo. Por lo tanto, es importante que las autoridades y la comunidad estén preparadas para los eventos oceanográficos descritos en este informe y que –como se ha demostrado en esta área en particular– tienen un impacto directo en las estructuras y, por consiguiente, en la calidad de vida de las personas.



## 4.1.7 Limitaciones

El modelo utilizado en los escenarios de aumento del nivel del mar no toma en cuenta la hidráulica para cada zona de estudio, así como los levantamientos o los hundimientos de los bloques litológicos ni otros elementos como precipitaciones extremas o tsunamis que puedan afectar las áreas de estudio.

Es importante mencionar que un componente que no se incluyó en este estudio es el aumento el nivel del mar por un tsunami. El tsunami de Japón (10 de marzo del 2011) produjo un aumento del nivel del mar en Quepos de 18 cm, según datos del Centro de Alerta de Maremotos del Pacífico, consultado el 20 de julio de 2020 (http://ptwc.weather.gov). Hay simulaciones de Ortíz et al. (2001) de tsunamis históricos con ondas de 3,5 m de altura en Puntarenas. Por tanto, los escenarios incluidos aquí también sirven para sobreponer este componente a las condiciones de la marea existente en el momento de arribo de un tsunami y constituye una herramienta válida, para que las respectivas autoridades (SINAMOT, municipalidad, ICT, INVU, IMAS, MOPT, CNE, entre otras) evalúen las condiciones del nivel del mar ante un evento de este tipo en el océano Pacífico.

#### 4.1.8 Recomendaciones

- 1. Se recomienda a las autoridades correspondientes contar con algún plan de acción o de emergencia para eventos que produzcan el aumento del nivel del mar y otros tipos de impactos costeros.
- 2. Se recomienda el uso de la información presentada en este trabajo, con el fin de buscar una ruta alternativa o bien subir la vía a una altura de por lo menos 3 metros (a partir de la altura actual), según el escenario al 2100 que muestra la mayor altura del nivel con respecto al 0 de la tabla de mareas, mientras se valora una intervención a mediano plazo en función del costo-beneficio y mantenimiento (viaducto, obras costeras como las mencionadas en el informe de IMARES, traslado de la vía). Para ello se debe definir un estudio que analice e indique la mejor solución.
- 3. Se recomienda el uso de técnicas y herramientas como el LIDAR o la fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (RPAS) para obtener cartografía a detalle y actualizada que permita dar un seguimiento real a la situación de forma anual, o al menos es ideal un control cuatrimestral. Lo anterior permitiría ajustar los escenarios en función del aumento verificado y validados cada año para una toma de decisiones acertadas con fundamento científico.
- 4. Por el grado de importancia del tema en el corto, mediano y largo plazo hacia la comunidad de Caldera, se insta a las respectivas autoridades (CNE, IMN, entre otras) a invertir en equipo tecnológico que permita cuantificar estos escenarios de forma más precisa. Se recomienda instalar un mareógrafo en un espejo de agua tranquilo, donde existan las condiciones idóneas para tal fin (mínimo oleaje, fuera de rutas de barcos que causen oscilaciones fuera del rango) para en la región del Pacífico Central del país, y que permita medir y obtener patrones sobre el nivel del mar y su aumento, con el fin de tener un registro continuo de esas variaciones. Esto podría ayudar a prevenir y mitigar posibles amenazas como las citadas en este documento.
- 5. Incluir en el plan regulador costero, ya sea en su formulación o actualización los componentes mareográficas como el aumento del nivel del mar (por cambio climático y otros fenómenos como el ENOS, el apilamiento del oleaje) así como los temas de erosión costera y cambios de las formas costeras, con el fin de que el instrumento para el ordenamiento y planificación territorial sea lo más integrador posible y permita una mejor toma de decisiones en todos los ámbitos. El escenario por utilizar y que se debería incluir en la elaboración del Plan Regulador Costero, si este se encuentra en etapa inicial de construcción al momento de la presentación de este informe, es el del 2030. Ya para el año 2030 se debería revisar y ajustar hacia el del 2050 a modo de prevención.
- 6. Es necesario mantener la preservación y protección de los manglares que quedan en la zona, ya que estos fungen como una barrera natural y ecológica ante cualquier evento oceanográfico que pueda afectar las zonas cercanas a la bahía.



Adicionalmente, estos ecosistemas actúan como anclajes y evitan eventuales problemas como la erosión costera. Los manglares ayudan a estabilizar la costa y previenen la pérdida de sedimentos. Esto es especialmente importante en áreas donde el nivel del mar está aumentando, ya que los manglares pueden ayudar a contrarrestar la erosión causada por el avance del agua y la zona de Caldera no escapa a esta realidad.

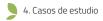
- 7. Con base en la zonificación ante el aumento del nivel del mar, se recomienda que las autoridades competentes articulen esfuerzos para generar medidas propositivas en cambios en la tipología constructiva (por ejemplo: construcción en pilotes entre otros elementos) y que tomen en cuenta el componente cultural y social de las poblaciones, con el fin de brindar posibles soluciones a futuro ante la problemática expuesta en este informe. Además, se propone que las zonas que aparecen en alta y moderada categoría traten de evitar cualquier tipo de desarrollo urbano, así como la construcción infraestructura crítica (EBAIS, escuelas, colegios, Cruz Roja, clínicas, bancos, estación de bomberos, entre otros). Además, se insta a que las autoridades establezcan regulaciones y políticas que promuevan prácticas de construcción sostenible y resiliente en estas áreas.
- 8. También, se recomienda valorar la construcción de obras costeras como diques, barreras y contemplar la elevación o trasladar según el costo-beneficio aquellas infraestructuras que sean críticas. Es importante mencionar que estas medidas deben basarse en nuevos estudios de ingeniería y oceanográficos y deben considerar los impactos ecológicos y socioeconómicos hacia las comunidades a largo plazo. Este trabajo sirve como base para preliminarmente evaluar estas obras en dicho estudio.
- 9. Se insta a las autoridades reguladoras del sector de playa Caldera a que inicien y generen esfuerzos de educación y concientización sobre los impactos del aumento del nivel del mar, así como la importancia que tiene la adaptación ante este tipo de fenómenos. El involucramiento de la comunidad y los diversos actores público-privados es vital para que puedan respaldar las acciones a largo plazo en la comunidad.
- 10. Paralelamente, se debe pensar en una restauración de los ecosistemas costeros donde las características de la zona lo permitan y sea posible, ya que esto ayudaría a fortalecer la resiliencia costera y a preservar la biodiversidad de las zonas afectadas. Para el caso de playa Caldera, estas zonas por mantener o regenerar (reforestar con especies nativas de manglar) son las que limitan con los esteros, sectores del frente de costa y manglares existentes. Se recomienda realizar un mapeo como parte de otro estudio que permita identificar a detalle estas áreas.
- 11. Para temas de ordenamiento territorial, se puede realizar la extracción de las curvas de inundación de cada escenario generado en este estudio y puede consultarse la altura de inundación de acuerdo con cada área de la playa. Esto puede realizarse con el software de QGIS con la herramienta llamada curvas de nivel y en ArcGIS con la herramienta contorno.

# 4.2 Playa Manzanillo

# 4.2.1 Delimitación espacial

Manzanillo es un pequeño pueblo ubicado en la provincia Limón, cantón Talamanca y distrito Cahuita, en la costa caribeña de Costa Rica. Se encuentra al sur de Puerto Viejo y cerca de la frontera con Panamá. Está dentro del área de influencia del Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo.

El clima en Manzanillo es tropical húmedo, caliente con un déficit pequeño de agua, caracterizado por altas temperaturas entre 22 y 26 °C y con una evapotranspiración potencial entre los 1565 a 1920 mm, lo que indica alta humedad a lo largo del año. Las precipitaciones son abundantes entre los 2500 a 3100 mm anuales, con dos estaciones lluviosas principales: de mayo a agosto y de noviembre a enero (Pérez-Briceño et al., 2017)



La economía de Manzanillo se basa principalmente en el turismo ecológico. El refugio Gandoca-Manzanillo es una de las principales atracciones, pues ofrece oportunidades para el avistamiento de vida silvestre, senderismo y buceo. Además, la pesca artesanal y la agricultura de subsistencia son actividades económicas importantes para los habitantes locales.

Manzanillo ha sido históricamente un pueblo afrocaribeño, con una cultura rica y diversa influenciada por las comunidades afrodescendientes que se establecieron en la región a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. La cultura y la gastronomía locales reflejan esta herencia afrocaribeña (Hall & Pérez-Brignoli, 2003).

El Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo es conocido por su biodiversidad excepcional. Alberga una amplia variedad de especies, incluidas tortugas marinas, manatíes, delfines y una gran diversidad de aves y reptiles. Los ecosistemas incluyen bosques tropicales, manglares y arrecifes de coral.

En la Figura 35 se puede apreciar la ubicación del área de estudio, así como otros sectores: la zona de "poyitos" de cemento, donde muchas familias disfrutan de la playa; la zona de comercio, donde se pueden encontrar restaurantes, sodas, pulperías y cabinas; la zona de la plaza de fútbol y el cementerio. Constituyen puntos de referencia el acceso al Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, la escuela y la ubicación del rótulo fotografiable de Manzanillo.



Figura 35 Área de estudio: Manzanillo



## 4.2.2 Escenarios de inundación por aumento del nivel del mar

En esta sección se presentan los escenarios ante el aumento del nivel del mar para la zona de playa Manzanillo en el Caribe Sur de Costa Rica para los años 2030, 2050, 2070 y 2100. Estos escenarios son el resultado de lo que se proyecta actualmente que podría llegar a ocurrir bajo distintas condiciones ambientales. La información aquí presentada es un insumo clave para toma de acciones en el ámbito del reordenamiento territorial, la planificación urbana y la toma de decisiones en los ámbitos costero y nacional, ya que se basa en evidencia y datos científicos.

#### 4.2.2.1 Principales resultados

Dentro de los principales resultados se tiene un modelo de elevación digital (MED) de muy alta resolución (a nivel de cm) que permitió la obtención de los diversos escenarios ante el aumento del nivel del mar para la zona de playa Manzanillo, así como con la combinación de otros fenómenos como el ENOS y el apilamiento del oleaje. Lo anterior también permitió generar 4 mapas de zonificación ante el aumento del nivel del mar en combinación con las variables de ENOS y apilamiento de oleaje. Todo esto es información base que debe incorporarse en temas de planificación urbana y reordenamiento territorial. Como información adicional, se tiene que para el caso de Manzanillo la mayor elevación se encuentra sobre la carretera que se conecta con una elevación de 29,55 m sobre el nivel 0 establecido en este estudio. Este punto se ubica dentro del Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo. La altura topográfica promedio para la zona de playa Manzanillo es de 6,10 m. A continuación, se verán en detalle los resultados obtenidos a partir de las mareas máximas tomando en cuenta la influencia del aumento del nivel del mar, el fenómeno ENOS, así como el apilamiento del oleaje.

#### 4.2.2.1.1 Modelo batimétrico

Los resultados de los muestreos de profundidad en Manzanillo se observan en la figura 36. Con estos sondeos se elaboró un modelo de elevación digital, que por un lado permite evaluar la pendiente del fondo marino y su relación con el ataque del oleaje en el borde costero, así como las posibles fuentes de arena frente a esa zona. Se nota una región con de bajos batimétricos (promontorios arrecifales) que aún están vivos y que cumplen una muy buena función de amortiguamiento de oleaje en caso de eventos extremos de oleaje.

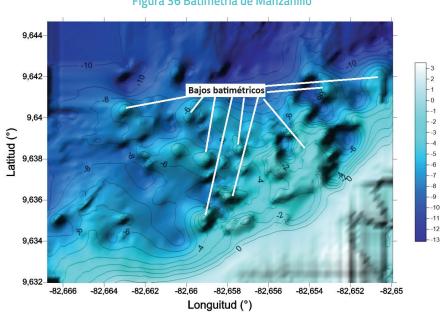


Figura 36 Batimetría de Manzanillo



La Figura 37 muestra la unión del modelo batimétrico con el de elevación digital. Los modelos poseen diferente resolución espacial, pero se homologó a 20 m para dar una idea de las condiciones morfológicas del lugar.

Figura 37 Modelo profundidad y de elevación digital en playa Manzanillo

Modelo batimétrico-topográfico, Manzanillo

**Datos propios. CC-BY-NC** 

#### 4.2.2.1.2 Oleaje

En el caso de esta región, se filtró la serie de alturas de olas a valores mayores de 2,5m; valor que, por criterio experto con base en múltiples visitas a Terminal de Contenedores de Moín (TCM), es capaz de iniciar procesos de erosión en el sector del mar Caribe. Estas series se muestran en la Figura 38 sobre la altura del oleaje en agua profunda y la Figura 39 sobre la variación de la altura de la ola (seg). En las figuras también se muestra la línea de tendencia y la ecuación de esa línea.



Figura 38 Serie de alturas de ola mayores a 2.5m frente a Manzanillo entre el 2013 y 2024

Fuente: NCEP-NOAA

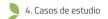


Figura 39 Variación del periodo de ola (seg) frente a Manzanillo, Limón, Costa Rica

**Fuente: NCEP-NOAA** 

Numero de valores

La serie muestra una ligera tendencia positiva. Utilizando la serie de alturas de ola, se extrae la frecuencia mensual de ese registro y el resultado se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13 Frecuencia mensual de oleajes altos (≥2,5m) en Manzanillo

Año	N. de eventos	Condición
2013	115	
2014	57	El Niño + intenso
2015	392	El Niño + intenso
2016	167	La Niña leve
2017	103	La Niña leve
2018	248	El Niño leve
2019	82	El Niño leve
2020	204	La Niña medio
2021	110	La Niña medio
2022	0	La Niña medio
2023	3	El Niño fuerte
2024 (hasta junio)	78	El Niño fuerte

Como se desprende de la tabla anterior, no hay un patrón claro de correlación de este comportamiento de oleaje alto con respecto al fenómeno de El Niño o La Niña.

De la misma forma, utilizando la serie de oleaje, se obtuvo la estadística siguiente, así como el cálculo de parámetros necesarios para realizar los escenarios de nivel del mar. Estos resultados se muestran en la Tabla 14. Algunos parámetros del artículo de Lizano y Lizano (2022) fueron actualizados para este proyecto.

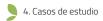


Tabla 14 Magnitudes de parámetros del oleaje al frente de Manzanillo

Parámetro	Valor
Hs (promedio)	2,77m
Hmax	3,66 m
Tp (promedio)	10,57 seg
Tp (máximo)	12,01seg
НЬ	2,98 m
hb	5,10 m
Sw	0,745m

#### Donde:

- Hs (promedio): altura de ola significativa promedio
- Hmax: altura de ola 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

## 4.2.2.1.3 Resumen de parámetros posibles a utilizar en la elaboración de escenarios del nivel del mar

Los siguientes son los valores correspondientes al componente que puede utilizarse para generar escenarios que contribuyen con el aumento del nivel del mar para Manzanillo en el Caribe (Tabla 15).

Tabla 15 Magnitudes de parámetros al frente de Manzanillo

Parámetro	Valor
Marea promedio	0,15 m
Marea alta	0,36 m
Marea máxima	0,49 m
El Niño	0,30 m
Apilamiento de oleaje	0,745 m
Nivel del mar 2050	0,25 m
Nivel del mar 2100	0,76 m



#### 4.2.2.2 Mareas máximas, apilamiento oleaje y ENOS

Para este trabajo, se utilizan las mareas máximas cuyos valores son de 0,15 m que es la marea promedio, así como 0,36 m (mareas comunes para la zona del Caribe costarricense y que suceden varias veces al año). El nivel de 0,36 m es considerado el nivel de marea astronómica límite al borde de la vegetación en el lugar estudiado y que aunado con algún otro proceso oceánico adicional que aumente este nivel puede inundar la zona. El nivel de 0,49 m es la marea astronómica máxima para esta región y es considerado un nivel que ya inunda por sí misma las zonas bajas de esta región (como se muestra más adelante) y, por supuesto, con algún otro fenómeno océano-meteorológico adicional produce mayor impacto en la región.

Adicionalmente, se incluyó el fenómeno de El Niño, que induce un aumento del nivel del mar de 0,30 m en promedio y un apilamiento del oleaje (causado por tormentas que ocurren en la cuenca del mar Caribe y el océano Atlántico) que inducen un aumento de otros 0,745 m en función de las mareas.

Lo anterior permitió generar múltiples escenarios para la zona de estudio a partir de estos tres niveles de mareas astronómicas: nivel promedio de referencia (0,15 m) nivel promedio máximo (0,36 m) y marea extraordinaria (0,49 m), sumado a las distintas combinaciones de las componentes mareográficos, en este caso, como el aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento del oleaje. Los escenarios se obtienen a partir de aquellos niveles ante el aumento del nivel del mar que tienen potencial de inundación para la zona de estudio. Las combinaciones seleccionadas de estos niveles se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16 Combinaciones seleccionadas para generar los escenarios de inundación en Manzanillo

Año	Marea (m)	Niño (m)	Apilamiento (m)	Aumento del nivel del mar por cambio climático (m)*	Marea + Niño + apila- miento + aumento (m) *
2030	0,15	0,30	0,745	0,12	1,32
2030	0,36	0,30	0,745	0,12	1,53
2030	0,49	0,30	0,745	0,12	1,66
2050	0,15	0,30	0,745	0,25	1,45
2050	0,36	0,30	0,745	0,25	1,66
2050	0,49	0,30	0,745	0,25	1,79
2070	0,15	0,30	0,745	0,42	1,62
2070	0,36	0,30	0,745	0,42	1,83
2070	0,49	0,30	0,745	0,42	1,96
2100	0,15	0,30	0,745	0,76	1,96
2100	0,36	0,30	0,745	0,76	2,17
2100	0,49	0,30	0,745	0,76	2,30

Fuente: elaboración propia

<sup>\*</sup>También incluye las proyecciones por aumento del nivel del mar de la tabla 3.



La Tabla 17 muestra la frecuencia de las mareas más altas que se pueden esperar para el 2030 y en adelante hasta el 2100 comparado con la frecuencia de ese valor de las mares estudiadas entre el 2000 al 2020, es decir un periodo de 20 años.

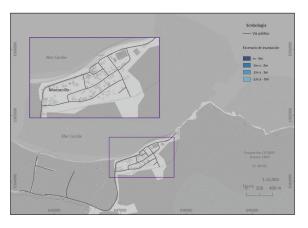
Tabla 17 Frecuencias de mareas extraordinarias en el mar Caribe

Altura de marea	Histórico (actual)	2050	Resto de los años
≥ 0,36 m	102	935,85	Todo el tiempo

Nota: los datos están indicados en veces por año.

La Figura 40, Figura 41 y Figura 42 corresponden a las mareas sin aumento, ni ENOS, ni apilamiento de oleaje para el área de estudio. A partir de la Figura 43, Figura 44 y Figura 45 se observa los escenarios tomando como base las mareas indicadas en la Tabla 16 con aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento de oleaje para el año 2030. Bajo los mismos escenarios se tiene la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 que muestran los respectivos para el año 2050. Las figuras 49, 5° y 51 muestran para el año 2070 y finalmente las figuras 52, 53 y 54, para el año 2100.

Figura 40 Escenarios marea 0,15 m



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 41 Escenarios de marea 0,36 m



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 42 Escenarios ante el aumento del nivel del mar con una marea de 0,49 m proyectado al 2030, Manzanillo

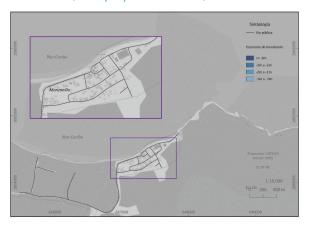


Figura 43 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,32 m proyectado al 2030, Manzanillo



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 45 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,66 m proyectado al 2030, Manzanillo



**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 44 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,53 m proyectado al 2030, Manzanillo



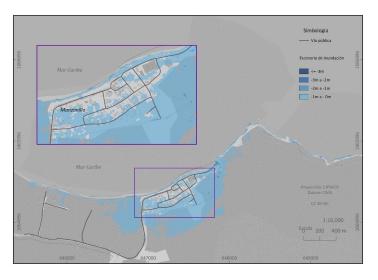
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 46 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,45 m proyectado al 2050, Manzanillo



Datos propios. CC-BY-NC

Figura 47 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,66 m proyectado al 2050, Manzanillo



Datos propios. CC-BY-NC

Figura 49 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,62 m proyectado al 2070, Manzanillo

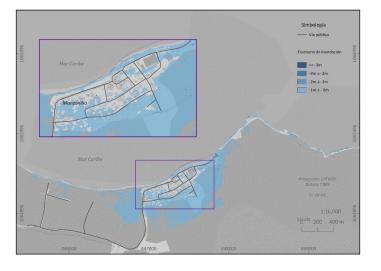
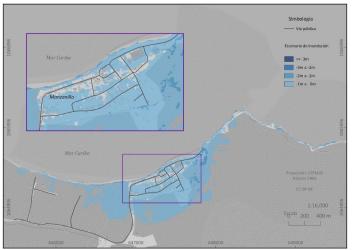


Figura 48 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,79 m proyectado al 2050, Manzanillo



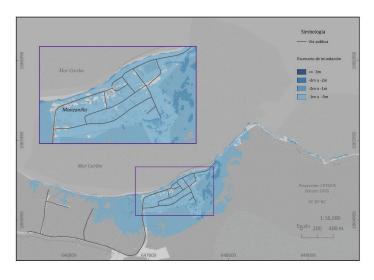
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 50 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,83 m proyectado al 2070, Manzanillo



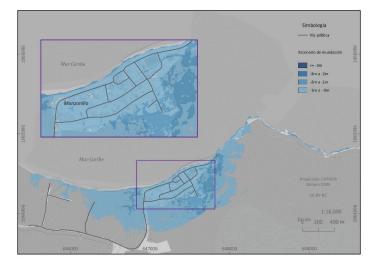
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 51 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,96 m proyectado al 2070, Manzanillo



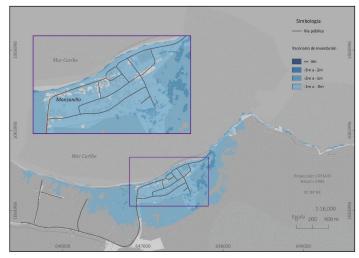
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 53 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 2,17 m proyectado al 2100, Manzanillo



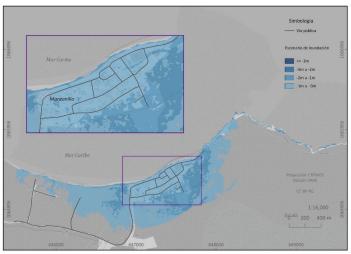
**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 52 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 1,96 m proyectado al 2100, Manzanillo

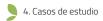


**Datos propios. CC-BY-NC** 

Figura 54 Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con marea de 2,30 m proyectado al 2100, Manzanillo



**Datos propios. CC-BY-NC** 



Los escenarios anteriores muestran las áreas que son más propensas a inundación ante el aumento del nivel del mar y la asociación con fenómenos como el apilamiento del oleaje (tren de olas de tormentas en mar abierto) y el fenómeno del ENOS. Estos fenómenos son recurrentes año tras año (apilamiento) o recurrentes en un período de tiempo.

En el caso de Manzanillo, las áreas cercanas a la laguna que se encuentra hacia el final de calle Mirador y que conecta con el mar favorecería los procesos de inundación hacia la comunidad. Otro de los impactos mayores correspondería sobre todo al frente costero que sería impactado y generaría aún mayor desequilibrio por el tema de erosión costera presentada en la zona, lo cual afectaría la vía de acceso hacia el refugio para el año 2030. Las principales afectaciones serían con mareas mayores a 1,32 m a partir del 2030, que en combinación con oleajes de largos períodos (muy energéticos) podrían afectar aún más el frente costero. Otro sector de importancia es hacia la quebrada Hone Mark, ya que el aumento del nivel del mar en combinación con otros fenómenos utilizaría el canal de la quebrada para inundar áreas cercanas. En un escenario para el 2100 se tendría una marea de 2,30 m, donde el impacto se vería sobre todo el frente de la playa, la comunidad y en la margen derecha de la quebrada mencionada anteriormente.

Es importante mencionar que el proceso de llenado ante el aumento del mar se da por la entrada de los esteros, ríos o quebradas ocasionando un derrame hacia áreas con menor elevación cercanas a estas zonas, certificando con ello la presencia de áreas de manglar en las áreas por inundarse. Estas áreas son dependientes del aumento del nivel del mar, a mayor aumento, más áreas potencialmente inundadas con el consecuente problema de generar intrusión salina en pozos, por mencionar un ejemplo, ocasionando que las fuentes de agua dulce se conviertan en salobre. Para este caso, las áreas con mayor afectación se tendrían por la quebrada y en la laguna antes del ingreso al refugio por la calle de acceso.

A nivel de la playa, la mayor afectación se seguiría dando en el frente costero y ocasionaría mayores problemas de erosión en el área, influenciado por el aumento del nivel de mar. Por ejemplo, las olas en combinación con las mareas altas tienen un mayor alcance hacia el interior, llegando más lejos en la costa. Esto significaría que el agua puede penetrar más en la tierra y erosionar con mayor fuerza la playa y elementos cercanos a la costa. Adicionalmente, el aumento del nivel del mar podría hacer que las tormentas y las marejadas ciclónicas sean más destructivas. Las tormentas costeras causan erosión debido a las olas y las corrientes fuertes, pero cuando se combina con un nivel del mar más alto, el impacto podría ser mucho más severo que el descrito en este informe.

Con base en los escenarios generados, se procedió a establecer cuatro mapas de zonificación ante el aumento del nivel del mar y son representativos la marea de 1,66 m para el 2030, 1,79 m para el 2050, 1,96 m para el 2070 y 2,30 m para el año 2100. Estos se muestran en la Figura 55, Figura 56, Figura 57 y Figura 58. La Tabla 18 muestra los valores utilizados para establecer los rangos el impacto de cada marea.

Tabla 18 Zonificación ante el aumento del nivel del mar, ENOS y apilamiento de oleaje para Manzanillo

Valores de inundación (m)	Amenaza ante el aumento del nivel del mar
-3 a -1	Muy alto
-1 a 1.5	Alto
1.5 a 3	Moderado
3 a 5	Bajo
5 a más	Muy bajo

**Datos Propios. CC-NC-BY** 



Esta zonificación se obtiene a través de una reclasificación del mapa obtenido para cada marea en función de las áreas por inundarse y el impacto que pueden representar en las áreas costeras. Es importante evaluar cada costa pues tienen sus particularidades a nivel de mareas, apilamiento, geomorfología, oleaje por nombrar algunos elementos que se deben contemplar.

Adicionalmente, es importante mencionar que el concepto de amenaza para este caso está asociado al potencial impacto que tendría el aumento del nivel del mar para esta zona de estudio y que está estrechamente ligado a los escenarios anteriormente presentados en este informe.

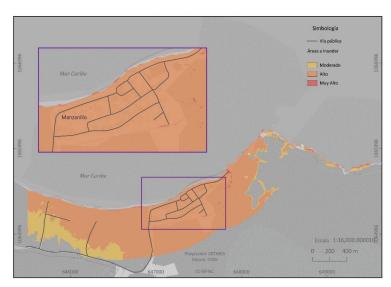


Figura 55 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea 1,66 m proyectada a 2030

**Datos propios. CC-BY-NC** 

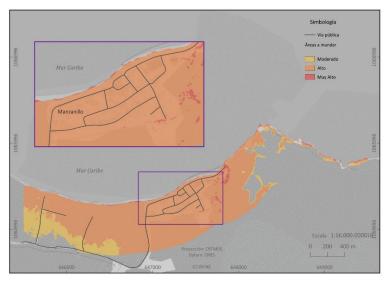


Figura 56 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea 1,79 m proyectada a 2050



Simbología
— Via pública
Areas a inundar
Mederado
Alto
Muy Alto

Mar Caribe

Mar Caribe

Figura 57 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea 1,96 m proyectada a 2070

**Datos propios. CC-BY-NC** 

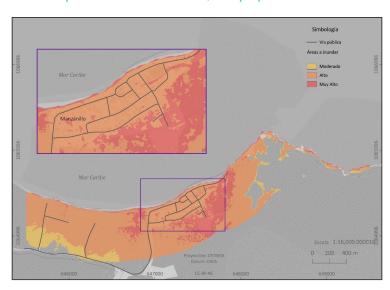


Figura 58 Zonificación por inundación ante el aumento del nivel del mar, ENOS, apilamiento con una marea 2,30 m proyectada a 2100

**Datos propios. CC-BY-NC** 

A partir de los mapas de zonificación de inundación ante el aumento del nivel del mar en combinación con el ENOS y el apilamiento del oleaje, se desprende que Manzanillo se encuentra sobre zonas moderadas ante estos eventos oceanográficos. Los procesos de llenado e inundación por este aumento se deben principalmente a la quebrada Hone Mark y la laguna que se encuentra al inicio de entrada al Refugio de Vida Silvestre que favorecen las inundaciones por las combinaciones de marea más los otros elementos analizados en la modelación. El frente costero se seguirá viendo afectado, lo que puede favorecer a un mayor incremento de la



erosión costera y la continua pérdida del perfil de playa. Hacia el 2030 con una combinación de factores, puede existir una afectación en el corto, mediano y largo plazo, según los escenarios generados de vulnerabilidad para los años 2030, 2050, 2070 y 2100, sobre la ruta secundaria 256, como se muestra en las figuras 55 a 58. Se debe prestar atención sobre esta ruta, con el fin de anticipar una solución definitiva ante lo mostrado en este informe.

Las zonas inundadas con un impacto moderado ante el aumento del nivel del mar se encuentran sobre todo en el frente costero, con un mayor impacto sobre las zonas cercanas a la quebrada y a la laguna. La situación cambia de forma paulatina hacia los años 2050, 2070 y 2100, donde cada vez más zonas de la comunidad de Manzanillo se verán impactadas por este aumento.

Para el caso de Manzanillo, las estructuras presentes en la comunidad se verán impactadas conforme pasen los años (Figuras 55-58). Por lo anterior, se recomienda el uso de estos mapas para informar y priorizar medidas de adaptación que permitan reducir o minimizar los riesgos de las comunidades o poblaciones que se verían afectadas. Como recomendación se podría pensar en la construcción de defensas costeras, reubicación de las comunidades, restauración de los ecosistemas costeros y promocionar prácticas de construcción sostenible.

## 4.2.3 Mapa geomorfológico costero de playa Manzanillo

El mapa de formas de relieve de playa Manzanillo se digitalizó a escala 1:1000 o superior, se compone de formas costeras y fluviales identificadas (Figura 59). Las formas costeras son escarpes de playa, salientes rocosas, playas de arena y estuarios. Los escarpes de playa presentes en esta costa son pendientes formadas en la playa por la acción del oleaje, que crean un pequeño talud en algunos casos de hasta 50 cm. Estos escarpes pueden formarse rápidamente durante tormentas o marejadas. En los últimos años dichas morfologías son indicativos de procesos de erosión costera activa, que pueden afectar la estabilidad de estructuras cercanas del Caribe Sur (Pérez-Briceño & Lizano, 2021; Barrantes-Castillo & Ortega-Otárola, 2023).

Las salientes rocosas son predominantemente plataformas de abrasión kársticas que sobresalen en la línea de costa producto del levantamiento coseísmico del Caribe Sur (Quesada-Román, 2021). Estas formaciones suelen ser resistentes a la erosión y pueden influir en la dinámica de las corrientes y la deposición de sedimentos. Proporcionan estabilidad a la costa y pueden crear hábitats coralinos únicos, pero también pueden desviar las corrientes y causar erosión en áreas adyacentes. Las playas de arena están formadas por la deposición de sedimentos traídos por las olas y las corrientes. Las playas pueden cambiar de forma y tamaño, debido a la dinámica costera. Actúan como amortiguadores naturales contra el oleaje, pero son altamente susceptibles a la erosión y la acumulación de arena. En el caso de los estuarios a la entrada del Parque Nacional Gandoca-Manzanillo es un área de alta biodiversidad y productividad biológica asociada con la conexión al mar de un gran humedal hacia el sureste. Actúa como amortiguador natural contra inundaciones costeras, así como filtradores de sedimentos y contaminantes.

Las formas fluviales se componen de planicies costeras onduladas y cerros costeros. Las planicies costeras onduladas se encuentran inclinadas hacia el mar Caribe. Se formaron durante el levantamiento del fondo marino o el descenso del nivel del mar, cuando afloran las superficies abrasivo-acumulativas de la plataforma, en este caso kárstica producto del levantamiento de los arrecifes de coral en eventos sísmicos como el terremoto de Limón en 1991 (Quesada-Román & Pérez-Briceño, 2019). Dicha superficie presenta una alternancia de elevaciones suaves y depresiones de poca inclinación, ocupadas por valles fluviales poco profundos. Los cerros costeros son elevaciones de terreno ubicadas cerca de la costa, en este caso de origen sedimentario detrítico o kárstico con un avanzado proceso de meteorización reflejado en sus suelos. Los cerros costeros pudieron estar formados por procesos tectónicos y erosionados por la acción de la disolución kárstica y el agua.

Las cortas playas de arena de playa Manzanillo, ya afectadas en muchos segmentos por escarpes de erosión, enfrentarán un impacto aún mayor debido al aumento proyectado del nivel del mar. Este fenómeno no solo exacerbará la erosión existente, sino que también propiciará la pérdida acelerada de estas playas y costas, vitales tanto para la biodiversidad costera como para las actividades humanas.



Además, amplios segmentos de estuarios y planicies costeras onduladas, como las presentes donde se asientan los habitantes en playa Manzanillo, experimentarán eventos de erosión costera más frecuentes e intensos. La morfología plano-ondulada particular de estas áreas, caracterizada por su susceptibilidad a los cambios dinámicos del litoral, las convierte en puntos críticos de vulnerabilidad. El aumento del nivel del mar no solo afectará la línea de costa, sino que también modificará las corrientes y patrones sedimentarios, lo cual incrementa la frecuencia y severidad de la erosión costera.

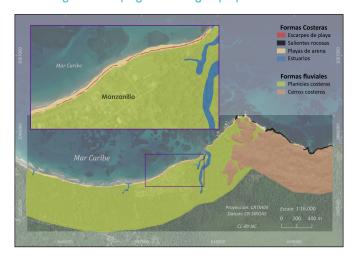


Figura 59 Mapa geomorfológico playa Manzanillo

**Datos propios. CC-BY-NC** 

## 4.2.4 Evaluación de la erosión costera

En la Figura 60 se observa la ubicación de los cinco perfiles levantados en campo: el primer perfil (P1) es representativo del sector cerca del acceso al Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo; el P2 muestra la pendiente en el sector donde los pescadores artesanales amarran sus embarcaciones; P3 la forma de la playa cambia y la presencia de vegetación es menor. El P4 ejemplifica el sector de "poyitos", estas mesas de concreto con sus sillas para el disfrute de los turistas y finalmente el P5 que es el más extenso se realizó en la zona de acumulación cerca de la quebrada Hone Mark.



Figura 60 Ubicación de los perfiles de laya en Manzanillo



Es importante considerar que en la costa Caribe la amplitud de la marea no supera los 0,50 m y, por tanto, no es muy apreciable la diferencia de la extensión de la playa en marea alta y marea baja a diferencia que sí ocurre en el Pacífico costarricense. Entonces, Manzanillo es una playa muy corta que no supera los 40 m en la parte más extensa. Las muestras de arenas de los cinco perfiles se caracterizaron por tener granos finos y muy finos, lo que implica que la playa es muy vulnerable a la erosión costera por su poca permeabilidad, mayor facilidad para el transporte de sedimentos por el agua o el viento por su diminuto tamaño. Además, la marea tiene menos capacidad de infiltrarse en la arena lo que aumenta la erosión superficial y sus pendientes suelen ser más suaves que las playas con granos gruesos. Justamente es lo que sucede entre Caldera y Manzanillo, esta última posee una menor pendiente (Friedman & Sanders, 1978).

La Figura 61 muestra las curvas granulométricas de las diez muestras de arena. Un patrón general que se identifica es que las muestras poseen una distribución de los acumulados por granos muy similar, tanto la que fue recolectada en la zona intermareal como en la zona seca, en donde el mayor porcentaje se identifica como arena fina.

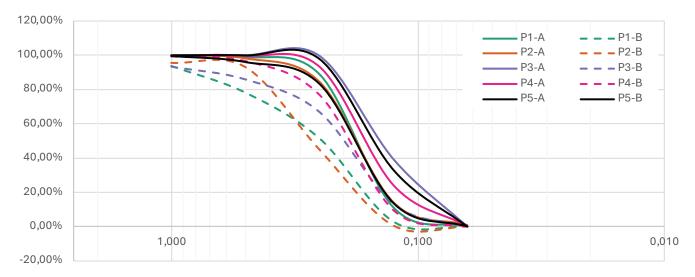


Figura 61 Curvas granulométricas Playa Manzanillo, 2024

Datos propios. CC-BY-NC

De cada curva se extrajo el valor de la mediana (D50), y de los diez valores se sacó el promedio para determinar el perfil de equilibrio de la playa. La Tabla 19 muestra las D50 de cada muestra y el promedio para playa Manzanillo, el cual es de 0,193 mm. Por tanto, la arena se considera fina, según la clasificación del Servicio Geológico de los Estados Unidos.



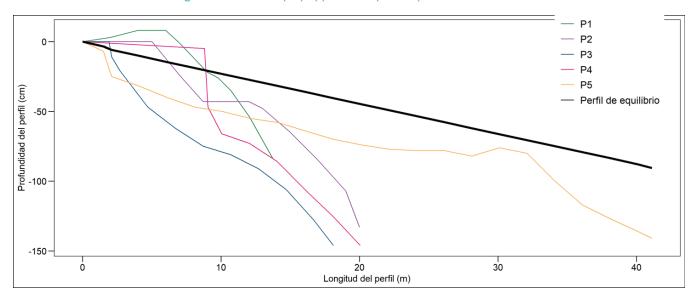
Tabla 19 Resultados D50 de las muestras de arena en playa Manzanillo

ID	D50 (mm)	Arena
P1-A	0,18	fina
P1-B	0,25	media
P2-A	0,18	fina
P2-B	0,28	media
РЗ-А	0,15	fina
Р3-В	0,2	fina
P4-A	0,16	fina
P4-B	0,19	fina
P5-A	0,16	fina
P5-B	0,18	fina
Promedio D50	0,193	fina

Nota: A: recolectada en la zona intermareal cerca de la marea baja, B en la berma.

A partir de este valor D50, se calculó la ecuación del perfil de equilibrio de Brunn, donde se obtuvo un valor de w= 44,697 y A= 2,715. Por lo tanto, la Figura 62 muestra los perfiles levantados en campo en contraposición del perfil de equilibrio. Todo lo que está por debajo de la línea negra indica erosión, mientras que lo que está encima es sedimentación.

Figura 62 Perfiles de playa y perfil de equilibrio para Manzanillo





Los perfiles del 1 al 4 son bastante cortos y tienen una inclinación hacia la playa. En P1 se puede observar una ligera acumulación de arena al inicio de la playa, pero luego cambia su morfología e indica erosión. Se observan palmeras cercanas a la playa y algunas que ya no están (Figura 63a), recordar que esto es cerca del acceso al Refugio. En P2 se pueden observar dos niveles (terrazas), además de la presencia de troncos caídos en la playa, así como otros volcados con las raíces totalmente expuestas (Figura 63b). En P3 se observa un en déficit de sedimentos, esta zona carece de vegetación cercana. En P4 se suelen reunir familias costarricenses para el disfrute de la playa en la zona de los "poyitos". Aquí se observa una terraza bastante plana y al acercarse al mar una grada de erosión de altura de más de 50cm grada, la exposición radicular es evidente, palmeras de gran altura basculadas hacia el mar y también troncos caídos por la ausencia del sustrato (Figura 63c y d). En P5 las condiciones cambian con respecto a los otros cuatro perfiles, porque se encuentra cerca de la desembocadura de la quebrada Hone Mark, lo cual le aporta sedimentos y hace que el perfil sea el más largo de esta playa; sin embargo, se encuentra en desequilibrio.

Playa Manzanillo también ha sido estudiada por Barrantes-Castillo et al. (2019) donde indica que la tasa de erosión entre el 2055 y 2020 era de 745 m2/año y que se incrementó a 1678 m2/año entre 2019 y 2016. Los autores no indican el volumen de arena removido. Esto ha hecho que la línea de costa esté en retroceso a causa de la erosión en la zona.



Figura 63 Evidencias de erosión costera en Manzanillo, 2024

Fotografías Propias. CC-BY-NC

Una vez analizados los perfiles de playa, el perfil de equilibrio y la observación en campo, se presenta el índice de erosión y sedimentación costera (Figura 64) donde se identifican las zonas más críticas de erosión con un nivel 3 (medio) en la zona de los "poyitos", un nivel 2 (leve) en el sector de la plaza de fútbol hacia el acceso al refugio y un nivel 1 (no apreciable) hacia la quebrada Hone Mark. A pesar de que el índice no arroja valores tan altos como en el Pacífico de Costa Rica, hay que recordar que la playa está protegida por un arrecife de coral que cubre el 7% de la playa (Cortés et al., 2010) y que no se encuentran gradas de erosión mayor al metro de altura, como lo indica el índice para catalogarse como nivel 4 o 5.

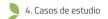




Figura 64 Índice de erosión y sedimentación costera para playa Manzanillo

**Datos propios. CC-BY-NC** 

## 4.2.5 Análisis multifactorial de las amenazas

Se obtuvo un modelo donde se integran las variables utilizadas en este estudio, dando como resultado la de la zona de Manzanillo. Es importante mencionar que se utiliza una marea de 1,53m para el 2030 con combinación de componentes: aumento del nivel del mar, marea máxima, apilamiento de oleaje y ENOS. Para el caso de Manzanillo, se obtiene como resultado los valores de la Tabla 20.

Tabla 20 Categorías del índice de amenazas multifactorial para Manzanillo, 2024

Nivel	Categoría	Descripción							
4	muy elevado	Las áreas indicadas resultan de una combinación de factores que representan un riesgo muy alto debido a la suma de mareas máximas, apilamiento de oleaje, ENOS, aumento del nivel del mar, geomorfología compleja, alto oleaje, alta erosión costera, baja elevación.							
3	elevado	Las áreas que presentan un alto nivel de riesgo debido a factores significativos, pero no extremos en comparación con las zonas etiquetadas como "muy alto riesgo". Estas áreas incluyen áreas con mareas y oleaje significativos, apilamiento de oleaje, ENOS, geomorfología moderadamente compleja, erosión costera significativa.							



Nivel	Categoría	Descripción
2	moderado	Las áreas que presentan una amenaza moderada tienen condiciones intermedias. Pueden ser zonas con oleaje y mareas moderadas, geomorfología estable, pero con algunos puntos críticos a los que se les debe prestar atención para anticipar los posibles impactos, erosión costera baja.
1	bajo	Finalmente, las áreas con baja amenaza presentan condiciones favorables según los criterios evaluados. Estas áreas pueden tener mareas y oleaje bajos, geomorfología estable, erosión costera baja, elevaciones altas y seguras, así como estructuras y caminos bien construidos y lejos de cualquier problema relacionado a la parte marina-costera.

#### **Datos propios. CC-BY-NC**

Por tanto, en las áreas cercanas a la quebrada Hone Mark, así como en el sector de la laguna –al ingreso al refugio – son zonas que en combinación con una marea de 1,53 m puede desencadenar un proceso de inundación hacia varios sectores de la comunidad, como se observa en la Figura 65. El frente costero seguirá siendo afectado por estas mareas, oleajes y las combinaciones con otros fenómenos, lo que seguirá favoreciendo e incrementando los temas de erosión costera.

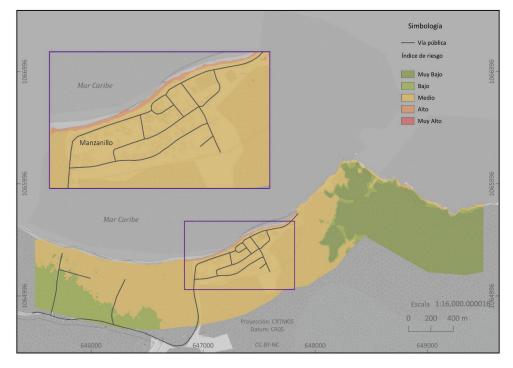
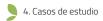


Figura 65 Índice de amenazas multifactorial Manzanillo, 2024

**Datos propios. CC-BY-NC** 



## 4.2.6 Conclusiones

Los escenarios de aumento del nivel del mar generados a futuro de Manzanillo muestran cómo se verá afectada esta región, sobre todo si se le suman otros fenómenos como el de El Niño, el apilamiento del oleaje, u otra variable que pueda afectar el frente costero, y que en un mismo día varios o todos estos fenómenos puedan superponerse, pues implicarían aumentos importantes en el nivel del mar, al punto que podrían ocasionar inundaciones mostradas en los escenarios de aumento de nivel del mar.

Los procesos de inundación costera son favorecidos por la presencia de esteros, quebradas y ríos, al tener estos la capacidad del transporte del agua y sedimentos en una marea alta favorece el derrame de la marea hacia zonas más bajas. Al aumentar el nivel del mar, más áreas se verían afectadas en playas que tengan este tipo de morfología marina como el caso de Manzanillo y donde queda evidenciado por los resultados obtenidos.

De acuerdo con los escenarios generados puede existir una afectación sobre ruta de acceso (calle Mirador) hacia el refugio nacional en el corto plazo, por lo que se debe prestar atención a este tipo de fenómenos con el fin de que las comunidades no queden incomunicadas o tengan que buscar rutas alternas que aumenten el tiempo de desplazamiento en un futuro cercano. Esto queda más que plasmado con el escenario de 1,32 m para el 2030.

En Manzanillo se aprecia un proceso erosivo muy intenso a lo largo de la playa, como se observa en los perfiles de playa que demuestra que la playa tiene un déficit de sedimento. Esta relación eventualmente podría causar la pérdida de más terreno y la intrusión salina si existen acuíferos subterráneos cercanos a las zonas de inundación. El análisis geomorfológico de Manzanillo ha revelado una diversidad de formas del relieve costeras y fluviales, así como una significativa influencia de actividades humanas. Estas playas se caracterizan por su corta anchura donde ya en sectores puntuales presentan claros escarpes de erosión de hasta 50 cm paralelamente a la carretera pavimentada que llega a Manzanillo, con árboles y palmeras con raíces expuestas y vegetación inclinada hacia el mar.

Con base en el mapeo de zonificación ante el aumento del nivel del mar para la zona de estudio, se recomienda que las autoridades competentes articulen esfuerzos para generar medidas propositivas a nivel constructivo (cambios en la tipología constructiva, por ejemplo: construcción en pilotes como tradicionalmente se observa en la región con una altura superior o igual a 2 metros, entre otros elementos) y que tomen en cuenta el componente cultural y social de las poblaciones que tradicionalmente ha vivido en la región, con el fin de brindar posibles soluciones a futuro ante la problemática expuesta en este informe.

Se recalca la importancia de que las autoridades de Manzanillo que inicien y generen esfuerzos de educación y concientización sobre los impactos del aumento del nivel del mar y otras variables oceanográficas, así como la importancia que tiene la adaptación ante este tipo de fenómenos. El involucramiento de la comunidad y los diversos actores es vital para que puedan respaldar las acciones a tomar en el corto, mediano y largo plazo en la comunidad. Los sitios más seguros se encuentran hacia la entrada al refugio de vida silvestre y hacia los manglares de Punta Uva en el sector oeste de la entrada principal a la comunidad de Manzanillo.

Mantener la protección y conservación de la cobertura forestal del sector es imprescindible, ya que se puede ver cómo una zona de amortiguamiento funciona ante los efectos de los oleajes e ingreso del mar a las zonas de humedales existentes en la zona.

Es importante aclarar que conforme aumente el nivel del mar en combinación con los otros componentes indicados en este informe, la exposición de la amenaza multifactorial incrementará hacia valores altos, muy altos y extremos conforme pasen los años. Por consiguiente, las autoridades y la comunidad deben estar preparadas ante los eventos oceanográficos descritos en este informe y que como se evidencia para esta área en particular, tiene una afectación directa sobre las estructuras de la zona y en la calidad de vida de sus habitantes.



### 4.2.7 Limitaciones

- 1. El modelo utilizado en los escenarios de aumento del nivel del mar no toma en cuenta la hidráulica para cada zona de estudio, así como los levantamientos o hundimientos de los bloques litológicos, ni otros elementos como precipitaciones o tsunamis que puedan afectar las áreas del trabajo.
- 2. Es importante mencionar que un componente que no se incluyó en este estudio es el aumento del nivel del mar por un tsunami. Los escenarios incluidos aquí también sirven para sobreponer este componente a las condiciones de la marea existente en el momento de arribo de un tsunami y constituye una herramienta válida para que las autoridades respectivas evalúen las condiciones del nivel del mar ante un evento de este tipo en el mar Caribe.

## 4.2.8 Recomendaciones

- 1. Por el grado de importancia del tema en el corto, mediano y largo plazo hacia la comunidad de Manzanillo, se insta a las autoridades respectivas a invertir en equipo tecnológico que permita cuantificar estos escenarios de forma más precisa. Para ello se recomienda instalar un mareógrafo en la región del Caribe del país, que permita medir y obtener patrones sobre el nivel del mar y su aumento, con el fin de tener un registro continuo de esas variaciones, lo cual puede ayudar a prevenir y mitigar posibles amenazas como las citadas en este documento.
- 2. Es vital que se incluya en el plan regulador costero ya sea en su formulación o actualización los componentes mareográficos como el aumento del nivel del mar (por cambio climático y otros fenómenos como el ENOS, el apilamiento del oleaje) así como los temas de erosión costera y cambios de las formas costeras, con el fin de que el instrumento para el ordenamiento y planificación territorial sea lo más integrador posible y permita una mejor toma de decisiones en todo ámbito. No como hoy en día que no incorpora este tipo de variables o se toma como estática cuando no lo es.
- 3. Se recomienda a las autoridades correspondientes contar con algún plan de acción o de emergencia, o un sistema de alerta comunal y definir los sitios seguros, para eventos que produzcan el aumento del nivel del mar y otros tipos de impactos costeros.
- 4. Para las zonas que aparecen en la zonificación catalogadas como alta y moderada exposición, se debe evitar cualquier tipo de desarrollo urbano nuevo, así como la construcción estructuras críticas, como EBAIS, escuelas, colegios, Cruz Roja, bancos, entre otros. Si se llega a dar la construcción, debería valorarse realizar obras sobre pilotes a una altura igual o mayor a 2 m. Para las estructuras que ya existen, como la escuela primaria, se podría valorar su traslado a una zona fuera del área de inundación que sería una zona segura. Lo mismo en el caso del cementerio de la localidad, valorar la opción de trasladarlo o crear uno nuevo siempre y cuando dentro del proceso se respeten las creencias y deseos de la comunidad.
- 5. Se insta a que las autoridades establezcan regulaciones y políticas que promuevan prácticas de construcción sostenible y resiliente en estas áreas, respetando la normativa vigente y que sean acordes con las condiciones ambientales de la región.
- 6. Proteger y restaurar los ecosistemas costeros (manglares y arrecifes de coral) donde sea posible y las características de la zona lo permitan, ya que esto ayudaría a fortalecer la resiliencia costera y a preservar la biodiversidad de las zonas afectadas. Para el caso de playa Manzanillo estas, las zonas por mantener o regenerar con especies nativas son las que limitan con el frente de la playa hasta la entrada al refugio, así como el sector costero que une con Punta Uva. Con respecto a los corales, se recomienda evaluar un seguimiento que permita conocer el estado y la salud de estos ecosistemas al menos cada 6 meses.
- 7. Actualizar las mediciones para la definición de la zona pública en Manzanillo con el fin de garantizar la seguridad y el desarrollo



sostenible de la comunidad, dado que en Costa Rica hay zonas donde no es clara la delimitación y se establece de manera empírica permitiendo el uso de un espacio que le pertenece al Estado (ley 6043). Esta medición permite proteger infraestructuras críticas, mitigar riesgos para la población, conservar valiosos ecosistemas costeros y planificar adecuadamente el uso del suelo. Además, proporciona datos esenciales para la preparación y respuesta ante emergencias, al mejorar la resiliencia frente a cualquier desastre.

- 8. Las soluciones basadas en la naturaleza como la creación de dunas artificiales y la revegetación de playas (ingeniería blanda) son un gran aliado como defensa natural contra el oleaje y las tormentas, por lo que se recomiendan nuevos estudios que permitan valorar si estas soluciones pueden beneficiar o no a la comunidad.
- 9. La planificación debe considerar los mapas geomorfológicos y las proyecciones de aumento del nivel del mar para el año 2050, si el plan regulador no ha iniciado el proceso de creación o actualización, con el fin de definir zonas de amenaza y limitar el desarrollo en estas áreas.
- 10. Promover la educación y concienciación de las comunidades locales sobre la importancia de los ecosistemas costeros y las prácticas sostenibles para su conservación.
- 11. Para temas de ordenamiento territorial, se puede realizar la extracción de las curvas de inundación de cada escenario generado en este estudio, con la finalidad de que se pueda consultar la altura de inundación según el sector de la playa. Esto puede realizarse en el software de QGIS con la herramienta llamada curvas de nivel y en ArcGIS con la herramienta contorno.



# 5. Bibliografía

Arias, R., Madrigal, A., y Vargas, L. (2019). Desarrollo portuario y transformación productiva en Costa Rica: Los casos de Puerto Moín y Puerto Caldera. Informe Final. Instituto de Investigaciones Económicas. Universidad de Costa Rica. 76 pp.

Barrantes-Castillo, G., Arozarena-Llopis, I., Sandoval-Murillo, L. y Valverde-Calderón, J. F. (2019). Critical beaches due to coastal erosion in the Caribbean south of Costa Rica, during the period 2005-2016. Revista Geográfica de América Central, 1(64), 123–150. https://doi.org/10.15359/rgac.64-1.5

Barrantes-Castillo, G. y 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

BBC. (2019). Súper El Niño", la peligrosa versión del fenómeno climático que se hace cada vez más frecuente en el Pacífico. <a href="https://www.bbc.com/mundo/noticias-50147616">https://www.bbc.com/mundo/noticias-50147616</a>

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 (2013). <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818121001144">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818121001144</a>.

Bird, E. (2008). Coastal Geomorphology: An Introduction. Gran Bretaña: Wiley.

Bruun, P. (1954). Coastal Erosion and Development of Beach Profiles, U.S. Army Beach Erosion Board Technical Memorandum, U.S. Army, Corps of Engineers. Waterways Exp. Station, N° 44, Vicksburg, Mississippi.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe, & Universidad de Cantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental. (2012). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. CEPAL. Recuperado a partir de <a href="http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3996/1/52012064\_es.pdf">http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3996/1/52012064\_es.pdf</a>

Cortés, J., Jiménez, C., Fonseca, A. y Alvarado, J. J. (2010). Status and conservation of coral reefs in Costa Rica. Revista de Biología Tropical, 58 (suppl.1), 33-50.

Dean, R. G. (1977). Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts. Department of Civil Engineering, Report 12, University of Delaware, Newark.

Dean, R. G. (1991). Equilibrium Beach Profile: Characteristics and Applications. Journal of Coastal Research, 7(1), 53–84.

Denyer, P., Arias, O. y Personius, S. (1994). Efecto tectónico del terremoto de Limón. Revista Geológica de América Central, Volumen Especial del Terremoto de Limón, 39-52.

Díaz-Andrade, J. (1999). Determinación de las zonas de riesgo ante un ascenso del nivel del mar: Punta Morales-Tárcoles (Informe Final). MINAE-IMN. San José, Costa Rica, 59 pp.

Dyer, K. (1986). Coastal and Estuarine Sediments Dynamics. Gran Bretaña: Wiley

Friedman, G. y Sanders, J. (1978). Chapter 3: Properties of Sedimentary Particles. En Principles of Sedimentolgy (pp. 58–81). New York: John Wiley & Sons.



Guell-Vargas, D., Pineda-Ledezma, E. y Salas-González, D. (2000). Procesos hidrogeomorfológicos de transporte y sedimentación del sistema Lagunar de Mata de Limón. (Práctica Dirigida). Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Sociales, Escuela de Geografía. Recuperado a partir de <a href="https://onedrive.live.com/?authkey=%21AOGWjYdibxWxgpA&cid=648B206E10BCEF77&id=648B206E10BCEF77%21177&parld=648B206E10BCEF77%21118&o=OneUp">https://onedrive.live.com/?authkey=%21AOGWjYdibxWxgpA&cid=648B206E10BCEF77&id=648B206E10BCEF77%21177&parld=648B206E10BCEF77%21118&o=OneUp</a>

Hall, C., Pérez Brignoli, H., & Cotter, J. V. (Eds.). (2003). Historical atlas of Central America. University of Oklahoma Press.

Hedges, T.S. y Mase, H. (2004). Modificed Hunt's Equation Incorporting Wave Setup-. J. of Water, port, coast, and ocean Engineer, 109-113.

INCOP. (2024). Reseña Histórica. Recuperado el 5 de mayo de 2024 (https://incop.go.cr/historia/)

IPCC. (2019). Summary for Policymakers. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. [Consulta: 05 mayo 2021]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers

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.

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. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. InterSedes, 14(27), 06-27.

Lizano, M.A. y O.G. Lizano. (2010). Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. InterSedes. Universidad de Costa Rica. XI (21): 215-229.

Lizano, M y O, Lizano. (2018). Escenarios ante el aumento del nivel del mar para las localidades de Moín y Cahuita, Limón, Costa Rica. Memoria IV Congreso Nacional de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático. Universidad Nacional, Comisión Nacional de Emergencias. San José, Costa Rica. Págs. 44-46 ISBN 978-9930-9684-0-6

Lizano, M.A. y O.G. Lizano. (2020). Escenarios ante el aumento del nivel del mar por cambio climático para la localidad del Cocal, Puntarenas, Costa Rica. Geofocus. Número 26. p.3-20.

Lizano, M.A. y Lizano, O.G. (2022). Creación de escenarios ante el aumento del nivel del mar para las localidades de Moín y Cahuita, Limón, Costa Rica. Revista Geográfica de América Central. 68(1). 103-126.

Lizano, O.G. y Pérez Briceño, P. (2021). Erosión costera y estabilidad de playas en Limón, Mar Caribe, Costa Rica. Revista Geográfica de Chile Terra Australis, 57(1), 96–110. <a href="https://doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Lizano96">https://doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Lizano96</a>



Lizano, O.G. y Salas, D. (2001). Variaciones geomorfológicas en los últimos 50 años de la Isla Damas, Quepos, Costa Rica. Rev. Biol. Trop., 2, 171-177.

NOAA. (2024). Cold & Warm Episodes by Season. Climate Prediction Center. <a href="https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\_monitoring/ensostuff/ONI\_v5.php">https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\_monitoring/ensostuff/ONI\_v5.php</a>

Pérez-Briceño, P. M., Amador, J. y Alfaro, E. J. (2017). Dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense según el sistema de Thornthwaite. Revista de Climatología, 17, 1–16.

Pino, M., & González, C. (2008). Guía Práctica de geología costera y playas. En J. P. Bergoeing G, & L. G. Brenes Quesada, Prácticas de la Geografía (Vol. 2, pp.119-138). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Protti, M., González, V., Newman, A. V., Dixon, T. H., Schwartz, S. Y., Marshall, J. S., ... y Owen, S. E. (2014). Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. Nature Geoscience, 7(2), 117-121.

Quesada-Román, A., y Pérez-Briceño, P. M. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica. Journal of maps, 15(2), 363-371. <a href="https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1600592">https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1600592</a>

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

Sociedad Portuaria, Puerto Caldera. 2024. Puerto Caldera Recuperado el 5 de mayo de 2024. (<a href="https://www.spcaldera.com/?page\_id=230">https://www.spcaldera.com/?page\_id=230</a>).



## A. Lista de contactos o instituciones

Institución	Enlace	Contacto
Universidad Nacional Escuela	Gustavo Barrantes Castillo	gustavo.barrantes.castillo@una.cr
de Ciencias Geográficas		
SINAC	Secretaría ejecutiva	info@sinac.go.cr
MINAE	Daniela Flores	cambioclimatico@minae.go.cr
Universidad de Costa Rica INIE	George Govaere Vicarioli	georges.govaere@ucr.ac.cr
(IMARES)		
Comisión Nacional De	Lidier Esquivel Valverde	lesquivel@cne.go.cr
Prevención De Riesgos		
Y Atención De Emergencias		
Capitanía de Puerto Caldera		+506 2634 4271
Comité de emergencias Talamanca		CME.Talamanca@cne.go.cr
Asociación de Vecinos de Caldera	Douglas Arce	+506 8633-7852
Instituto Meteorológico Nacional	Marilyn Calvo Méndez	mcalvo@imn.ac.cr
Secretaría técnica ambiental	Nuria Chavarría Campos	nchavarria@setena.go.cr
Instituto Costarricense de Turismo	Luis Lemus Zamor	luis.lemus@ict.go.cr



# B. Cronograma

			Abril Mayo				Jur	iio			Julio				Agosto					
TAREA		Meses	sem 3	sem 4	sem 1	sem 2	sem 3	sem 4	sem 1	sem 2	sem 3	sem 4	sem 1	sem 2	sem 3	sem 4	sem 1	sem 2	sem 3	sem 4
Etapa 1 Levantamiento de campo y corrección de datos existentes		2																		
Adquisición, revisión, corrección, validación de datos			х	х	х	х														
Batimetría de Limón						x												П		
Batimetría de Puntarenas									х											
Bajar datos de oleaje de la NOAA							х													
Mediciones a nivel de marea						х			х											
Perfiles de playa Caldera				х																
Perfies de Playa Manzanillo						x														
Geomorfología Etapa 1			х	х	x	х	х													
Etapa 2 Procesamiento de datos		1																		
Procesamiento de datos de batimetría y oleaje							х	x	x	x										
Traslado de sistema de coordenadas																				
Procesamiento de muestra de playas y datos sobre los perfiles obtenidos							х	x	x	x										
Geomorfología Etapa 2								x	x	x	х							П		
Etapa 3 Definición del MED		1																		
Generación de la superficie batimétrica-topográfica												х								
Elección del método de interpolación																				
Generación del MED													x							
Índice de erosión y Sedimentación costera												x	x	x	x			П		
Geomorfología Etapa 3												х	x	x	х					
Etapa 4 Generación de los productos finales		1																		
Creación de capas de los niveles de marea																				
Utilización de la técnica de álgebra de mapas																				
Extracción de las areas inundables, zonas de erosión costera y generación curvas de inundación y mapas finales														х	х	x	x			
Elaboración de informe															x	x	x			
Ofrecer el taller de difusión y devolución de resultados																x	х			
Entrega de la guía metodológica																	x			
Plan ejecución de monitoreo																	x			



# C. Validación en campo del modelo en Puntarenas



## D. Productos iMares



Figura No. 5.8. Alternativa 2. Cuatro espigones perpendiculares a la playa.





Figura No. 5.15. Alternativa 3. Tres espigones, dos perpendiculares y uno exento a la playa.



Figura No. 5.22. Alternativa 4. Siete espigones perpendiculares y rehabilitación de espigón existente.



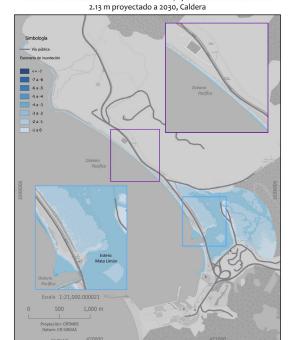


Figura No. 5.29. Alternativa 5. Dos diques exentos y dos perpendiculares a la playa.

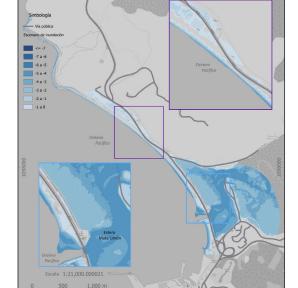
## E. Validación en campo del modelo en Puntarenas

A continuación, se presentan los escenarios de aumento del nivel del mar tomando en cuenta el nivel de marea más el valor correspondiente al apilamiento del oleaje.

## i. Caldera



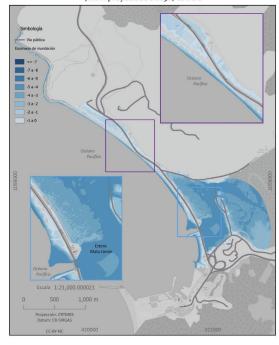
Escenario ante el aumento del nivel del mar, apilamiento con una marea



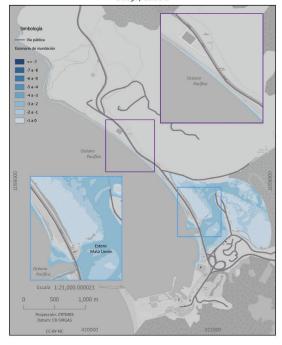
Escenario ante el aumento del nivel del mar, apilamiento con una marea

3.53 m proyectado a 2030, Caldera

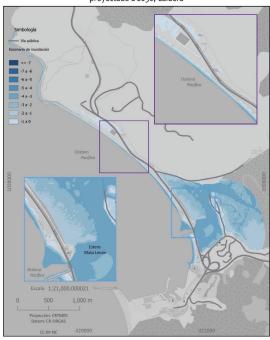
Escenario ante el aumento del nivel del mar, apilamiento con una marea 4.02 m proyectado a 2030, Caldera



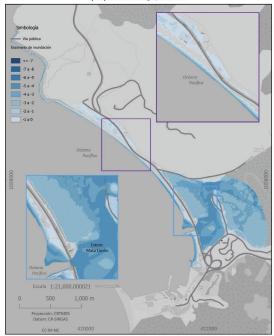
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 1.51 m proyectado a 2030, Caldera



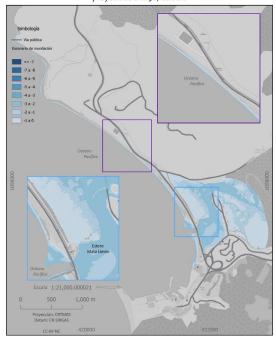
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 2.91 m proyectado a 2030, Caldera



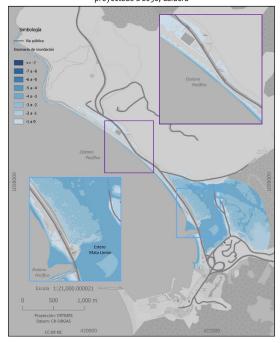
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3.40 m proyectado a 2030, Caldera



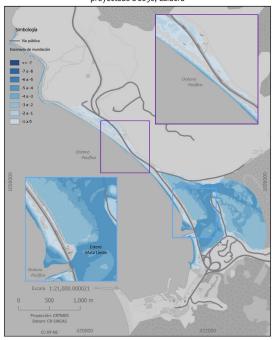
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 1.64 m proyectado a 2050, Caldera



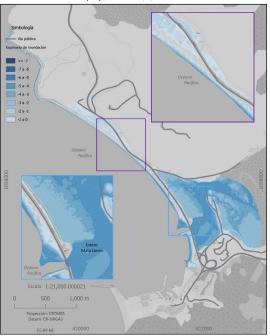
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3.04 m proyectado a 2050, Caldera



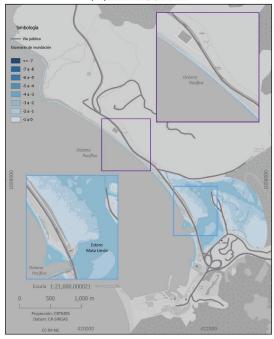
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3.53 m proyectado a 2050, Caldera



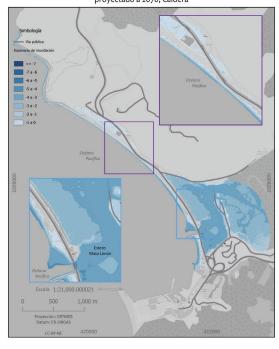
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3.70 m proyectado a 2070, Caldera



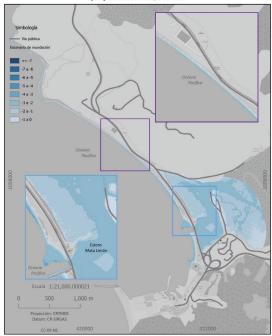
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 1.81 m proyectado a 2070, Caldera



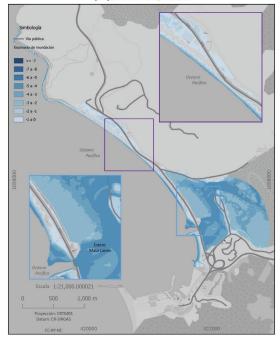
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3.21 m proyectado a 2070, Caldera



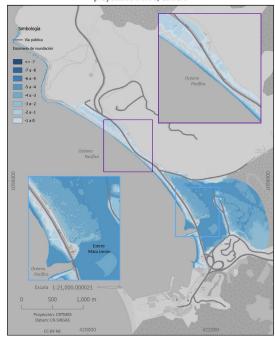
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 2.15 m proyectado a 2100, Caldera



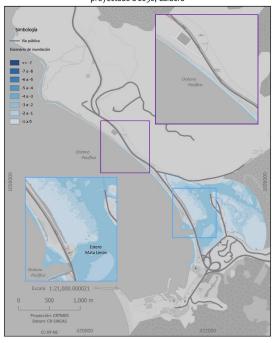
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 3.55 m proyectado a 2100, Caldera



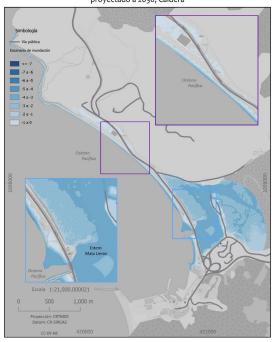
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 4.02 m proyectado a 2100, Caldera



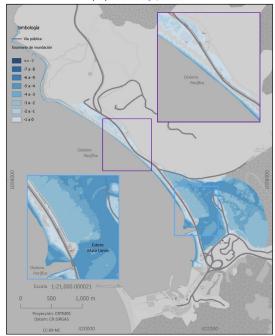
Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS con una marea 1.70 m proyectado a 2030, Caldera



Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS con una marea 3.10 m proyectado a 2030, Caldera



Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS con una marea 3.59 m proyectado a 2030, Caldera





## ii. Manzanillo

Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.27 m proyectado a 2030, Manzanillo



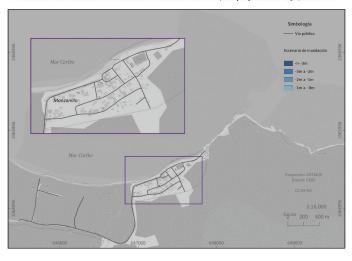
Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.48 m proyectado a 2030, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.61 m proyectado a 2030, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.40 m proyectado a 2050, Manzanillo



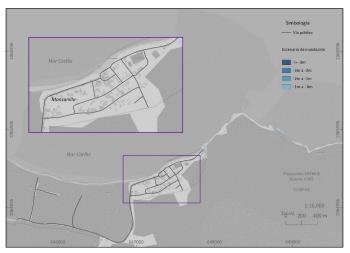
#### Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.61 m proyectado a 2050, Manzanillo



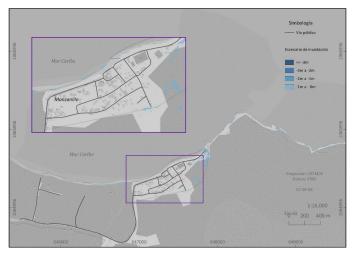
#### Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.74 m proyectado a 2050, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.57 m proyectado a 2070, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.78 m proyectado a 2070, Manzanillo



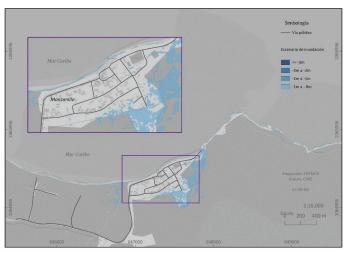
#### Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.91 m proyectado a 2070, Manzanillo



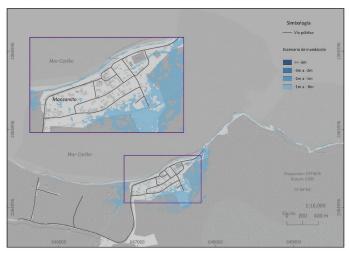
#### Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 0.91 m proyectado a 2100, Manzanillo



#### Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 1.12 m proyectado a 2100, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar con una marea 1.25 m proyectado a 2100, Manzanillo



#### Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS con una marea 0.45 m proyectado a 2030, Manzanillo



#### Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS con una marea 0.66 m proyectado a 2030, Manzanillo



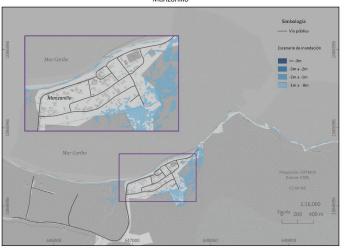
Escenario ante el aumento del nivel del mar, ENOS con una marea 0.79 m proyectado a 2030, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar, apilamiento con una marea 0.90 m proyectado a 2030, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar, apilamiento con una marea 1.11 m proyectado a 2030, Manzanillo



Escenario ante el aumento del nivel del mar, apilamiento con una marea 2.17 m proyectado a 2030, Manzanillo

