

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**

Lineamientos para el manejo basado en Caracterización Costera: Tortuga Bay,  
Galápagos

INGE-2613

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Oceanográfico**

Presentado por:

Ángeles Vanessa Casa Pérez

Vivian Nicole Montenegro García

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## Dedicatoria

---

Dedico este trabajo a mi Dios creador y dador de vida; a mis padres, quienes me han ayudado en cada paso de mi vida apoyando cada una de mis decisiones y a mi novio que siempre me ha impulsado a no rendirme para cumplir mis sueños,

¡Muchas gracias por estar para mí cuando más los necesito!

- Ángeles Casa Pérez

A mi mamá por creer y confiar en mí cuando yo no, a mi papá por motivarme a superarme, a mi abuelita María por siempre estar pendiente de mí, A Joha, a mis tíos, a mis suegros por su incesante apoyo y a mis hermanos que me llenan de alegría.

Finalmente, pero no menos importante, a mi esposo por acompañarme en esta travesía y a mi Padre Celestial por bendecir mis esfuerzos.

- Vivian Montenegro García

## Agradecimientos

---

Agradecemos a Dios por la oportunidad que nos dio para poder realizar este proyecto.

Mi más sentido agradecimiento al Ing. Rommel Chicaiza por permitirnos contribuir en este trabajo, a la MSc. Gina Andrade como nuestra tutora y al Ing. Rafael González quienes nos han ayudado y brindado todo su apoyo en el proceso y a la Dra. Macarena Parra como Investigadora de la Fundación Charles Darwin quien nos proporcionó la información necesaria para este documento.

## Declaración Expresa

---

Nosotros Ángeles Vanessa Casa Pérez y Vivian Nicole Montenegro García acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

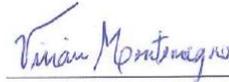
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 24 de junio del 2024.



Ángeles Vanessa Casa  
Pérez



Vivian Nicole  
Montenegro García

## **Evaluadores**



Firmado digitalmente por:  
**JORGE WASHINGTON  
ESPINOZA AMAGUANA**

---

**Jorge Washington Espinoza Amaguaña**

Profesor de Materia Integradora



Firmado digitalmente por:  
**GINA MARIA ANDRADE  
GARCIA**

---

**Gina María Andrade García**

Tutor de Proyecto Integrador

## Resumen

El presente trabajo de tesis se enfoca en la caracterización litoral de la playa Tortuga Bay, ubicada en la Isla Santa Cruz del Archipiélago de Galápagos, con el fin de establecer lineamientos para un manejo costero sostenible. Dada la vulnerabilidad de las islas tropicales frente al cambio climático y la erosión costera, se implementaron metodologías que incluyen la recolección de datos históricos de oleaje, mareas y vientos, así como la aplicación de modelos computacionales y la validación de datos a través de salidas de campo en diferentes épocas del año.

El análisis de las tasas de erosión y acreción, realizado con herramientas de sensores remotos como CoastSat y DSAS, reveló que la mayor erosión ocurrió durante la época húmeda, con valores significativos especialmente en el sector 3 de la playa, donde se registró una tasa de erosión de  $-0.46$  m/año. En contraste, la época seca mostró una tendencia hacia la acreción en varios puntos de la playa, destacándose el sector 1 con una tasa de acreción de  $0.23$  m/año. Estos resultados permitieron la sectorización del área de estudio y la propuesta de medidas específicas para la conservación de los servicios ecosistémicos de la playa, apoyando así la toma de decisiones informadas para la gestión de la zona.

Este estudio contribuye al desarrollo de un plan de manejo costero que permitirá mitigar los impactos del cambio climático y promover un turismo sostenible en Tortuga Bay, dando resultados alineados a los ODS 13 de Acción por el Clima, 14 sobre la Vida Submarina y el 17 buscando alianzas para lograr los objetivos.

**Palabras Clave:** Cambio climático, erosión costera, manejo costero, Tortuga Bay, sensores remotos, caracterización litoral.

## Abstract

This thesis focuses on the coastal characterization of Tortuga Bay beach, located on Santa Cruz Island in the Galápagos Archipelago, with the aim of establishing guidelines for sustainable coastal management. Given the vulnerability of tropical islands to climate change and coastal erosion, methodologies were implemented, including the collection of historical data on waves, tides, and winds, as well as the application of computational models and data validation through field trips during different seasons.

The analysis of erosion and accretion rates, was done with tools of remote sensing such as CoastSat and DSAS, revealed that the highest erosion occurred during the wet season, with significant values, particularly in sector 3 of the beach, where an erosion rate of  $-0.46$  m/year was recorded. In contrast, the dry season showed a trend towards accretion in several points of the beach, with sector 1 standing out with an accretion rate of  $0.23$  m/year. These results allowed for the sectorization of the study area and the proposal of specific measures for the conservation of the beach's ecosystem services, thereby supporting informed decision-making for the area's management.

This study contributes to the development of a coastal management plan that will help mitigate the impacts of climate change and promote sustainable tourism in Tortuga Bay, giving results aligned with SDG 13 on Climate Action, 14 on Underwater Life and 17 seeking alliances to achieve the objectives.

**Keywords:** Climate change, coastal erosion, coastal management, Tortuga Bay, remote sensing, coastal characterization.

## Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VII
Simbología.....	VIII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema.....	4
1.4 Objetivos.....	6
<i>1.4.1 Objetivo general.....</i>	<i>6</i>
<i>1.4.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>6</i>
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 Área de estudio.....	6
1.5.2 Características geomorfológicas.....	8
1.5.3 Oleaje.....	8
1.5.4 Mareas.....	12
1.5.5 Vientos.....	12
1.5.6 Erosión Costera.....	13
1.5.7 Manejo Costero.....	14

1.5.8 Concentración energética del oleaje.....	16
1.5.9 Delft 3D Wave.....	16
Capítulo 2.....	17
2. Metodología .....	18
2.1 Descripción General.....	18
2.2 Caracterización de la playa .....	19
2.2.1 Data histórica de oleaje y vientos .....	19
2.2.2 Marea .....	20
2.2.3 Batimetría.....	20
2.3 Identificación de puntos con mayor concentración energética de oleaje .....	20
2.3.1 Calibración del Modelo.....	21
2.4 Obtención del Histórico de líneas de costa .....	21
2.4.1 Uso del Código de CoastSat.....	21
2.4.2 Corrección de georreferenciación .....	22
2.4.3 Obtención de líneas de costa.....	23
2.4.4 Corrección de mareas.....	23
2.5 Retroceso de línea de costa .....	24
2.5.1 Cuantificación de retroceso de línea de costa .....	24
2.6 Salida de Campo y Validación de Datos .....	25
2.6.1 Mediciones Litorales.....	25
2.6.2 Corriente Litoral.....	26

2.6.3 Vientos .....	27
2.6.4 Olas .....	27
2.6.5 Muestra de arena y clasificación granulométrica.....	28
2.6.6 Perfiles de playa.....	28
Capítulo 3.....	30
3. Resultados y Análisis .....	31
3.1 Puntos de concentración energética .....	31
3.1.1 Validación y Calibración de resultados .....	35
3.2 Resultados de retroceso de línea de costa con DSAS .....	36
3.2.1 Tasas de erosión .....	38
3.2.2 Análisis de retroceso de línea de costa.....	40
3.3 Sectorización del área de estudio .....	41
3.4 Salida de Campo .....	43
3.4.1 Observaciones de Oleaje.....	44
3.4.2 Ortogonal y línea de playa .....	48
3.4.3 Corriente Litoral.....	49
3.4.4 Perfiles de playa.....	50
3.4.5 Granulometría y obtención del D50.....	52
3.4.6 Clasificación del tipo de ola rompiente.....	53
3.4.7 Estado morfológico de la playa.....	54
3.4.8 Transporte de sedimentos.....	55

3.5 Mapa de Sectorización de resultados .....	56
3.5.1 Sectorización para la Época Húmeda.....	56
3.5.2 Sectorización para la Época Seca.....	57
3.6 Propuesta de soluciones .....	57
3.6.1 Primer propuesta: Lineamientos para un manejo regulatorio .....	58
3.6.2 Segunda propuesta: Lineamientos para el manejo basado en la sensibilización.....	61
3.7 Ventajas y desventajas generales de cada propuesta .....	64
3.8 Análisis de Costos .....	66
3.8.1 Costos referenciales de la primera propuesta: Lineamientos para un manejo regulatorio .....	66
3.8.2 Costos referenciales de la segunda propuesta: Lineamientos para un manejo basado en la sensibilización.....	67
Capítulo 4.....	73
4. Conclusiones y Recomendaciones .....	74
4.1 Conclusiones.....	74
4.2 Recomendaciones .....	76
Bibliografía .....	77

## Abreviaturas

<b>UNCED</b>	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el Desarrollo
<b>GESAMP</b>	Grupo de Expertos sobre los aspectos científicos de la protección ambiental marina
<b>WWF</b>	World Wildlife Fund
<b>TOA</b>	Top of atmosphere
<b>DSAS</b>	Sistema Digital de Análisis de Costas
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>SWAN</b>	Simulating Waves Nearshore
<b>GEBCO</b>	General Bathymetric Chart of the Ocean
<b>GEE</b>	Google Earth Engine
<b>INOCAR</b>	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<b>ENOS</b>	El Niño Oscilación Sur
<b>CSV</b>	Comma Separated Values
<b>MLWS</b>	Mean Low Water Spring
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible

## Simbología

<b>Hs</b>	Altura Significativa
<b>T</b>	Periodo
<b>Ws</b>	Velocidad de caída de sedimento
<b>Hb</b>	Altura de ola rompiente
<b>m</b>	Metro
<b>km</b>	Kilómetro
<b>min</b>	Minutos
<b>cm</b>	Centímetro
<b>W/s</b>	Watts/segundo

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Rango de marea en Puerto Ayora .....	12
<b>Tabla 2:</b> Coordenadas del área seleccionada para descargar las imágenes satelitales .....	22
<b>Tabla 3:</b> Satelites utilizados y años para la selección de imágenes satelitales .....	22
<b>Tabla 4:</b> Coordenadas de estaciones en Tortuga Bay .....	25
<b>Tabla 5:</b> Clasificación de la playa por el número de Dean.....	29
<b>Tabla 6:</b> Líneas de costa para el análisis estacional .....	38
<b>Tabla 7:</b> Tasa de erosión de los análisis realizados .....	39
<b>Tabla 8:</b> Sectorización del área de estudio .....	41
<b>Tabla 9:</b> Clasificación de tasa de erosión basada en el valor de LRR.....	42
<b>Tabla 10:</b> Altura promedio, máximo y mínimo de olas observadas de cada estación del 29/04/2024.....	45
<b>Tabla 11:</b> Altura promedio, máximo y mínimo de olas observadas de cada estación del 22/07/2024.....	45
<b>Tabla 12:</b> Periodo promedio, máximo y mínimo de cada estación del 29/04/2024 .....	47
<b>Tabla 13:</b> Periodo promedio, máximo, mínimo de cada estación del 22/07/2024 .....	47
<b>Tabla 14:</b> Dirección de playa y Ortogonal de cada estación en la salida del 29/04/2024 .....	49
<b>Tabla 15:</b> Dirección de playa y Ortogonal de cada estación en la salida del 22/07/2024 .....	49
<b>Tabla 16:</b> Velocidad de la corriente litoral de cada estación en la salida del 29/04/2024 .....	50
<b>Tabla 17:</b> Velocidad de la corriente litoral de cada estación en la salida del 22/07/2024 .....	50
<b>Tabla 18:</b> Pendiente de la playa en cada estación para las dos salidas de campo .....	51
<b>Tabla 19:</b> Tipificación de olas .....	54
<b>Tabla 20:</b> Clasificación de la playa según el número de Dean.....	55
<b>Tabla 21:</b> Resultados del transporte de sedimentos.....	55
<b>Tabla 22:</b> Ventajas y desventajas de las propuestas .....	64
<b>Tabla 23:</b> Rubros de costos para la implementación de lineamientos estacionales en la propuesta 1 .....	66

<b>Tabla 24:</b> Rubros de costos para la implementación de lineamientos estacionales en la propuesta 2 .....	67
---	----

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Playa Tortuga Bay, Santa Cruz, Galápagos .....	7
<b>Figura 2:</b> Grado de exposición de la Isla Santa Cruz.....	9
<b>Figura 3:</b> Media de Hs utilizando información de satélites en el periodo entre 1991 y 2015.....	10
<b>Figura 4:</b> Características de la región insular del Ecuador .....	11
<b>Figura 5:</b> Rosa de viento de la Isla Santa Cruz.....	13
<b>Figura 6:</b> Análisis del triangulo rectángulo para corrección de mareas.....	24
<b>Figura 7:</b> Medición de corriente litoral.....	27
<b>Figura 8:</b> Medición del viento.....	27
<b>Figura 9:</b> Concentración energética estacional 1999 .....	31
<b>Figura 10:</b> Concentración energética estacional 2004 .....	31
<b>Figura 11:</b> Concentración energética estacional 2009 .....	32
<b>Figura 12:</b> Concentración energética estacional 2014 .....	32
<b>Figura 13:</b> Concentración energética estacional 2017 .....	33
<b>Figura 14:</b> Calibración y validación del modelo en cuatro puntos diferentes.....	35
<b>Figura 15:</b> Líneas de costa utilizadas en el primer análisis.....	37
<b>Figura 16:</b> Ubicación de los transectos de forma gráfica en el área de estudio .....	38
<b>Figura 17:</b> Posición de transectos para el análisis estacional de líneas de costa.....	39
<b>Figura 18:</b> Tabla de mareas de la estación Isla Santa Cruz para la salida del 29/04/2024.....	44
<b>Figura 19:</b> Tabla de mareas de la estación Isla Santa Cruz para la salida del 22/07/2024.....	44
<b>Figura 20:</b> Altura de ola rompiente en las dos salidas de campo.....	46
<b>Figura 21:</b> Frecuencia de las alturas de ola rompiente en las dos salidas de campo.....	46

**Figura 22:** Frecuencia del periodo en las dos salidas de campo ..... 48

**Figura 23:** Perfil de playa del 29/04/2024 ..... 52

**Figura 24:** Perfil de playa del 22/07/2024 ..... 52

**Figura 25:** Obtención del D50 ..... 53

**Figura 26:** Sectorización para época húmeda ..... 56

**Figura 27:** Sectorización para época seca ..... 57

**Figura 28:** Posición de las boyas virtuales en Galápagos ..... 84

**Figura 29:** Rosa de oleaje de la boya al sur de Santa Cruz..... 84

**Figura 30:** Rosa de oleaje de la boya al norte de Santa Cruz..... 85

**Figura 31:** Rosa de viento de la boya al norte de Santa Cruz ..... 85

**Figura 32:** Rosa de viento de la boya al sur de Santa Cruz ..... 86

**Figura 33:** Histograma de altura de ola de la boya al norte de Santa Cruz..... 86

**Figura 34:** Histograma de altura de ola de la boya al sur de Santa Cruz ..... 87

**Figura 35:** Histograma de periodo de la boya al sur de Santa Cruz..... 87

**Figura 36:** Histograma de periodo de la boya al norte de Santa Cruz ..... 88

**Figura 37:** Altura significativa obtenida en Copernicus MyOcean Viewer para el 16/12/1999 ..... 88

**Figura 38:** Raster del transporte de energía ára época seca y húmeda..... 89

**Figura 39:** Raster de altura significativa para época seca y húmeda ..... 89

**Figura 40:** Raster de periodo de oleaje para época seca y húmeda..... 90

**Figura 41:** Raster de dirección del oleaje en radianes para época seca y húmeda ..... 90

## Capítulo 1

## 1.1 Introducción

Las Islas tropicales son sensibles al cambio climático, puesto que los recursos existentes pueden llegar a ser escasos por la posición aislada con relación al continente. El cambio climático trae consigo varios cambios en los ciclos de lluvias, en el aumento de la temperatura y el nivel del mar, llegando a impactar a la fauna y flora marina, poniendo en riesgo actividades económicas como la pesca y en algunos casos a las mismas playas por el deterioro de los corales. (Correa, 2012) Al elevarse el nivel del mar podría llegar a inundarse una gran parte del territorio por lo que las islas que se encuentran en riesgo han tomado medidas y han realizado planes nacionales con el fin de adaptarse.

En islas de varias partes del mundo se han desarrollado planes con medidas que buscan disminuir riesgos costeros como, por ejemplo:

En Oceanía, el país Tuvalu conformado por nueve islas ha tomado medidas con el fin de reducir la exposición a peligros costeros; el gobierno nacional ha puesto en marcha un proyecto de adaptación costera en donde se busca recuperar alrededor de 3.8 km de tierra del océano y elevar los terrenos que se encuentran más vulnerables.

En los casos de países en vías de desarrollo que no poseen grandes presupuestos para implementar proyectos de adaptación, se subraya la importancia de reconocer aspectos prácticos, simbólicos y fenomenológicos del clima, así como los cambios culturales derivados de estos para poder generar políticas que consideren a la población y su actuar, las necesidades y valores para desarrollar capacidades de adaptación en cada comunidad (Sapiains et al., 2019), como, por ejemplo:

En América del Sur, la Isla de Chiloé en Chile tras identificar la problemática ambiental señala estrategias que buscan regularizar la actividad productiva protegiendo los recursos naturales, y aprovechar la biodiversidad de la isla de una forma sostenible, a la par se desarrolla investigaciones sobre el cambio climático para difundir y crear conciencia con el fin de adaptarse y mitigar los impactos. (Sapiains et al., 2019)

El nivel medio global del mar ha subido aproximadamente 20 cm desde 1880 debido al calentamiento global (IPCC 2007) y esta tasa de aumento se ha acelerado desde alrededor de 1930. Sin embargo, desde mediados del siglo XX, el aumento del nivel del mar no ha sido tan pronunciado en el Pacífico ecuatorial oriental como en otras regiones del océano global (IPCC, 2007). En la Isla Santa Cruz de las Galápagos, no se ha observado una tendencia clara en el incremento del nivel del mar en los últimos 26 años. Sin embargo, se espera que el nivel medio global del mar aumente entre 20 y 50 cm (IPCC 2007) o más (Rahmstorf et al. 2007; Solomon et al. 2009) durante el siglo XXI, lo que probablemente afectará a las Galápagos.

Para reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de los ecosistemas al cambio climático, el Parque Nacional Galápagos ha creado medidas de adaptación para las áreas protegidas en todo el archipiélago de Galápagos, donde se impulsa a estudiar las variables oceánicas, la dinámica de los ecosistemas y su comportamiento ante eventos climáticos extremos.

Para este estudio, centrado en la playa Tortuga Bay en la Isla Santa Cruz, se va a evaluar cambios de la línea de costa para encontrar puntos de riesgo costero mediante la caracterización litoral y uso de sensores remotos permitiendo un correcto conocimiento de la dinámica de la playa y de esta manera apoyar a la toma de decisiones para conservar los servicios ecosistémicos de la playa y con este análisis poder establecer una guía para el manejo de la playa Tortuga Bay.

## **1.2 Descripción del Problema**

El aumento del nivel del mar puede causar un incremento en la erosión de playas donde algunas de estas están proyectadas a que desaparezcan por completo. (Environmental change and management, 2020)

La subsidencia de algunas islas o partes de ellas en las Galápagos podría agravar el aumento local del nivel del mar en las próximas décadas. La erosión y la acumulación costera son procesos que ocurren tanto a corto como a largo plazo y que pueden alterar la línea de costa y los perfiles de las playas. Es fundamental monitorear estos perfiles para identificar los factores que causan dichos cambios. Esta información es esencial para que los interesados puedan planificar una gestión sostenible de las playas, la cual es crucial para lograr una Gestión Integrada de Zonas Costeras. (Saad, 2022)

El Parque Nacional Galápagos busca determinar los niveles de vulnerabilidad de las playas, por esto se busca estudiar la dinámica de los ecosistemas y su comportamiento frente al incremento del nivel del mar. Es de suma importancia el cuidado y resguardo de estas zonas puesto que, a más de ser considerada como Patrimonio Natural de la Humanidad, en su territorio existen especies exclusivas y endémicas de las islas.

## **1.3 Justificación del Problema**

La caracterización de la dinámica litoral y la obtención de una línea base tanto física como ambiental fortalece la toma de decisiones respecto a estrategias para la adaptación ante el cambio climático y son un insumo para el diseño de un plan de manejo adecuado para la isla. Sectores productivos como el turismo y la pesca pueden anticipar y minimizar impactos para que no existan

pérdidas económicas o estas sean mínimas, considerando que las dos actividades son principales fuentes de empleo para la comunidad isleña.

Es por esto por lo que, establecer una línea base de la dinámica litoral es crucial para la adecuada gestión de la costa Insular y así contribuir al plan de adaptación ante el cambio climático. Esto permitirá fortalecer la toma de decisiones para el manejo de los recursos costeros y llegar a ser un punto de referencia inicial para el monitoreo a largo plazo de los cambios en el ambiente costero y la efectividad de las medidas de manejo implementadas.

Por último, este proyecto se alinea perfectamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. En primer lugar, el ODS 11.4, que busca proteger el patrimonio natural, es abordado directamente al proponer medidas para la conservación de esta playa emblemática, que es parte del Patrimonio Natural de la Humanidad, y su diversidad ecológica, incluyendo especies endémicas como la tortuga verde. Por otro lado, el ODS 13.1 se refleja mediante el análisis de la vulnerabilidad costera ante el cambio climático, sugiriendo lineamientos que fortalecen la resiliencia de los ecosistemas costeros frente a la erosión y el incremento del nivel del mar. Además, se contribuye al ODS 13.b al proponer mecanismos de gestión adaptativa, que son cruciales para pequeños estados insulares como Galápagos, involucrando a las comunidades locales en el proceso. El ODS 14.2 se relaciona con los esfuerzos para proteger y restaurar los ecosistemas marinos y costeros, asegurando la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos que ofrece Tortuga Bay, especialmente frente a las amenazas del cambio climático. Finalmente, el ODS 17.17 es relevante debido a la colaboración con diversas entidades públicas y científicas, como el Parque Nacional Galápagos y la Fundación Charles Darwin, lo que fomenta alianzas públicas y privadas para la conservación de este espacio natural.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Determinar la dinámica litoral de Tortuga Bay para establecer lineamientos que contribuyan a la implementación de un Plan de Manejo Costero mediante la caracterización y uso de sensores remotos.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Identificar puntos de concentración energética por medio de modelos computacionales para identificar zonas de mayor riesgo de erosión.
- Determinar características litorales y oceanográficas mediante mediciones in situ para establecer la línea base.
- Calcular la tasa de cambio de la línea de costa mediante DSAS para definir puntos erosión y de acreción.
- Definir lineamientos para el manejo de la playa de Tortuga Bay.

## **1.5 Marco teórico**

### **1.5.1 Área de estudio**

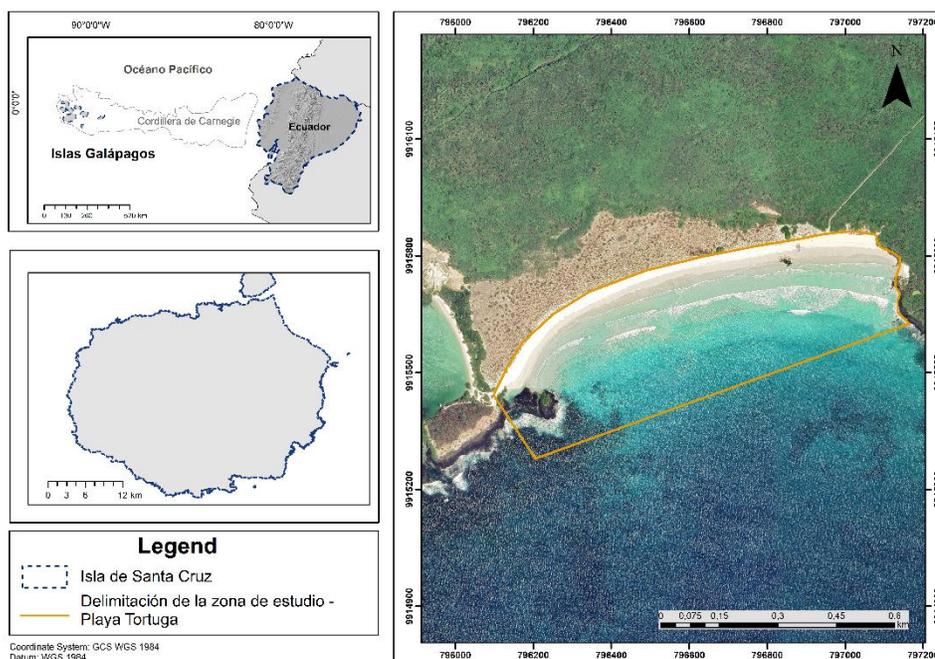
La playa Tortuga Bay se encuentra ubicada en el cantón Santa Cruz, al sur de la isla con el mismo nombre. Se localiza en la parte céntrica del Archipiélago de Galápagos y su punto más alto alcanza los 864 metros sobre el nivel del mar. (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Cruz, 2014). La playa tiene una extensión aproximada de 1.30 km, comprendiendo un área con mayor energía de oleaje denominada “Playa Brava”, donde el acceso para bañistas está prohibido por seguridad e integridad del turista. Separada por manglares se encuentra “Playa

Mansa” siendo este un lugar de “aguas tranquilas” por lo cual los turistas y bañistas realizan actividades recreativas como Snorkel, Kayak, natación, entre otros. (Ministerio de Turismo, 2017)

Tortuga Bay, no sólo es un sitio de interés por sus paisajes y arena blanca, sino también como su nombre lo indica es un sitio de anidación de la tortuga verde (*Chelonia mydas*), además de ser hábitat de otro tipo de especies entre aves y reptiles como las iguanas marinas. Por esta razón el Parque Nacional Galápagos, como medida de plan de manejo, implementó un control en la entrada de esta playa, con el fin de proteger la diversidad ecológica del sitio y promover un turismo sostenible. (Galapagos Conservancy , 2023)

## Figura 1

*Playa Tortuga Bay, Santa Cruz, Galápagos*



Nota. En la figura 1 se muestra el mapa con la ubicación del área de estudio del proyecto

en referencia con la ubicación de Ecuador por (Autores, 2024)

### **1.5.2 Características geomorfológicas**

Santa Cruz presenta una clasificación costera con un 46.57% de zonas rocosas y acantilados, 52,68% de zonas bajas de playa y manglares y 0.75% de perfil urbano. (Nativi et al., 2018) Desde un punto de vista geológico, la isla no muestra actividad volcánica actual, por lo que no es afectada por el volcanismo o movimientos tectónicos. No obstante, las rocas de la isla exhiben antiguos flujos de lava en la región noreste, mientras que, en el sureste, la lava es más joven y compuesta de basalto con conos de escoria (Seelos et al., 2021). Esto indica que el material en el noreste es más resistente a la erosión comparado para otras partes de la isla.

Al suroeste y oeste de la isla presenta zonas rocosas con alternancia de playas y manglares. La morfología de la costa sur se ve influenciada por el oleaje del suroeste. Además, las playas con arenas clasificadas como olivina, roja y negra, identificadas en el sur de la isla, podrían ser el resultado de la sedimentación causada por las olas. (Nativi et al., 2018)

Según la Real Academia Española una bahía es “una entrada natural de mar en la costa, de extensión considerable, pero generalmente menor que la de un golfo” (RAE, 2024) por lo que se podría considerar a la Paya Tortuga Bay como una. Es una playa cóncava o semicircular aislada entre dos puntas rocosas, por su posición posee zonas de aguas tranquilas ya que el terreno circundante las resguarda de vientos y oleaje. (Graziati, 2024)

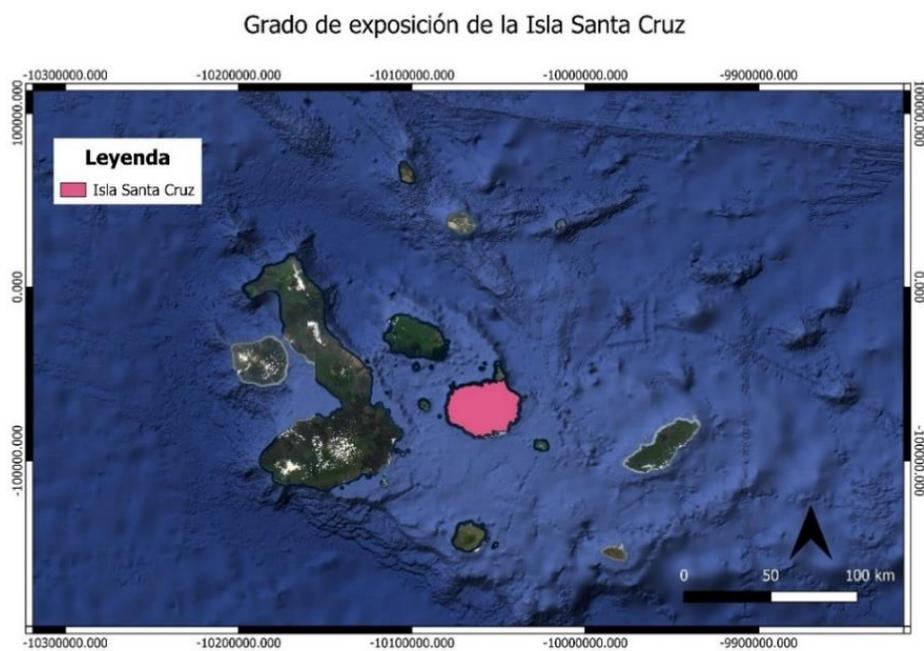
### **1.5.3 Oleaje**

Según Nativí Merchán S., López Merchán M., Martillo Bustamante C. (2018), en la isla Santa Cruz predomina el oleaje proveniente del suroeste y en época húmeda existe la presencia de oleaje proveniente del noroeste. Además, el oleaje se ve influenciado por la posición espacial de

la isla, como se muestra en la Figura 2, Santa Cruz se encuentra rodeada de otras islas a excepción del sur, estando desprotegida y provocando mayor influencia de oleaje del suroeste.

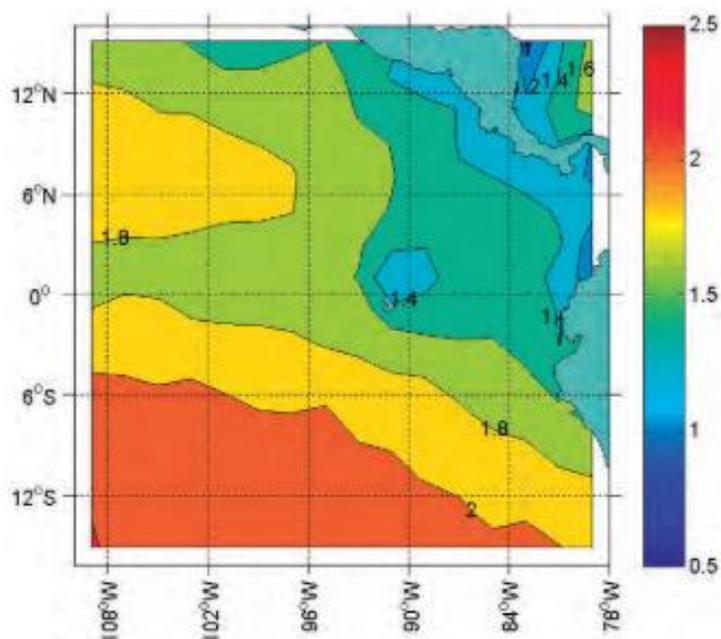
## Figura 2

*Grado de exposición de la Isla Santa Cruz*



### Figura 3

*Media de Hs utilizando información de satélites en el periodo entre 1991 y 2015*

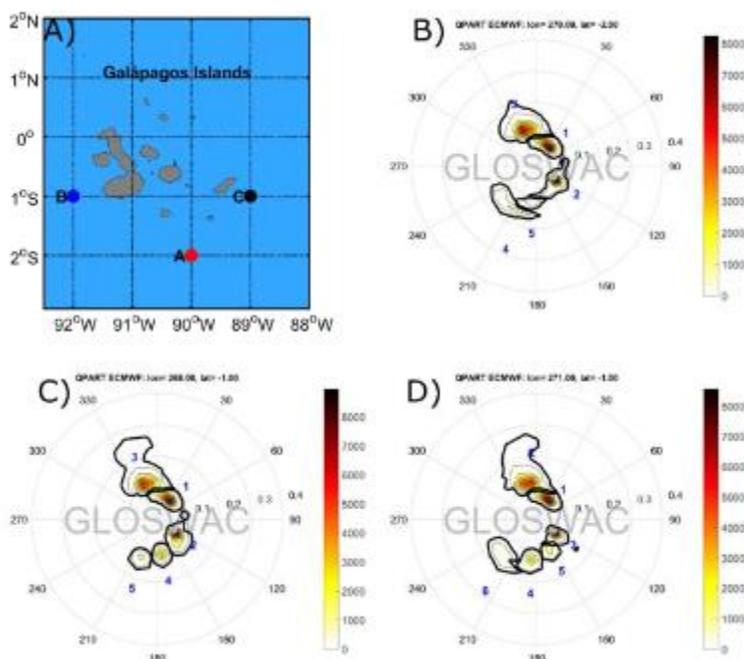


*Nota.* Figura 3 por Vera & Marín (2015)

Vera L. & Marín S. (2015) mencionan que la altura significativa de las olas (Hs) en todo el Archipiélago de Galápagos tiene un promedio de 1.5 metros, llegando a variar estacionalmente, incrementando durante los meses de julio a septiembre, coincidiendo con vientos más fuertes durante el invierno del hemisferio sur. Como se muestra en la Figura 3, el Hs cerca de la zona de estudio es de 1.4 m.

## Figura 4

### *Características de la región insular del Ecuador*



*Nota.* En la figura 4 se muestran las características espectrales de la región de las islas Galápagos por Jácome (2022)

El estudio de Jácome E. (2022) toma en cuenta la información plasmada en la figura tomada de Portilla J.(2018) y Portilla-Yandún & Jácome (2020) donde se tomó en cuenta tres puntos diferentes del Archipiélago como se muestra en la Figura 4, para esto se usó datos del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF), con el Análisis de Valor Extremo (EVA) y con el método de pico sobre umbral (POT) se obtiene que las mayores tormentas generan oleaje de fondo (swell) que contribuye a la producción de valores extremos en las islas, con una altura significativa máxima de ola de 3,8 m para un periodo de retorno de 100 años.

### 1.5.4 Mareas

Las mareas son las variaciones del nivel del mar generadas por la fuerza gravitacional, por la conservación de flujo de energía de la onda de marea, la amplitud puede amplificarse a medida que esta se propaga a las zonas costeras experimentando el asomeramiento. (Lizano, 2006)

En la zona de estudio las mareas están definidas como semidiurnas con un periodo aproximado de 12 horas, llegando a tener dos puntos de inflexión máximos y dos mínimos mostrados en la Tabla 1. La estación de marea más cercana a Playa Tortuga Bay es en Puerto Ayora

**Tabla 1**

*Rango de marea en Puerto Ayora.*

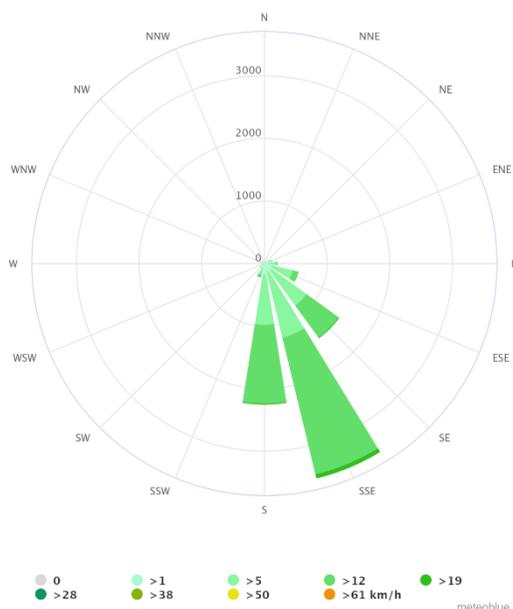
<b>RANGOS DE MAREAS PROMEDIO EN ESTACIÓN PUERTO AYORA</b>		
	Máximo	Mínimo
<b>Sicigia</b>	1,75	1,49
<b>Cuadratura</b>	1,19	0,94

### 1.5.5 Vientos

Los datos de viento más cercanos a la zona de estudio son de la ciudad de Puerto Ayora, ubicada a 3 km de la playa Tortuga Bay, así como se muestra en la Figura 5, la dirección predominante de los vientos es del sureste (Sosa, 2014) y la velocidad del viento tiene variaciones estacionales a lo largo del año. Durante el período de enero hasta mediados de abril el viento sopla a una velocidad promedio de 1.38 m/s., a partir del mes de mayo la velocidad promedio se eleva y alcanza hasta los 3.48 m/s. (Meteoblue, 2024)

## Figura 5

### *Rosa de viento de la isla Santa Cruz*



*Nota.* La figura 5 muestra la dirección y velocidad del viento local en Puerto Ayora por Meteoblue (2024)

### 1.5.6 Erosión Costera

La erosión costera es un fenómeno multifactorial causado por la interacción de los procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios con la morfología costera y con la batimetría del fondo de la zona cercana a la costa, así como por “acciones a veces irresponsables del hombre y su afán por explotar los recursos naturales sin considerar la sustentabilidad de estos” (Guido et al, 2009) ocasionando un retroceso de la línea de costa. De esta manera la configuración costera cambia y aumenta la vulnerabilidad, poniendo en riesgo o causando daños a este frágil sistema. (Azuz, 2004)

Las alteraciones en los regímenes del viento generan corrientes superficiales inducidas que tienen un 3% de su velocidad y afecta la dirección y altura de las olas las cuales son cruciales en

el movimiento de sedimentos y en la formación de la geometría natural de las playas (The Tanzania Coastal Management Partnership, 2000).

El cambio climático que es un factor que cada día toma mayor importancia dada la sobreelevación del nivel del mar y el incremento en la frecuencia de las tormentas tropicales (Guido et al, 2009) afectan la dinámica de sedimentos. Bruun (1962) sugirió que un aumento de 1 cm en el nivel del mar resultaría en un retroceso de 1 m de la línea costera en zonas costeras bajas y compuestas de sedimentos no consolidados. (Otvos, 1982)

Desde la perspectiva de la erosión, los efectos físicos más importantes son: un retroceso lento y a largo plazo de la línea costera.

### **1.5.7 Manejo Costero**

A partir de 1972 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNCED) se recomendó el tema de manejo costero como manera de respuesta ante asuntos mundiales y nacionales planteadas por la relación entre la sociedad humana y los medios costeros y marinos. Por el año 2000 se insta a todas las naciones costeras de adoptar planes de manejo (Lemay, 1998) en el que se define como “un proceso continuo y dinámico que vincula al gobierno y a la comunidad, la ciencia y la administración, los intereses comunitarios y los sectoriales en la preparación y la ejecución de un plan integrado para proteger y desarrollar los ecosistemas y los recursos costeros.” (GESAMP, 1997)

En su esencia, el Manejo Costero implica estrategias y acciones diseñadas para mejorar la calidad de vida de las comunidades que dependen de los recursos costeros. Todo esto es consecuente con los compromisos nacionales e internacionales que buscan el desarrollo sostenible

en todos los ambientes desde las cabeceras de las cuencas hidrográficas hasta las desembocaduras siendo los límites externos. (Lemay, 1998)

Los objetivos de un programa de manejo costero dependen de los problemas costeros que se busca solucionar en una zona definida en donde las metas se centran en: superar conflictos asociados al manejo sectorial, proteger la diversidad biológica y desarrollar la productividad de los ecosistemas costeros y promover una asignación equitativa y sostenible de los recursos costeros. (Post & Lundin, 1996)

Es crucial tomar medidas para aumentar la capacidad de adaptación de los ecosistemas marino-costeros y de las comunidades que dependen de ellos ante la vulnerabilidad de estas zonas ante el aumento del nivel del mar por el cambio climático. (Centre de Suivi Ecologique, 2010) La adaptación implica tomar decisiones basadas en la información más precisa disponible y gestionar los niveles de incertidumbre científica, ya que es fundamental para asegurar la supervivencia y el bienestar de los ecosistemas y las sociedades humanas frente a los impactos del cambio climático. (Conservación Internacional & WWF, 2011)

En las Islas Galápagos, la planificación para la adaptación ante el aumento del nivel del mar por el cambio climático debe basarse en principios generales que reflejen las condiciones únicas tanto económicas como ecológicas de las islas. La protección de especies y ecosistemas vulnerables, la protección de especies emblemáticas para mantener el turismo, adoptar un enfoque sostenible de ecoturismo y de desarrollo costero, promover la investigación y el monitoreo sobre el clima son los principios que se adaptan a la zona de estudio. (Conservación Internacional & WWF, 2011)

### **1.5.8 Concentración energética del oleaje**

La energía del oleaje puede modificar la costa ya que transporta una gran cantidad de sedimentos, por lo que una playa puede ser susceptible a erosión o acreción. La refracción de las olas concentra o dispersa energía como en el caso de las bahías en donde la energía de las olas se dispersa permitiendo el depósito de arena. (Desonie, 2021) Es importante definir los puntos de concentración de energía del oleaje para identificar zonas con riesgo de erosión y acreción.

### **1.5.9 Delft 3D Wave**

El Modelado computacional es el uso de computadoras, que, mediante las matemáticas, la física y la informática permiten simular y estudiar comportamientos de actividades y sistemas complejos llegando a realizar corridas de simulaciones con datos y variables reales con el fin de observar cambios que afecten los resultados. (NIBIB, 2016)

Delft 3D es un modelo desarrollado por Delft University of Technology en los Países Bajos, posee el módulo Wave basado en el modelo espectral SWAN (Simulating Waves Nearshore ) que calcula la propagación no constante de ondas de cresta corta sobre un fondo irregular (Deltares, 2024) considerando variables como el viento, disipación de energía por fricción de fondo y white capping, rotura de olas, asomeramiento, refracción, interacción de onda no lineal en aguas profundas y someras, transmisión y reflexión de la energía de la onda por presencia de obstáculos; de esta manera permitiendo la modelización de las olas. (Calderon, 2012)

## Capítulo 2

## **2. Metodología**

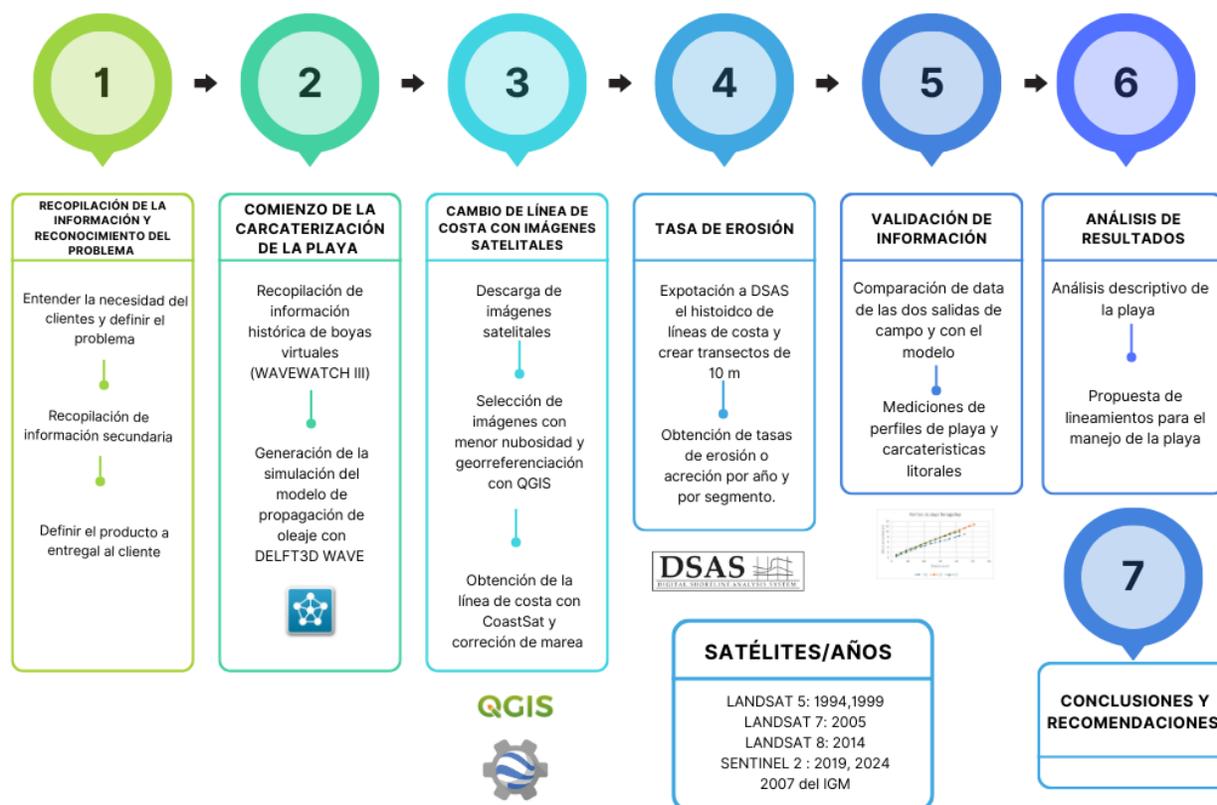
### **2.1 Descripción General**

Para la metodología del proyecto se realizaron los siguientes pasos: la obtención de la data histórica de oleaje y viento descargados del modelo WAVEWATCH a través de Matlab para procesar la depuración de la data y realizar la estadística de oleaje, estos son utilizados para establecer el análisis que contribuirá a caracterizar la zona de estudio y para calibrar el modelo computacional en DELFT3D que identifica zonas con alta energía de oleaje.

También se detalla el proceso realizado en las salidas de campo, las herramientas y equipos utilizados, así como la validación de los datos que se ingresan para correr el modelo computacional y los resultados obtenidos.

Por último, se utilizaron los programas de CoastSat y DSAS para obtener las líneas de costa y la tasa de erosión o acreción respectivamente. Para este proceso en particular se necesitaron otros programas y servicios como Google Earth Engine y QGIS para realizar las descargas de las imágenes satelitales y proceder a hacer la georreferenciación y corrección de mareas.

# Metodología



## 2.2 Caracterización de la playa

### 2.2.1 Data histórica de oleaje y vientos

Para obtener esta información que se utilizó para el modelo computacional para obtener la energía del oleaje que llega a la zona de estudio, se descargó información del periodo 1996 - 2018 de las boyas virtuales del hindcast del modelo WAVEWATCH III en las coordenadas  $90^{\circ}\text{W} - 0^{\circ}\text{S}$  y  $90^{\circ}\text{W} - 1^{\circ}\text{S}$ . Para la descarga se utilizó el programa MATLAB a través de un código (Apéndice 1) que permitió obtener los gráficos de Rosa de viento y de oleaje y exportar un archivo CSV que contenía como variables altura, dirección y periodo de oleaje además de la dirección y velocidad del viento.

### **2.2.2 Marea**

Los datos de marea se obtuvieron por medio del programa Delft Dashboard. Al entrar al programa se seleccionó en la interfaz principal la opción “Toolbox” y luego la opción “Tide database”. Posterior, se eligió el modelo “Global inverse tide” y se escogió la estación más cercana a la zona de estudio con el apoyo visual del mapa en la interfaz.

### **2.2.3 Batimetría**

Para la obtención de la batimetría que se utilizó para modelar en DELFT se utilizaron dos fuentes. Se descargó la batimetría del sitio web de la organización sin fines de lucro “General Bathymetric Chart of the Ocean” (GEBCO) donde se ingresaron las coordenadas del área que se requiere.

## **2.3 Identificación de puntos con mayor concentración energética de oleaje**

Para la identificación de las zonas con mayor concentración energética del oleaje primero se utilizó el software DELFT3D-WAVE el cual calcula la propagación de las olas, la generación de olas por el viento, las interacciones no lineales entre olas y la disipación, para una topografía de fondo, un campo de viento, un nivel de agua y un campo de corrientes dados en aguas de profundidad grande, intermedia y finita (Deltares, 2024). Para esto se utiliza la opción de Hydrodynamics en el cual se ingresan parámetros requeridos en el programa. Uno de los parámetros esenciales es la creación de la cuadrícula, basada en la batimetría previa según el área de estudio, la batimetría, archivos CSV con el Time Frame, datos de marea, dirección y velocidad del viento y otro con las características del oleaje como la dirección, velocidad y periodo.

Se creó la configuración del Set up con la información antes mencionada y se lo mandó a correr, estos resultados se deben validar y calibrar.

### **2.3.1 Calibración del Modelo**

Para realizar la calibración y validación del modelo se realizó una comparación de datos como la altura significativa, la dirección del oleaje y el periodo con datos obtenidos en la plataforma de Copernicus Marine MyOcean Viewer, escogiendo diferentes puntos en el modelo y comparando con los datos que arroja esta plataforma.

Con estos datos se calculó el  $R^2$  con el fin de obtener un valor que demuestre el nivel de confiabilidad de los resultados obtenidos.

## **2.4 Obtención del Histórico de líneas de costa**

### **2.4.1 Uso del Código de CoastSat**

El método utilizado para extraer líneas de costa puede explicarse a continuación: CoastSat es un conjunto de herramientas de software de código abierto escrito en Python que permitió la descarga de imágenes satelitales guardadas en la nube y disponibles públicamente de la plataforma Google Earth Engine (GEE). En el código se ingresó la información necesaria para el área de estudio.

Se definió un polígono de 4 vértices con las coordenadas de la zona de estudio en grados sexagesimales de forma horaria (Tabla 2). Luego de esto se escogió el rango de fechas en el que se desea obtener las imágenes. Se procedió a seleccionar la fuente de imágenes de Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Sentinel 2 (Tabla 3) para luego hacer la descarga por medio de Google Earth Engine. Una vez descargadas las imágenes se discriminaron por porcentaje de nubosidad con menos del 0.5%. Para este proyecto la escala temporal de las imágenes que se requiere es

desde 1994 al 2024 por cada 5 años en la medida de lo accesible de información. Por último, las imágenes se guardan en una carpeta accesible para su posterior manipulación.

**Tabla 2**

*Coordenadas del área seleccionada para descargar las imágenes satelitales*

<b>Coordenadas SRC WGS 84 15 ZONA SUR</b>	
<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
-0.75676	-90.3451
-0.75667	-90.32711
-0.76839	-90.32634
-0.76813	-90.34402

**Tabla 3**

*Satélites utilizados y años para la selección de imágenes satelitales*

<b>Satélite</b>	<b>Año de imágenes obtenidas</b>
Landsat 5	1994,1999
Landsat 7	2005
Landsat 8	2015
Sentinel 2	2019,2024

No se pudo obtener una imagen satelital para 2009 por errores en el satélite L7, por lo que se obtuvo fotos aéreas del año 2007 en el Instituto Geográfico Militar.

#### **2.4.2 Corrección de georreferenciación**

En este proceso, también se consideraron los errores de georreferenciación para garantizar la precisión en los resultados, todas las imágenes satelitales descargadas fueron georreferenciadas

con el fin de alinear correctamente las imágenes en un mismo sistema de coordenadas geográficas, permitiendo realizar la comparación de las líneas de costa obtenidas.

### **2.4.3 Obtención de líneas de costa**

Las imágenes corregidas se importaron al código en donde este procesó cada imagen de reflectancia TOA (Top of Atmosphere) de las colecciones Tier 1 de Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y los productos de Sentinel 2 (Vos et al, 2019) y con ayuda de detección entre bandas multiespectrales que identifican zonas de agua y zonas terrestres se extrajo la línea de costa en la intersección de estas zonas, arrojando una línea de puntos que se guardaron como shapefiles.

### **2.4.4 Corrección de mareas**

Ya que cada imagen fue tomada en un momento exacto y con una hora específica el valor de marea varía en cada imagen, por lo que también se realizó el ajuste en base a las variaciones debidas a las mareas. Esta corrección se basó en realizar cálculos para llevar la línea de agua a un rango de marea dentro de la resolución del píxel de cada imagen, para esto se necesitaba establecer: una pendiente de perfil de playa, el ancho del píxel, altura de marea a la hora exacta cuando fue tomada la imagen satelital.

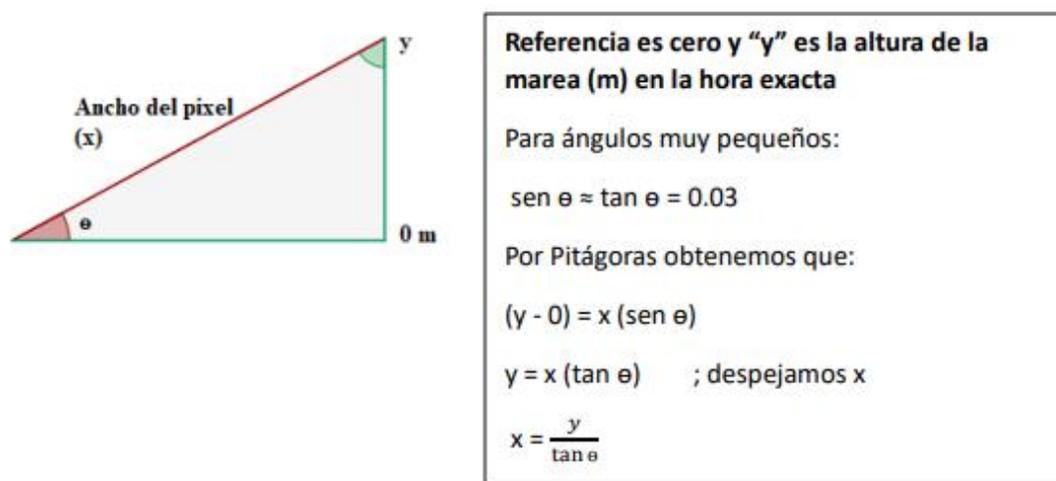
El ancho del píxel depende del satélite que tomó la imagen satelital: Landsat 15m y Sentinel 10m, la altura de marea en el momento exacto en que fue tomada la imagen se calculó con datos conocidos como la fecha y hora de la fotografía, así como la bajamar y la pleamar en el mismo día, para obtener la pendiente de la playa se usó las mediciones realizadas in-situ del perfil de playa con el método Andrade.

Se utilizó un modelo de marea para ajustar las líneas de costa a una referencia, específicamente a 0 en el sistema MLWS, lo que implicó corregir la posición vertical de las líneas

de costa según las diferencias en el nivel de la marea en el momento en que se adquirieron las imágenes. Esto se hizo realizando cálculos geométricos asemejando a un triángulo rectángulo y poder obtener el rango de marea como se muestra en la Figura 6.

### **Figura 6**

*Análisis del triángulo rectángulo para corrección de mareas*



*Nota.* Figura 6 por Casa (2023)

Por último, se arrastró la línea de costa el valor de X en metros.

## **2.5 Retroceso de línea de costa**

### **2.5.1 Cuantificación de retroceso de línea de costa**

Sistema Digital de Análisis de Costas (DSAS) es un programa desarrollado por el servicio Geológico de Estados Unidos (Valderrama et al, 2010) que permite estimar estadísticas de tasas de cambio para vectores de tiempo en líneas de costa. (NOAA, 2023)

Se importaron las líneas de costa y la línea base obtenida con anterioridad a la aplicación de DSAS V 6.0. Estas líneas de costa, previamente procesadas y corregidas por mareas y errores

de georreferenciación, se utilizaron para establecer los parámetros iniciales en DSAS. Se configuraron los parámetros predeterminados definiendo la línea base y las características de las líneas de costa. A continuación, se utilizaron las herramientas de DSAS para proyectar transectos perpendiculares desde la línea base hacia las líneas de costa, con una separación establecida (por ejemplo, 10 metros) y un smoothing adecuado (500 metros). Estos transectos permiten identificar los puntos de intersección necesarios para calcular las tasas de cambio. Finalmente, con la herramienta "Calculate Rates", se calcularon los valores de acreción y erosión en cada punto de intersección. Estos valores, representados gráficamente mediante la herramienta de visualización de datos de DSAS, permitieron diferenciar claramente las áreas de erosión (valores negativos) y acreción (valores positivos), facilitando el análisis estadístico de la dinámica costera. (Himmelstoss et al, 2018)

## **2.6 Salida de Campo y Validación de Datos**

### **2.6.1 Mediciones Litorales**

Para realizar las mediciones litorales en campo, se realizaron dos salidas siendo la primera el 30 de abril y la segunda el 22 de Julio del presente año con el fin de obtener datos de las variables, que se mencionan a continuación en época húmeda y seca en la medida de lo posible con los recursos y tiempo disponibles. Las mediciones fueron realizadas en 1 día cada 40 min desde las 10h40 hasta las 15h20 para ambas salidas durante la fase de sicigia. En la tabla 3 se muestran las coordenadas de las 3 estaciones ubicadas en la zona de estudio a 400 m de distancia entre ellas.

#### **Tabla 4**

Coordenadas de estaciones en Tortuga Bay

<b>SRC WGS 84 UTM</b>		
<b>15 ZONA SUR</b>		
<b>Estación</b>	<b>Coordenada X (m)</b>	<b>Coordenada Y (m)</b>
<b>E1</b>	796183	9915564
<b>E2</b>	796397	9915726
<b>E3</b>	796544	9915768

### **2.6.2 Corriente Litoral**

Para establecer la velocidad y dirección de esta variable se utilizó el método lagrangiano el cual consiste de analizar el movimiento de una partícula en el medio. Primero se lanzó en la zona de surf el derivador pudiendo ser una boya o un objeto flotante, se observó en donde cayó y se cronometra el tiempo en que tarda en llegar a la orilla y en qué dirección con respecto al observador llegó (derecha o izquierda). La distancia que recorre el derivador es en referencia a la cantidad de pasos y la longitud de pie del observador desde donde se arrojó el derivador hasta donde se lo recogió. Para observar si hubo presencia de corriente de resaca se tomó en cuenta la velocidad de las olas que ingresaban y si había un área donde las olas no se rompían o la presencia de remolinos.

**Figura 7***Medición de corriente litoral***2.6.3 Vientos**

Para medir esta variable se utilizó el anemómetro digital que consta de pequeñas aspas que giran de acuerdo con la dirección del viento. También consta de una pantalla LCD donde se muestran los resultados de velocidad y dirección de esta. Para la medición de viento se seleccionó la estación 2.

**Figura 8***Mediciones de viento***2.6.4 Olas**

El observador estimó la altura de las olas de acuerdo con su propia estatura en metros. Se observó un grupo de 10 olas y se tomó el tiempo que demoraron en romper mientras se anotaba la

altura de cada una antes de romper dentro de la zona de surf que abarca desde donde la ola más lejana rompe hasta la línea de agua.

### **2.6.5 Muestra de arena y clasificación granulométrica**

Para realizar el análisis granulométrico de la zona se tomaron 3 muestras correspondientes a las zonas de berma, intermareal y línea de agua (alta, media y baja) por cada estación dando un total de 9 muestras del área de estudio. El procedimiento de tamizado que se utilizó está descrito en (Das, 2015) tomando en cuenta la norma ASTM C 136 – 01. Posterior al tamizado se graficaron las curvas granulométricas para obtener el D50 que se necesita como dato de entrada para el modelo en Delft Wave 3D. Para la clasificación del tipo de sedimentos retenidos por cada tamiz se usó la clasificación de Wentworth, 1922.

### **2.6.6 Perfiles de playa**

Se realizaron las mediciones de perfil utilizando el método de Andrade para la primera salida y el Nivel de Abney para la segunda salida, se tomaron mediciones de 5 posiciones distintas de la playa y en sicigia. Para el método de Andrade se emplea el principio físico de los vasos comunicantes. El método consiste en utilizar una manguera llena de agua conectada a dos tubos acrílicos transparentes y varas graduadas. Al medir la diferencia de nivel del agua en los tubos, se puede determinar la elevación diferencial del perfil de la playa. El equipo para este método está conformado por codos plásticos que se unen en los extremos de las mangueras para luego conectar tubos acrílicos a los codos y sujetarlos a las varas graduadas con cintas métricas. Para la operación de este se necesitan dos personas que sostengan las varas de manera vertical a lo largo de la línea del perfil. (Andrade & Ferreira , 2006)

### 2.6.6.1 Caracterización morfodinámica de la playa

Para determinar el estado morfodinámico de la playa se empleó el criterio de Dean (1977) donde su ecuación está en función de la altura de ola rompiente ( $H_b$ ), velocidad de caída del sedimento ( $W_s$ ) y el periodo ( $T$ ). Una vez calculado este valor se clasificó según el criterio de la tabla 5.

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s * T} \quad (2.1)$$

**Tabla 5**

*Clasificación de la playa por el número de Dean*

<b>Clasificación</b>	<b>Numero de Dean</b>
<b>Reflectiva</b>	$\Omega < 1$
<b>Intermedia</b>	$1 < \Omega < 6$
<b>Disipativa</b>	$\Omega > 6$

## Capítulo 3

### 3. Resultados y Análisis

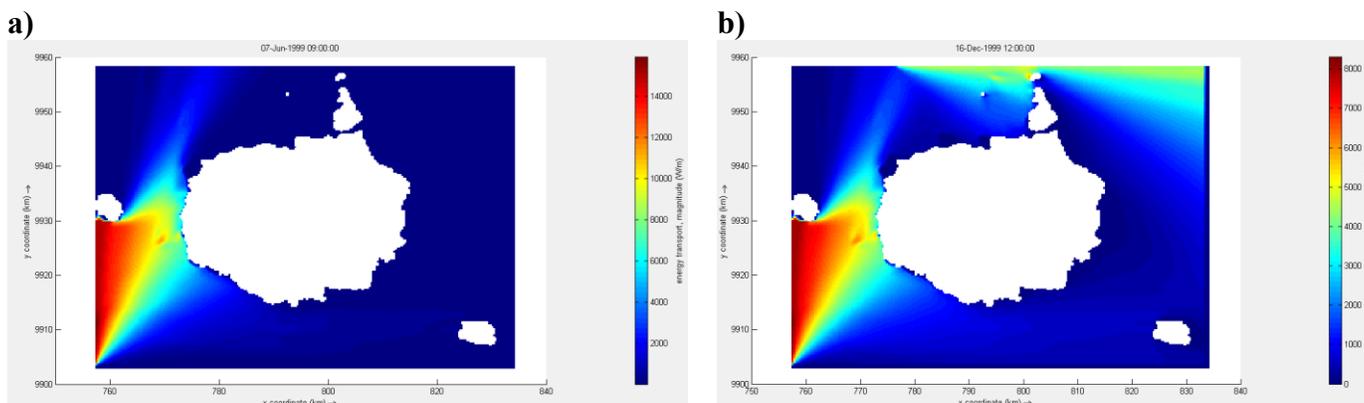
#### 3.1 Puntos de concentración energética

##### Figura 9

*Concentración energética estacional 1999*

**Época seca**

**Época húmeda**



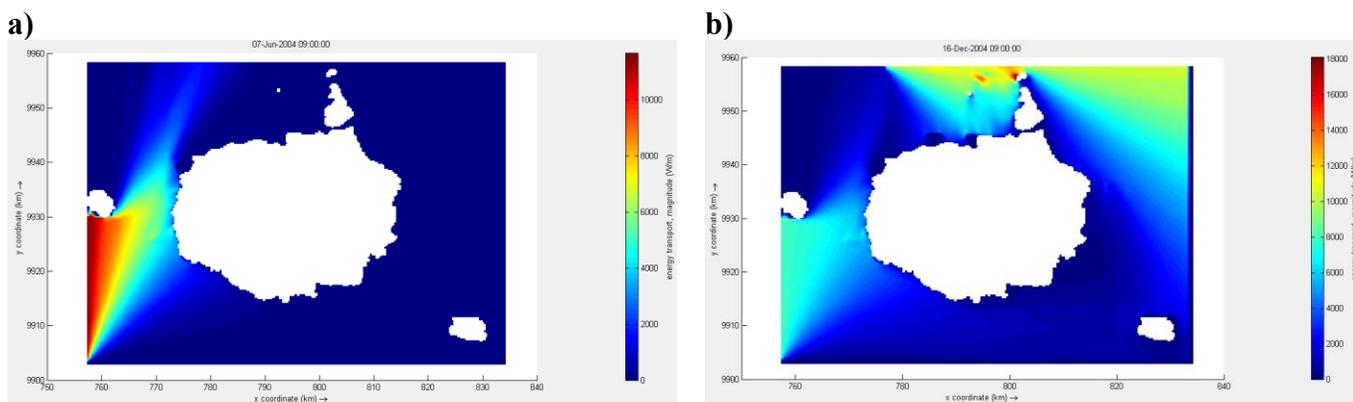
*Nota.* Análisis de concentración energética estacional en la Isla Santa Cruz en el año 1999: Panel A) Modelo de transporte de energía en el mes de junio, B) Modelo de transporte de energía en el mes de diciembre

##### Figura 10

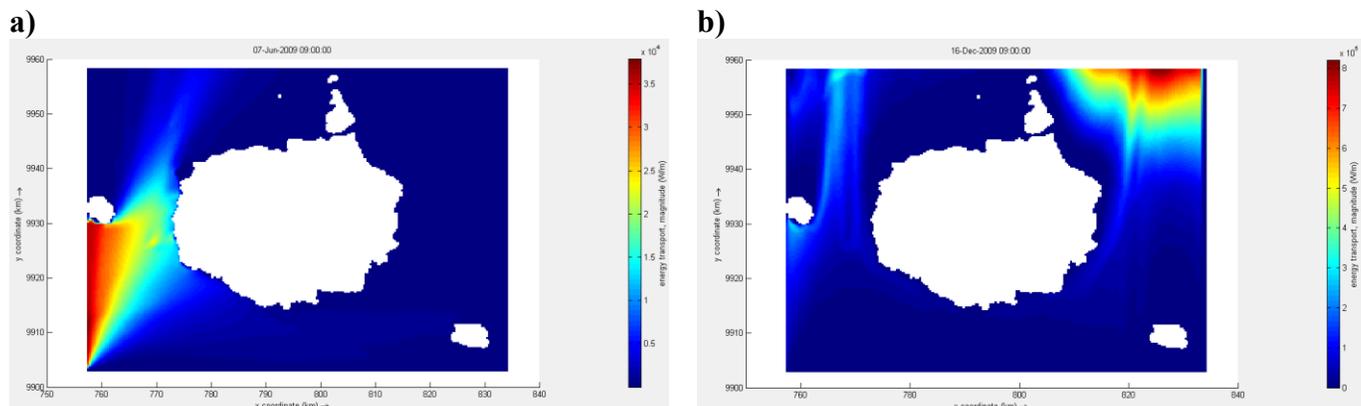
*Concentración energética estacional 2004*

**Época seca**

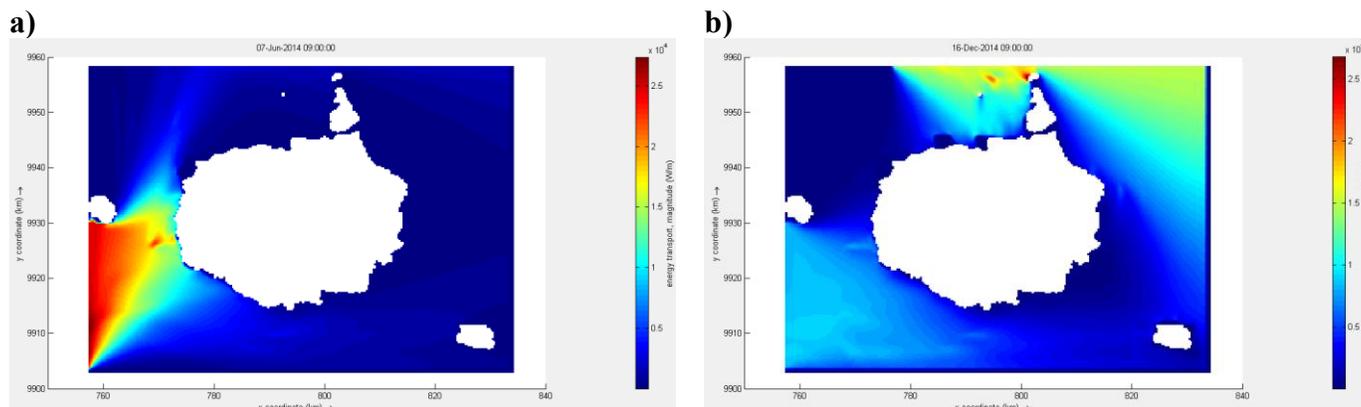
**Época húmeda**



*Nota.* Análisis de concentración energética estacional en la Isla Santa Cruz en el año 2004: Panel A) Modelo de transporte de energía en el mes de junio, B) Modelo de transporte de energía en el mes de diciembre

**Figura 11***Concentración energética estacional 2009***Época seca****Época húmeda**

*Nota.* Análisis de concentración energética estacional en la Isla Santa Cruz en el año 2009: Panel A) Modelo de transporte de energía en el mes de junio, B) Modelo de transporte de energía en el mes de diciembre

**Figura 12***Concentración energética estacional 2014***Época seca****Época húmeda**

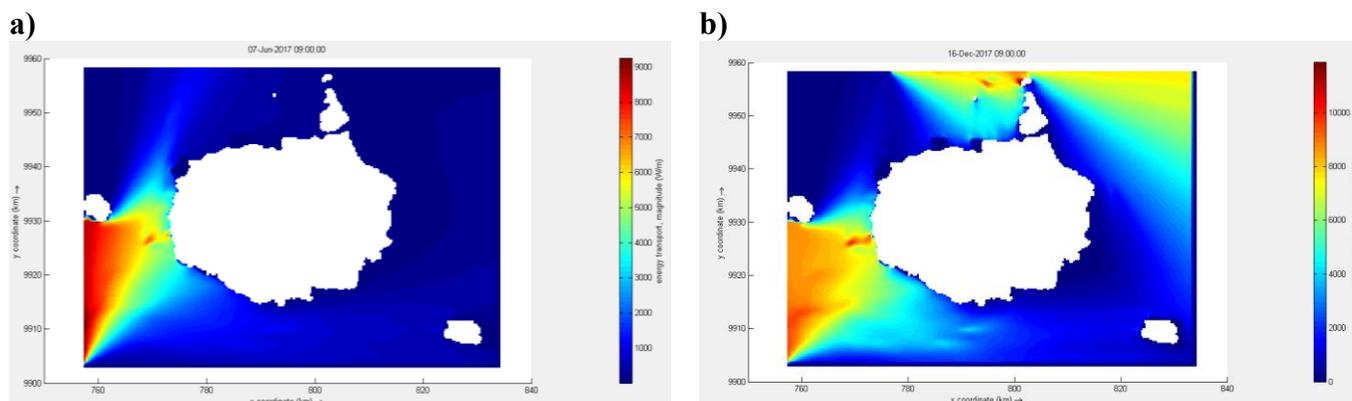
*Nota.* Análisis de concentración energética estacional en la Isla Santa Cruz en el año 2014: Panel A) Modelo de transporte de energía en el mes de junio, B) Modelo de transporte de energía en el mes de diciembre

## Figura 13

*Concentración energética estacional 2017*

**Época seca**

**Época húmeda**



*Nota.* Análisis de concentración energética estacional en la Isla Santa Cruz en el año 2017: Panel A) Modelo de transporte de energía en el mes de junio, B) Modelo de transporte de energía en el mes de diciembre

Las Figuras 9,10,11,12 y 13 muestran los modelos obtenidos de transporte de energía alrededor de las Islas Santa Cruz (isla grande central), Baltra (isla ubicada en la parte superior), Santa Fe (Isla pequeña parte inferior derecha) y Pinzón (Isla pequeña parte central izquierda). Como se puede apreciar en la sección izquierda se encuentra el modelo del mes de junio, mientras que del lado derecho se encuentra del mes de diciembre con el fin de realizar un análisis estacionario. Se eligieron los meses de junio por corresponder a la época seca y diciembre ya que se encuentra en la época húmeda, a la vez que entre estos meses se encuentra la época de anidación de las tortugas verdes en las islas Galápagos, por lo que es necesario identificar los puntos más energéticos alrededor de estas islas y determinar la posible existencia de interferencia a la anidación de esta especie.

Como se puede apreciar en las épocas secas de todos los años a analizar, el transporte de energía con mayores valores se presenta en el oleaje proveniente del suroeste, se puede identificar

que el oleaje proveniente del norte es imperceptible por lo que la energía transportada es mínima. En este caso toda la sección sureste de la isla tiene valores mínimos de energía, en la sección noroeste de las islas por la presencia de la isla Isabela que provee sombra a Santa Cruz la energía también es mínima, es importante recalcar que esta isla se encuentra céntrica en todo el archipiélago, por lo que mayormente el oleaje con predominancia es el del oeste y suroeste ya que es la zona descubierta.

En todos estos años los valores máximos presentados se encontraban en la parte baja de la Isla Pinzón como, por ejemplo: en el año 1999 existió valores de aproximadamente  $1.4 \times 10^4$  W/m, en el 2004 valor de  $1 \times 10^4$  W/m, en el 2009 se registró valores de  $3.5 \times 10^4$  W/m, en el 2014 existió en la misma zona valores de  $2.5 \times 10^4$  W/m y en el 2017 aparecen valores de 9000 W/m

El transporte de energía de la época húmeda de los años 1999 y 2017 varía en comparación a la misma época de los años 2004, 2009 y 2014. En los primeros dos años se puede apreciar que los valores de energía máximo transportados provienen del oleaje de suroeste, con valores de 8000 y 10000 W/m respectivamente y con valores mínimos de energía provenientes del oleaje del noreste con valores de 4000 y 7000 W/m respectivamente.

En la época húmeda de los años 2004, 2009 y 2014 la dinámica es diferente, la mayor cantidad de energía proviene del oleaje del noreste con valores de 18000,  $8 \times 10^5$  y  $2.5 \times 10^4$  W/m respectivamente. Es importante tomar en cuenta que esta energía es transportada para la sección este de la isla Baltra ya que, en la sección oeste la isla Santiago provee sombra a Santa Cruz. Existe también un mínimo transporte de energía en la parte suroeste de la isla en donde se tienen valores de 5000,  $1 \times 10^5$  y  $1 \times 10^4$  W/m respectivamente.

### 3.1.1 Validación y Calibración de resultados

Para la calibración de los modelos se hizo una comparación de los datos obtenidos en los modelos con los datos de la plataforma de Copernicus MyOcean Viewer en cuatro diferentes puntos alrededor de la isla. Es importante recalcar que los valores a comprar fueron de las alturas significativas, ya que ninguna plataforma posee datos de transporte de energía.

Con los valores obtenidos se realizó una gráfica en donde se calculó el  $R^2$  con el fin de obtener el nivel de confianza de los resultados generados en la corrida del modelo, tomando en cuenta el criterio del cliente:

$$0.81 \geq R^2 \geq 1; \text{ Perfecto}$$

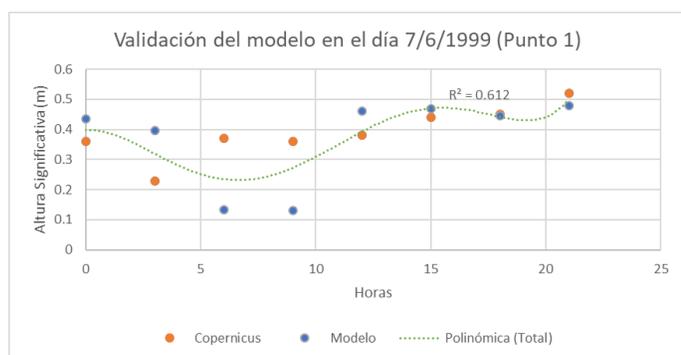
$$0.6 > R^2 > 0.81; \text{ Aceptable}$$

Ya que los modelos que se muestran con anterioridad fueron de días y horas específicas, se usó los valores de la plataforma de Copernicus en la misma fecha y los valores obtenidos en las 24 horas cada tres horas, con el fin de poder observar claramente la línea de tendencia.

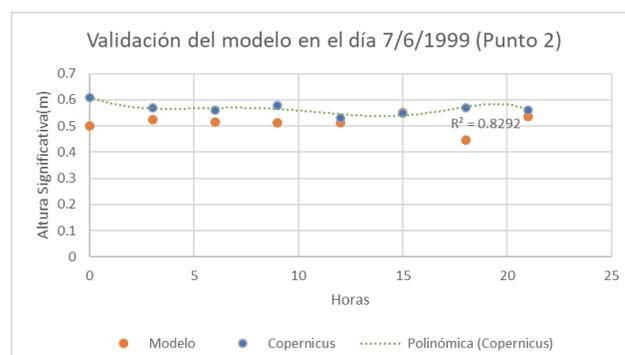
#### Figura 14

*Calibración y Validación del modelo en cuatro puntos diferentes*

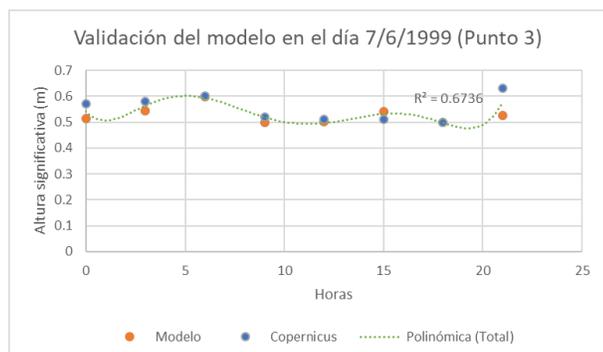
a)



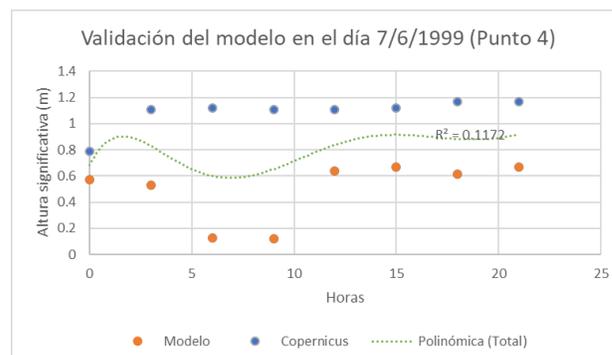
b)



c)



d)



*Nota.* Cálculo del  $R^2$  para obtener el nivel de confianza de los resultados obtenidos en el modelo:  
 Panel A) Validación del modelo en el punto 1, B) Validación del modelo en el punto 2, C) Validación del modelo en el punto 3, C) Validación del modelo en el punto 4

Como se muestra en la figura 14, se calculó en Excel el valor de  $R^2$  con el fin de obtener el nivel de confiabilidad, y poder validar los datos que el modelo arrojó. En la sección a) se muestra que el valor de  $R^2$  es 0.612 en el punto 1, ubicado en la sección noroeste de la isla, con este valor se puede considerar que es aceptable, para la sección b) ubicado el punto al noreste de la isla se obtuvo que el valor de  $R^2$  es de 0.8292, el cual se puede también considerar correcto al igual que la sección c) con el punto ubicado al suroeste de la isla se obtuvo como valor de  $R^2$  un 0.6736, que también es aceptable. En el caso de la sección d) con el punto ubicado al sureste de la isla santa cruz, el valor de  $R^2$  calculado es de 0.1172 el cual es un valor muy lejano a 1, por lo que es un valor no aceptable, podríamos decir que este valor no validó los resultados de esta sección del modelo.

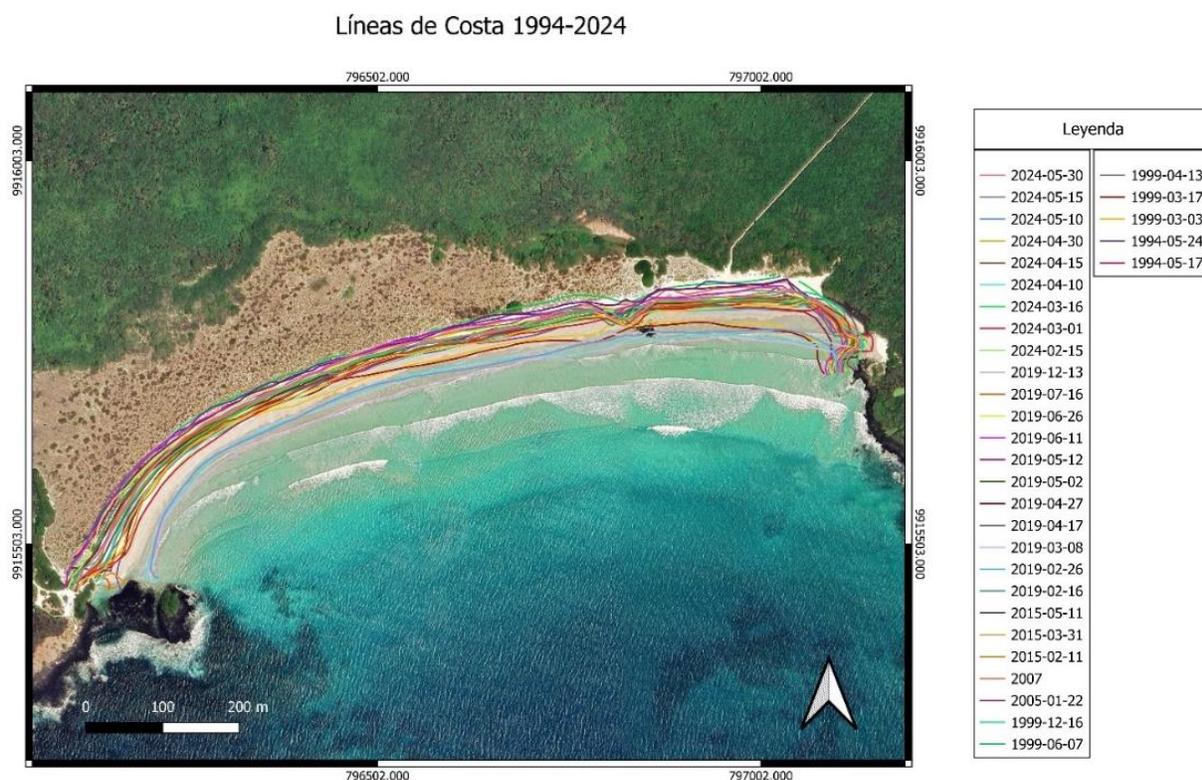
### 3.2 Resultados de retroceso de línea de costa con DSAS

Las líneas de costa obtenidas con imágenes satelitales corresponden al periodo de estudio empezando desde 1994 hasta 2024 y de cada cinco años o de años cercanos a los correspondientes, a excepción del año 2007 del cual la línea que se obtuvo se basó en fotos aéreas.

En el primer análisis con un total de 37 líneas de costa especificadas en la Figura 15, con sus respectivas correcciones se ejecutó DSAS para tener un resultado macro de lo que ha ocurrido en esta playa en el transcurso de los últimos 30 años, de los cambios de la línea de costa y las tasas de erosión y acreción que se muestra en cada sector de la playa. En el siguiente análisis con DSAS que se realizó se usó solamente 2 líneas de costa de cada año, una de época seca y la otra de época húmeda para diferenciar el cambio de línea de costa por estacionalidad, para este análisis solamente se usaron líneas de los años: 1999,2019 y 2024.

### Figura 15

*Líneas de costa utilizadas en el primer análisis*

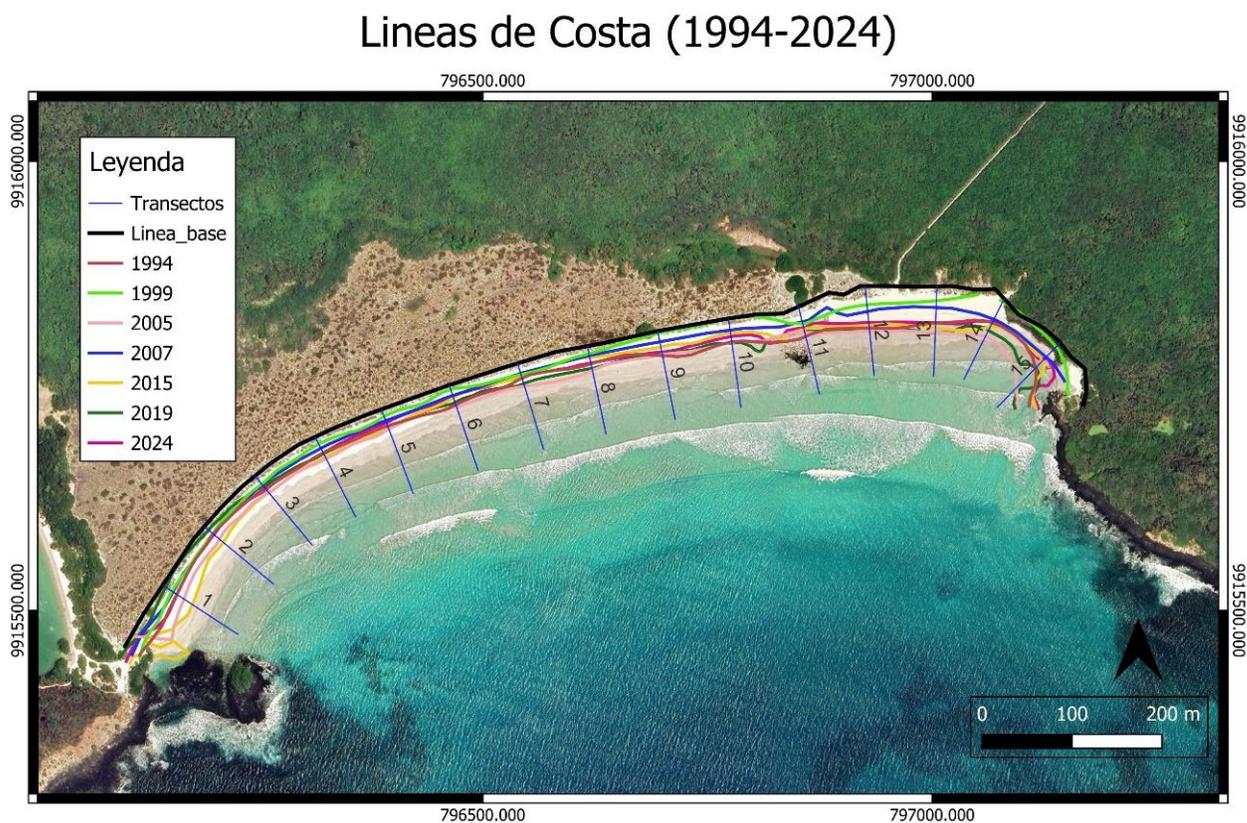


*Nota.* Las líneas de costa que se muestran en la Figura 15 ya fueron procesadas para corregir los errores de georreferenciación y marea

### 3.2.1 Tasas de erosión

**Figura 16**

*Ubicación de los transectos de forma gráfica en el área de estudio*



**Tabla 6**

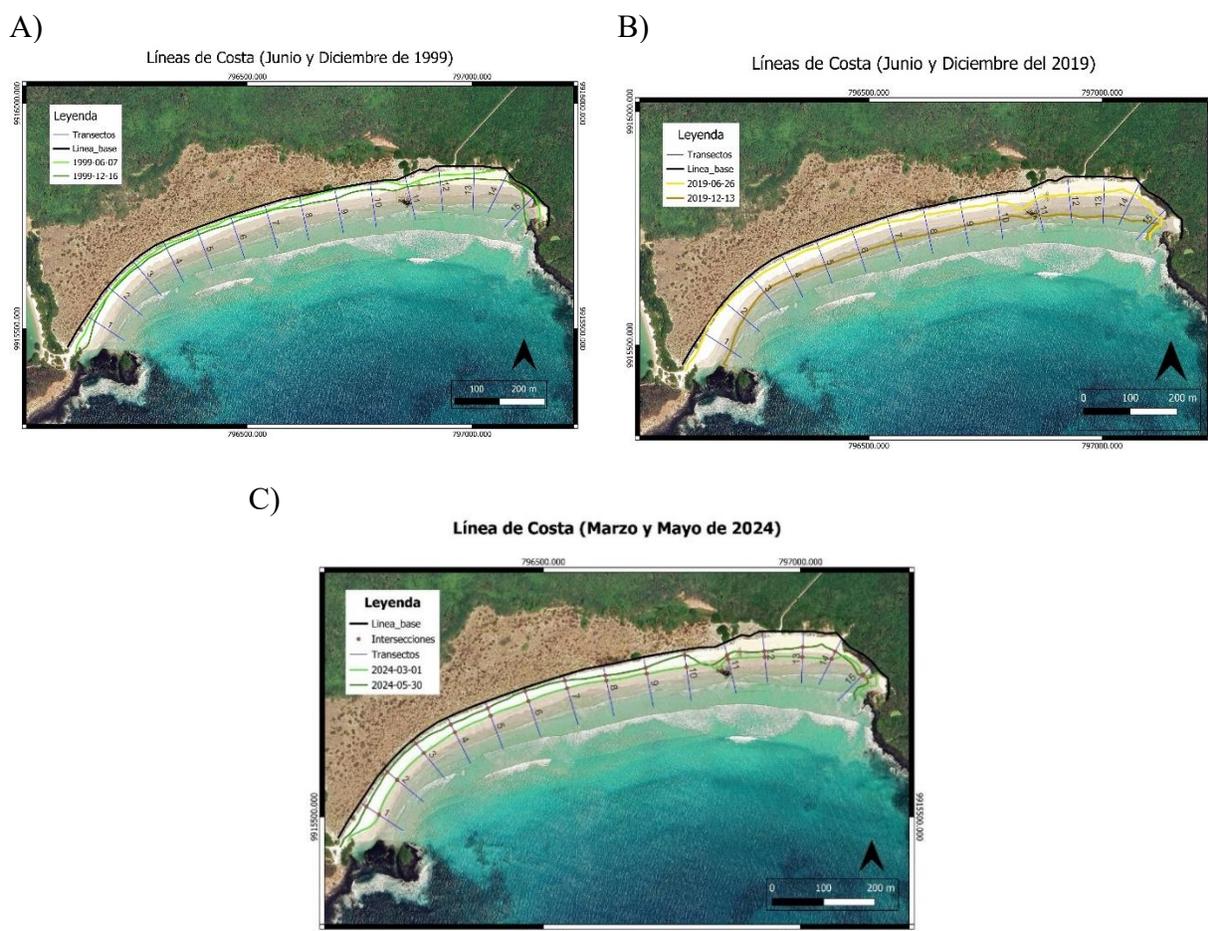
*Líneas de costa para el análisis estacional*

Fecha y hora	Altura de Marea
2019-06-26-11:33:36	1.43
2019-12-13-11:33:35	0.57
1999-06-07-10:55:19	1.52
1999-12-16-10:50:52	0.87

*Nota.* Esta tabla corresponde a las imágenes que se usó para el segundo análisis. Líneas estacionales de los años 1999 y 2019

**Figura 17**

*Posición de Transectos para el análisis estacional de líneas de costa*



*Nota.* Análisis estacional de líneas de costa de la playa Tortuga Bay (Isla Santa Cruz): Panel A) Líneas de Costa de junio y diciembre del año 1999 con sus respectivos transectos, B) Líneas de Costa de junio y diciembre del año 2019 con sus respectivos transectos, C) Líneas de Costa de marzo y mayo del año 2024 con sus respectivos transectos

**Tabla 7**

*Tasa de erosión de los análisis realizados*

Transecto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>WLR [m/año]</b>	0.5	0.37	0.23	0.25	0.12	0.07	0.15	0.25	0.07	0.06	0.36	0.45	0.37	0.23	-0.42
<b>1999 NSM [m]</b>	9.52	1.2	5.42	7.77	7.23	11.18	3.7	12.85	19.7	14.44	4.63	14.67	11.56	16.59	31.84
<b>2019 NSM [m]</b>	57.95	42.61	26.08	24.84	29.75	31.54	27.2	28.04	27.84	32.37	32.55	34.76	38.73	49.41	17.61

### 3.2.2 Análisis de retroceso de línea de costa

Para la correcta comprensión del retroceso de la línea de costa en esta playa se realizaron dos análisis, el primero se tomó en cuenta líneas de costa de diferentes años, entre los cuales se encontraban líneas de: 1994, 1999, 2005, 2007, 2015, 2019 y 2024 (figura 15) con el fin de realizar un análisis anual de lo que ocurre en el traspaso de los años. Para esto se trazaron 15 transectos a lo largo de la playa el cual parte desde una línea base mostrados en la figura 16, estos transectos intersecan con las líneas de costa y permiten obtener valores de la tasa de cambio en metros sobre año. Hay que tomar en cuenta que, si los valores son positivos muestra que en esa sección existe acreción, mientras que si son negativos existe erosión.

Como se puede observar en la tabla 7, en la primera sección, se muestran los valores de la media ponderada de desplazamiento por año (WLR), en donde se muestra que en casi toda el área de playa existe acreción, pero se puede decir que en el transecto 15 con un valor de  $-0.42$  m/año, existe erosión.

Para el segundo análisis se tomó en cuenta líneas de costa del mes de junio y diciembre de 1999 y del 2019, con el fin de realizar un análisis estacional. El motivo de este análisis fue para conocer con cuantos metros varía la línea de costa en las dos estaciones existentes en esta playa, cual es el comportamiento de esta en cada estación, se trazaron transectos como se muestra en la figura 17 para obtener valores en metros. En la tabla 7, en la segunda sección se muestra los valores para la variación de la línea de costa en el año 1999, de época seca a época húmeda existe acreción de la playa.

En la tercera sección se muestra los valores de tasa de cambio de las líneas de costa estacionales para el año 2019 en donde se aprecia que, en este año de época seca a época húmeda existe también acreción.

### 3.3 Sectorización del área de estudio

**Tabla 8**

*Sectorización del área de estudio*

Transecto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>LRR [m/año]</b>	0.34	0.29	0.14	0.15	0.04	0.02	0.09	0.17	-0.04	-0.02	0.2	0.26	0.19	0.14	-0.46
<b>Sector</b>	Sector 1				Sector 2										Sector 3
<b>Promedio por zonas</b>	0.23				0.105										-0.46

El área de estudio se dividió en tres sectores (tabla 8), se tomó en cuenta puntos importantes para esta división. El primer sector abarca toda la zona de sombra que genera el rompeolas natural ubicado al extremo de la Playa, esta sección está conformada por los transectos 1 hasta el 4, en donde se puede apreciar visualmente en las gráficas el cambio de dirección de las olas, en la Tabla se puede apreciar que el valor promedio de la tasa de acreción en este sector es de 0.23 m/año. Para el sector número 2 que comprende las áreas del transecto 5 hasta el 14 se tomó en cuenta el transecto siguiente después de la zona de sombra en donde el oleaje entra directamente a la playa hasta el inicio de la zona en donde existe erosión. Tomando en cuenta que en este sector en donde se encuentra el transecto 9, 10 y 11 el valor de la tasa de erosión puede ser afectado por la presencia de grandes rocas de procedencia volcánica las cuales influyen mucho en la dinámica del sedimento que en esta zona existe, 0.043 m/año es el valor promedio de la tasa de acreción que existe en esta zona, pudiendo decir que este valor es relativamente bajo ya que en los transectos anteriormente

mencionados existe en porcentaje de erosión. Para el sector 3, se tomó en cuenta el transecto 15 el cual es el punto principal que separa este sector, ya que alrededor de esta área existe una tasa de erosión de 0.46 m/año.

Nassar et al. en el 2018 propuso que con el valor LRR (Linear regression rates) se puede categorizar a las zonas según el criterio de la tabla 9, con los valores obtenidos en DSAS se calculó un promedio por cada sector para poder clasificarlos.

**Tabla 9**

*Clasificación de tasa de erosión basada en el valor de LRR*

<b>Categoría</b>	<b>Rango de cambio de línea de costa (m/año)</b>	<b>Clasificación</b>
<b>1</b>	$>-2$	Erosión muy alta
<b>2</b>	$> -1$ y $< -2$	Erosión alta
<b>3</b>	$< 0$ y $< -1$	Erosión Moderada
<b>4</b>	0	Estable
<b>5</b>	$>0$ y $<+1$	Acreeción moderada
<b>6</b>	$>+1$ y $<+2$	Acreeción alta
<b>7</b>	$>+2$	Acreeción muy alta

El sector 1, posee un valor de LRR promedio de 0.23 m/año, por lo que se puede decir que se encuentra en la categoría de acreeción moderada. El sector 2 que posee un valor de LRR promedio de 0.105 m/año también se encuentra en la categoría de acreeción moderada y la sección 3, con un valor de LRR promedio de -0.46 m/año se encuentra en la categoría de erosión moderada.

Según las líneas de costa obtenidas en el año 1999 y 2019 se puede observar que la su posición es diferente. La posición de la línea de costa de la época húmeda nos indica que en esta época existe erosión mientras que la posición de la línea de costa de la época seca indica acreción en la zona.

Con el análisis anual de las líneas de costa, se obtiene que en la mayor parte de esta playa existen valores mínimos de acreción como el transecto 1 que posee el valor de 34 cm/año, por lo cual se pueden decir que el sedimento que ingresan a la playa es un poco mayor al que sale. En el caso del transecto 15, la dinámica es contraria ya que en esta sección existe erosión con un valor de 46cm/año, en este caso el sedimento que sale es un poco mayor que el que ingresa.

De acuerdo con (Arjen Luijendijk, et al., 2018) en la sección de los acantilados, Tortuga Bay presenta tasas de erosión extremadamente bajas de -0.42 y 0.14 m/año, lo cual evidencia que anualmente la erosión y acreción es mínima, por lo que estos resultados concuerdan con el análisis descrito en este proyecto, entonces se puede decir que esta playa se encuentra en equilibrio.

### **3.4 Salida de Campo**

Se realizaron dos salidas de campo para validar datos. La primera fue el 29 de abril cercana a una cuadratura mientras que la salida del 22 de julio fue cercana a una Sicigia, como se puede apreciar en las figuras 18 y 19.

## Figura 18

*Tabla de mareas de la estación Isla Santa Cruz para la salida de campo del 29 de abril de 2024*

### ISLA SANTA CRUZ

29/04/2024 Lunes		30/04/2024 Martes		01/05/2024 Miércoles	
Hora (hh:mm)	Altura (metros)	Hora (hh:mm)	Altura (metros)	Hora (hh:mm)	Altura (metros)
06:12	1.72 P	00:37	0.52 B	01:41	0.59 B
12:17	0.69 B	07:09	1.67 P	08:14	1.66 P
18:13	1.68 P	13:18	0.74 B	14:28	0.76 B
ND	ND	19:16	1.61 P	20:27	1.58 P

## Figura 19

*Tabla de mareas de la estación Isla Santa Cruz para la salida de campo del 22 de julio de 2024*

### ISLA SANTA CRUZ

21/07/2024 Domingo		22/07/2024 Lunes	
Hora (hh:mm)	Altura (metros)	Hora (hh:mm)	Altura (metros)
02:33	1.80 P	03:17	1.91 P
08:34	0.44 B	09:19	0.36 B
14:34	1.86 P	15:19	1.92 P
20:58	0.16 B	21:41	0.10 B

## 3.4.1 Observaciones de Oleaje

### 3.4.1.1 Altura

En las observaciones de oleaje en la salida de campo cercana a sicigia el 29 de abril, se obtuvo una altura de ola promedio de 42 cm (tabla 10). El rango de la altura rompiente se encuentra dentro del intervalo de 0.1 a 1.60 m, obteniendo que la mayor altura registrada fue en la estación 3 con una altura de 1.60 m y la menor altura en la estación 1 y 3 de 0.1 m. La dirección del oleaje predominante es de  $115^\circ$ , lo cual muestra una tendencia hacia el sureste.

**Tabla 10**

*Altura promedio, máximo y mínimo de olas observadas de cada estación en la salida del 29 de abril*

<b>Estación</b>	<b>Observaciones de oleaje (Hb [cm])</b>		
	Promedio	Mínimo	Máximo
<b>E1</b>	49	10	100
<b>E2</b>	48	20	120
<b>E3</b>	29	10	160
	42	13.33	126.67

Por otro lado, en la salida de campo del 22 de julio cercana a sicigia se observó una altura de ola promedio de 50 cm (tabla 11). El rango de la altura de ola rompiente se encuentra dentro del intervalo de 0.1 y 120 m, obteniendo que la mayor altura registrada fue en la estación 1, la más cercana de la zona rocosa y la menor altura en la estación 3, la cual es la más alejada a la zona rocosa, acercándose más a la zona de acantilados de la playa, con una altura de 0.1 m. La dirección del oleaje predominante se encuentra en un intervalo de 140° a 168° aproximadamente, lo cual muestra que el oleaje predominante fue proveniente del sureste.

**Tabla 11**

*Altura promedio, máximo y mínimo de olas observadas de cada estación en la salida del 22 de julio*

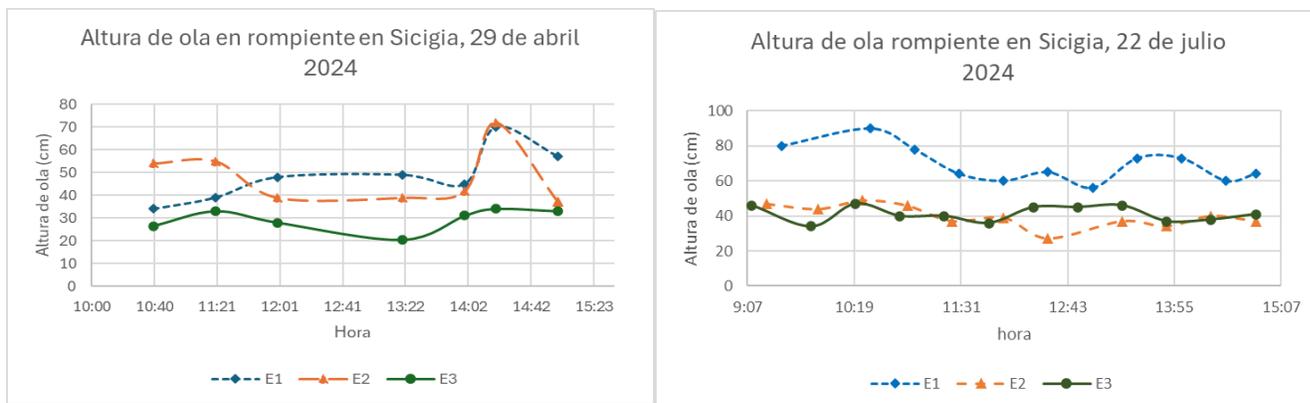
<b>Estación</b>	<b>Observaciones de oleaje (Hb [cm])</b>		
	Promedio	Mínimo	Máximo
<b>E1</b>	69	40	120
<b>E2</b>	40	20	70
<b>E3</b>	41	10	70
	50	23.33	86.66

Como se puede apreciar en la figura 19, en la toma de datos del 29 de abril se observa desde la primera medición alrededor de las 10h40 am la altura de ola rompiente va aumentando a medida se va acercando a pleamar, esto se puede observar mayormente en las estaciones 1 y 2. Mientras

que en la salida de campo del 22 de julio se observa que la altura conforme va subiendo la marea, la altura de ola disminuye o se mantiene igual.

### Figura 20

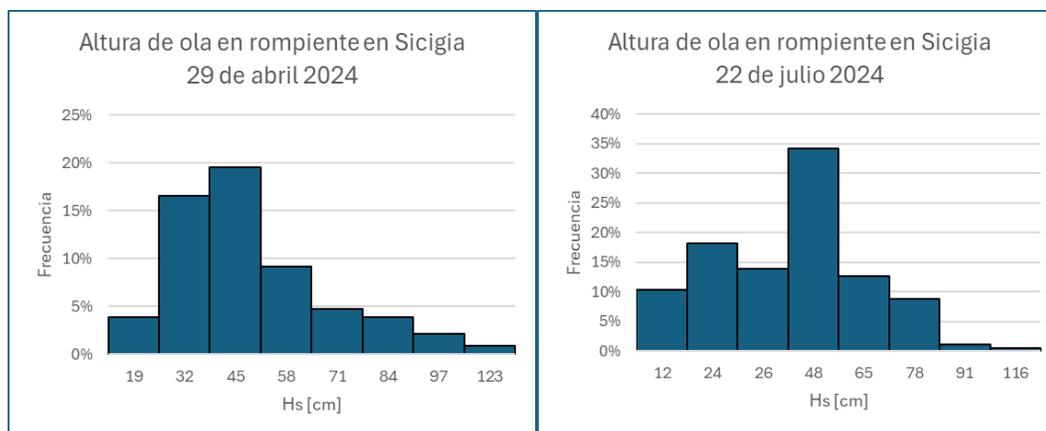
*Altura de ola rompiente en las dos salidas de campo*



El 29 de abril, fecha cercana a una cuadratura, las alturas de rompiente con más frecuencia fueron las de 45 cm, mientras que para el 22 de julio, fecha cercana a una sicigia, las alturas de ola rompiente con mayor frecuencia fueron las de 48 cm, así como se puede apreciar en la figura 21.

### Figura 21

*Frecuencia de las alturas de ola rompiente en las dos salidas de campo*



### 3.4.1.2 Periodo

Como se muestra en la tabla 12, los datos recolectados el 29 de abril mostraron un periodo predominante que se encuentra en un intervalo de 13 a 14 s. El rango de periodos se encuentra entre 10 siendo el periodo más bajo encontrado en la estación 3 mientras que se registró el periodo máximo de 15.1 en la estación 1. Por otro lado, la tabla 13 con los datos del 22 de julio, se registró un periodo predominante entre 12 a 16 s. El rango del periodo se encuentra entre 12.1 a 21.2 encontrados en la estación 3 y 1 respectivamente.

**Tabla 12**

*Periodo promedio, máximo y mínimo de cada estación en la salida del 29 de abril*

Estación	Periodo (T [s])		
	Promedio	Mínimo	Máximo
<b>E1</b>	14	12.8	15.1
<b>E2</b>	14	12	14.3
<b>E3</b>	13	10	14.7
	13.7	11.6	14.7

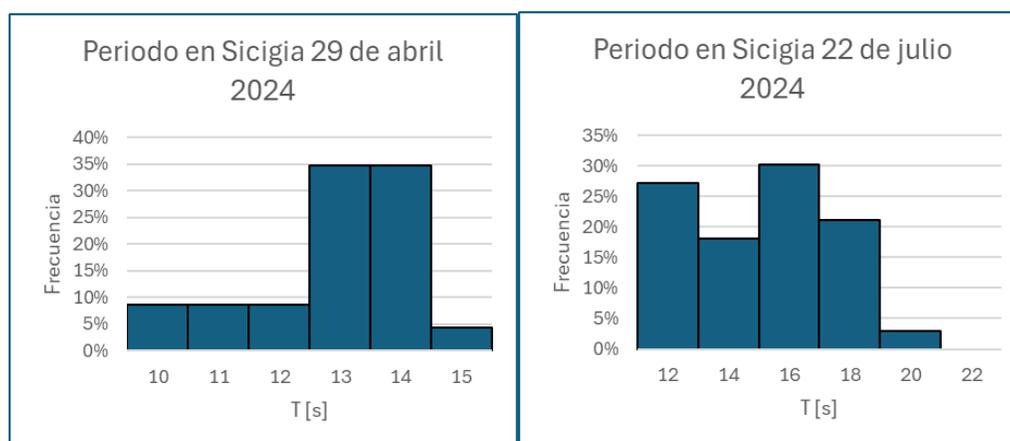
**Tabla 13**

*Periodo promedio, máximo y mínimo de cada estación en la salida del 22 de julio*

Estación	Periodo (T [s])		
	Promedio	Mínimo	Máximo
<b>E1</b>	16	16	21.2
<b>E2</b>	14	13	18.3
<b>E3</b>	14	12.1	16.4
	14.66	13.7	18.63

## Figura 22

*Frecuencia del periodo en las dos salidas de campo*



Como se muestra en la figura 22, los periodos cambian dependiendo si nos encontramos en sicigia o cuadratura, en el caso de la salida de campo del 29 de abril, los periodos con mayor frecuencia fueron de 13 s y 14 s, mientras que en la salida de campo del 22 de julio en sicigia el periodo con mayor frecuencia fue de 16 s, seguido por el de 12 s.

### 3.4.2 Ortogonal y línea de playa

En los datos que se obtuvieron el 29 de abril plasmados en la tabla 14 se obtuvo solo una medición de la orientación de línea en la estación 1 de 345 grados cercano a los datos obtenidos en el 22 de julio mostrados en la tabla 15 en la estación 1 y 3 que van desde 335° a 345°. Los datos obtenidos de las boyas virtuales resultaron en una dirección de oleaje predominante de 200° proveniente del suroeste en aguas profundas la cual tiene similitud con el dato de la estación 2, sin embargo, hay una diferencia entre estos resultados de la salida de campo en la estación 1 y 3 probablemente ocasionados por la difracción ya que tienen cercanía a una zona rocosa que actúa como espigón sumergido.

**Tabla 14***Dirección de Playa y Ortogonal de cada estación en la salida del 29 de abril*

<b>Dirección de Línea de playa – Ortogonal – Alpha (<math>\alpha</math>)</b>			
<b>Estación</b>	Línea de playa	Ortogonal	Alfa
<b>E1</b>	345	103.57	151.43
<b>E2</b>	-	142.14	-
<b>E3</b>	-	169.55	-
<b>Promedio</b>	345	138.42	151.43

**Tabla 15***Dirección de Playa y Ortogonal de cada estación en la salida del 22 de julio*

<b>Dirección de Línea de playa – Ortogonal – Alpha (<math>\alpha</math>)</b>			
<b>Estación</b>	Línea de playa	Ortogonal	Alfa
<b>E1</b>	335	139.09	105.91
<b>E2</b>	253	160.72	2.28
<b>E3</b>	345	168.83	86.17
<b>Promedio</b>	311	156.21	64.78

### 3.4.3 Corriente Litoral

Los datos tomados cercanos en sicigia el 29 de abril mostrados en la tabla 16 indican una dirección de corriente litoral hacia la izquierda en las estaciones 1 y 2 mientras que en la estación 1 difiere hacia la derecha. En promedio la velocidad fue de 0.18 m/s y el rango se encuentra en un intervalo entre 0.05 a 0.34 m/s en la estación 2 y estación 3 respectivamente. Mientras que en los datos resultantes de día 22 de julio mostrados en la tabla 17 se diferencia en la dirección promedio la cual es la derecha, siendo congruente, ya que hay una acumulación de sedimentos en el sector de la estación 1. El rango es en esta fecha están entre 0.002 y 0.41, en la estación 1 y estación 2 respectivamente. La menor velocidad registrada fue en la estación 1 lo cual puede indicar cierta congruencia ya que se encontraba cerca del sector de zona rocosa y manglar.

**Tabla 16**

*Velocidad de la Corriente litoral de cada estación en la salida del 29 de abril*

<b>Corriente litoral (V [m/s])</b>				
<b>Estación</b>	Promedio	Mínimo	Máximo	Dirección
<b>E1</b>	0.21	0.14	0.25	D
<b>E2</b>	0.14	0.05	0.33	I
<b>E3</b>	0.18	0.08	0.34	I
	0.18	0.09	0.31	I

**Tabla 17**

*Velocidad de la Corriente litoral de cada estación en la salida del 22 de julio*

<b>Corriente litoral (V [m/s])</b>				
<b>Estación</b>	Promedio	Mínimo	Máximo	Dirección
<b>E1</b>	0.07	0.002	0.23	D
<b>E2</b>	0.16	0.02	0.41	D
<b>E3</b>	0.08	0.01	0.20	D
	0.10	0.01	0.28	D

### 3.4.4 Perfiles de playa

En la tabla 18 se muestran los datos recopilados de las dos salidas de campo del 29 de abril y del 22 de julio correspondientes a la fase de sicigia. Se tomaron perfiles entre estaciones centrales para tomar perfiles de la playa: la estación 1.1 y la estación 2.1 se encuentran entre la estación 1 y 2 y la estación 2 y 3 respectivamente, mientras que el perfil de la estación 3.1 se encuentra después de la estación 3 más cercana a la zona de acantilados donde se evidencia un retroceso de línea de costa. Se puede observar que en general las estaciones presentan una mayor pendiente durante la sicigia del 22 de abril. Durante el 29 de abril se observa que las pendientes van creciendo conforme se avanza desde la estación 1 hacia la estación 3, por el contrario, durante el 22 de abril la pendiente va disminuyendo desde la estación 1 avanzando hasta la estación 3.1.

Con base en la clasificación de United States Army Training and Doctrine Command (1993), todas las estaciones presentan una pendiente empinada.

**Tabla 18**

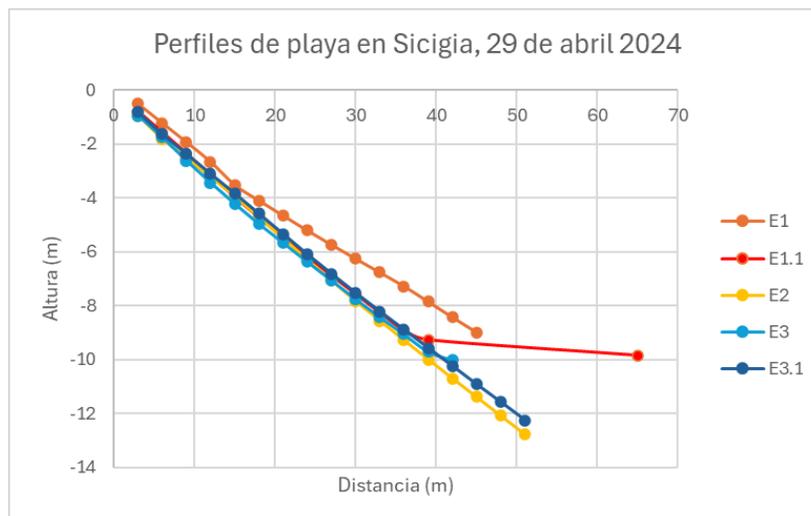
*Pendiente de la playa en cada estación para las dos salidas de campo*

Estación	Sicigia 29 abril		Sicigia 22 de julio		Promedio	
	Pendiente					
<b>E1</b>	0.19	1/5	1.94	1/2	1.06	1
<b>E1.1</b>	0.16	1/6	1.07	1/2	0.61	1/2
<b>E2</b>	0.24	1/4	1.05	1/2	0.64	1/2
<b>E2.1</b>	-		0.78	1/2	0.78	1/2
<b>E3</b>	0.23	1/4	0.75	1/2	0.49	1/2
<b>E3.1</b>	0.23	1/4	0.38	1/3	0.30	1/3
	0.21	1/5	0.99	1	0.64	1/2

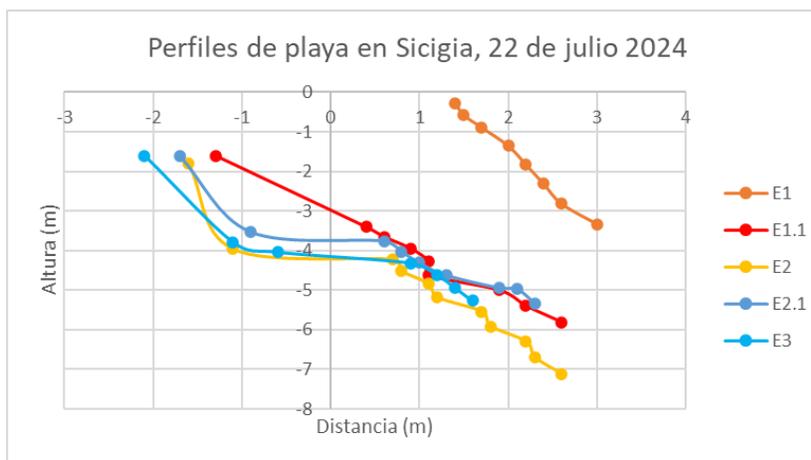
En las figuras 23 y 24 se puede observar diferencias ya que se utilizaron dos métodos para la toma de perfiles. Se utilizó el método de Andrade para la toma de perfiles de 29 de abril y el método con nivel óptico para el 22 de julio. Cabe destacar que se observa mayores detalles en los perfiles tomados con el nivel por ser un método con mayor precisión que Andrade. Los perfiles de las estaciones E1.1 hasta la E3 son similares en las dos fechas mientras que los perfiles de la estación 1 difieren de los demás con mayor significancia el 22 de abril.

**Figura 23**

*Perfil de playa el 29 de abril (Método Andrade)*

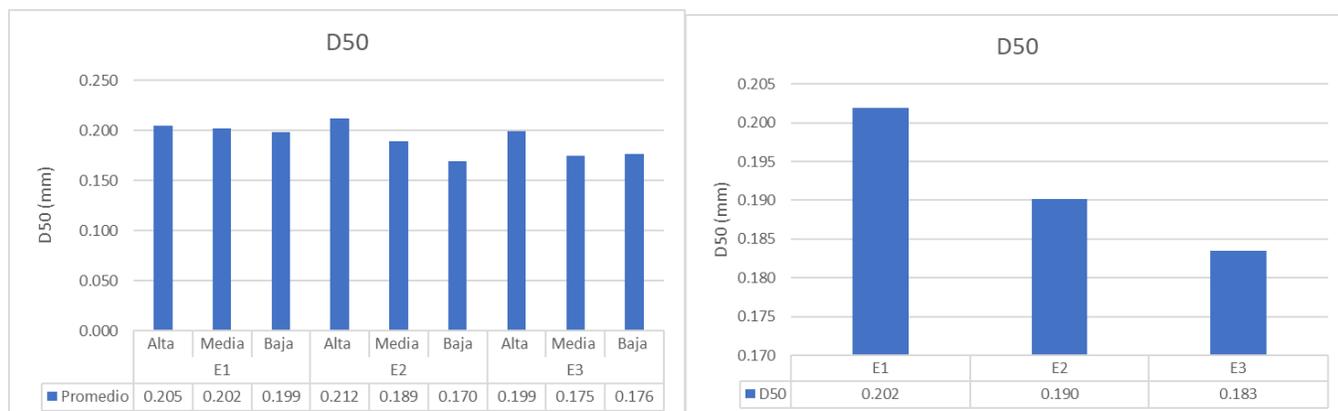
**Figura 24**

*Perfil de playa el 22 de julio (Método Nivel)*



### 3.4.5 Granulometría y obtención del D50

El 29 de abril en sicigia, se recolectaron tres muestras en las zonas alta, media y baja con el fin de realizar la granulometría y establecer el diámetro medio (D50) para cada estación como se puede observar la figura 25. Al obtener el promedio del D50 de todas las estaciones resultó en 0.192 mm. De acuerdo con la clasificación de Wentworth (1922), el diámetro medio corresponde a arena fina como se observa en la figura 25.

**Figura 25***Obtención del D50*

### 3.4.6 Clasificación del tipo de ola rompiente

De acuerdo con los datos obtenidos en las salidas de campo, el tipo de ola predominante es Spilling y con menor frecuencia Plunging. Ya que estos datos se obtienen por la visualización de diferentes observadores, calcular el parámetro o número de Iribarren permite obtener un resultado más preciso (tabla 19). Para este cálculo se necesita la pendiente, la altura de ola rompiente o la altura de ola en aguas profundas y longitud de la onda del oleaje en aguas profundas. Para este cálculo se utilizó la altura de ola rompiente.

La siguiente ecuación muestra el cálculo del parámetro de Iribarren donde:

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}}$$

(3.1)

Donde:

$\tan \beta$ : pendiente de la playa

$H_b$ : altura de ola rompiente

$L_0$ : Longitud de la onda en aguas profundas

**Tabla 19**

*Tipificación de Olas*

<b>Estación</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Hb</b>	<b>Lo</b>	<b>Irribarren</b>	<b>Tipo de ola</b>
<b>E1</b>	1.06	0.59	351	0.45	Plunging
<b>E2</b>	0.64	0.44	306	0.29	Spilling
<b>E3</b>	0.49	0.35	306	0.25	Spilling

### 3.4.7 Estado morfológico de la playa

Para determinar el estado morfodinámico de la playa se hace uso del número de Dean, es un parámetro adimensional que se utiliza para clasificar las playas y entender su morfología y dinámica en función de la relación entre el tamaño de las olas y las características de la playa. Se calcula de la siguiente manera:

$$\Omega = \frac{Hb}{WsT} \quad (3.2)$$

Donde:

*Hb: altura de ola rompiente*

*Ws: Velocidad de caída del sedimento*

*T: Periodo*

Para determinar la velocidad de caída del sedimento se utilizó la ecuación de Soulsby la cual necesita conocer el D50. De esta manera resulta que para las tres estaciones la clasificación es Reflectiva (tabla 20).

**Tabla 20***Clasificación de la Playa según el número de Dean*

<b>Estación</b>	<b>D50 mm</b>	<b>T [s]</b>	<b>Ws m/s</b>	<b>Hb [m]</b>	<b>Numero de Dean</b>	<b>Clasificación</b>
<b>E1</b>	0.202	15	2.09	0.59	0.018	Reflectiva
<b>E2</b>	0.190	14	2.03	0.44	0.015	Reflectiva
<b>E3</b>	0.183	14	1.95	0.35	0.013	Reflectiva

**3.4.8 Transporte de sedimentos****Tabla 21***Resultados del transporte de sedimentos*

<b>Estación</b>	<b>Velocidad de corriente [m/s]</b>	<b>Línea de playa °</b>	<b>Angulo °</b>	<b>Hb [m]</b>	<b>T [s]</b>	<b>Qs CERC [m<sup>3</sup>/día]</b>
<b>E1</b>	0.14	335	105.91	0.59	15	0.006
<b>E2</b>	0.15	253	2.28	0.44	14	0.0001
<b>E3</b>	0.13	345	86.17	0.35	14	0.001

Como se puede observar en la tabla 21 existen datos obtenidos en campo como la velocidad de la corriente, el ángulo de la playa, la altura de rompiente y el periodo los cuales permitieron calcular el valor del transporte de sedimentos en m<sup>3</sup>/día. En la estación 1 ubicada al extremo oeste de la playa, cercana a playa mansa se puede observar que el valor obtenido para el transporte de sedimentos es de 0.006 m<sup>3</sup>/día, la segunda estación ubicada aproximadamente al centro de la playa posee un valor de 0.0001 m<sup>3</sup>/día y para la tercera estación cercana al ingreso de la playa Tortuga Bay se obtuvo un valor de 0.001 m<sup>3</sup>/día.

El transporte de sedimentos en esta playa es mínimo, confirmando que los datos que se muestran en la tabla 7, en la primera sección donde muestra el valor de la variación de línea de costa en m/año alrededor de todos los años de estudio no varía en mayor magnitud.

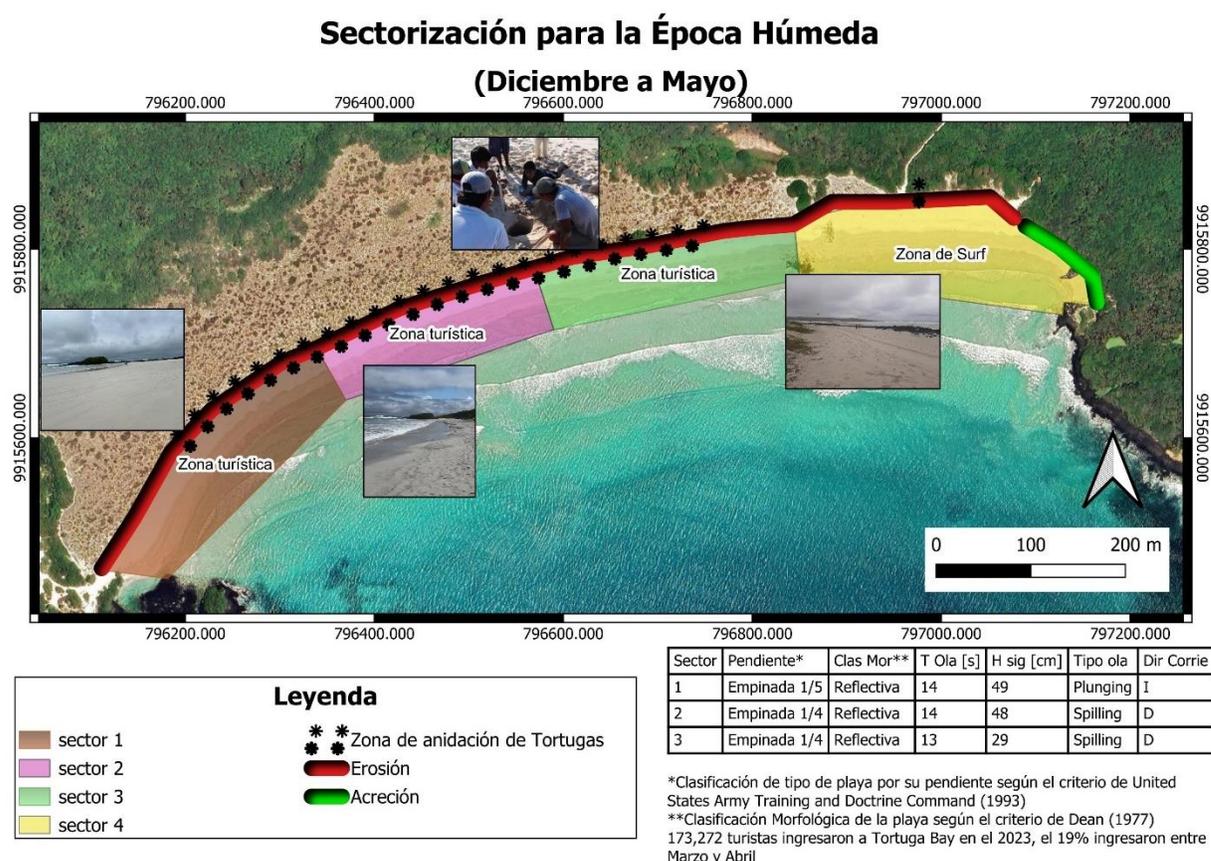
### 3.5 Mapa de Sectorización de resultados

Con los resultados obtenidos en las salidas de campo, los análisis con sensores remotos, la zonificación de anidación de las tortugas verdes (Márquez et al., 2015) y el Informe Anual de Visitantes a las Áreas Protegidas de Galápagos 2023 (DPNG, 2023) se realizaron estos mapas (figura 26 y 27), con el fin de resumir toda la información recopilada.

#### 3.5.1 Sectorización para la Época Húmeda

**Figura 26**

*Sectorización para Época Húmeda*



### 3.5.2 Sectorización para la Época Seca

Figura 27

Sectorización para Época Seca



### 3.6 Propuesta de soluciones

Tortuga Bay es una de las playas más visitadas por los turistas en la Isla Santa Cruz en Las Galápagos, a la vez que esta bahía es fundamental para la anidación de tortugas verdes, por lo que es de suma importancia iniciar con un plan de manejo costero de este lugar, como primer paso para este objetivo es necesario realizar lineamientos que permitan tener una base sólida para un futuro

diseño de planes para el correcto manejo de esta costa, en donde los turistas como la biodiversidad no se vea afectada. Para esto se tomó en cuenta puntos importantes como:

- Zona de anidación de tortugas verdes
- Playa altamente turística
- No se puede realizar ninguna intervención en el ecosistema ya que forma parte de un área protegida

Para esto se muestran dos propuestas que podrían ser una base para una futura implementación y diseño de un plan de manejo costero.

### **3.6.1 Primer propuesta: Lineamientos para un manejo regulatorio**

La playa Tortuga Bay se encuentra ubicada en un Parque Nacional, por lo que es importante tomar decisiones basándonos en información y reglamentos para situaciones como estas.

El sitio de estudio es considerado un área protegida por lo que existen leyes que protegen y regularizan toda actividad existente en este lugar. En varias partes del mundo, una de las principales acciones es dar a conocer a los turistas con carteles que pueden y no hacer en estas áreas, todo esto con ayuda de instituciones nacionales o internacionales que buscan el cuidado y conservación de las áreas.

En países como Guatemala, Panamá y el mismo Ecuador como muchos otros poseen leyes en sus constituciones, legislación ambiental que promueve el cuidado de estos lugares.

En esta alternativa se realizan lineamientos en los que solamente se limita en base a las leyes y regularizaciones escritas por el estado, lo que se debe o no hacer, esta alternativa no busca que la misma comunidad, los turistas e instituciones que trabajan en esta zona puedan entender por sí mismos los problemas o intentar corregir errores.

## **Lineamientos regulatorios para el manejo de la playa Tortuga Bay**

### **Época seca (junio a noviembre)**

#### **1. Protección de Áreas de Anidación y Seguridad en Playa Brava:**

Fundamento: Playa Brava es una zona de alta energía de oleaje y un área donde la anidación de tortugas verdes ha sido documentada, especialmente en el sector 3. La combinación de la fuerte energía de oleaje y la presencia de nidos hace que esta área sea crítica tanto para la protección de las tortugas como para la seguridad de los turistas.

Lineamiento: Prohibir completamente el acceso a Playa Brava durante la época seca, reforzando la señalización y aumentando la vigilancia. Colocar barreras físicas temporales y carteles que expliquen no solo los peligros del oleaje, sino también la importancia de proteger las áreas de anidación de tortugas. Las acciones deben estar coordinadas con la época de mayor actividad de anidación.

#### **2. Control y Supervisión en Sector 3 (Área de Surfistas):**

Fundamento: Sector 3 es un área utilizada por surfistas, pero también es un sitio crítico para la anidación de tortugas. La interacción entre surfistas y áreas de anidación puede resultar en la perturbación de los nidos y el aumento del riesgo de depredación por animales introducidos, como gatos.

Lineamiento: Delimitar claramente las áreas donde se permite el surf, asegurando que estas no interfieran con las zonas de anidación. Se debe restringir el acceso a áreas de anidación activas y aumentar la presencia de guardaparques para educar a los surfistas sobre la importancia de evitar

disturbios. Implementar un sistema de vigilancia para detectar y disuadir cualquier actividad que pueda poner en riesgo los nidos.

### **3. Protección de Áreas de Baja Energía y Anidación en Sectores 1 y 2:**

Fundamento: Los sectores 1 y 2, aunque menos expuestos a la energía de oleaje, son cruciales para la anidación y presentan riesgos por la interacción humana. Estos sectores también muestran una tasa de acreción moderada, lo que los hace más estables para la conservación de nidos.

Lineamiento: Restringir las actividades recreativas en estos sectores durante la época de anidación activa. Establecer zonas de exclusión alrededor de los nidos identificados y colocar barreras y señalización visible para evitar el acceso de turistas a estas áreas. También se deben realizar patrullajes regulares para asegurar el cumplimiento de estas restricciones.

### **Época Húmeda (diciembre a mayo)**

#### **1. Prohibición Absoluta en Playa Brava y Protección de Nidos:**

Fundamento: Durante la época húmeda, la erosión en Playa Brava se intensifica, y la presencia de oleaje fuerte representa un riesgo significativo tanto para los nidos de tortugas como para los turistas.

Lineamiento: Prohibir completamente el acceso a Playa Brava, implementando barreras físicas y señalización adicional que explique los riesgos asociados al oleaje y la necesidad de proteger los nidos de tortugas. También se deben implementar medidas para mitigar la erosión en áreas críticas de anidación, como la construcción de estructuras temporales que desvíen el flujo de agua lejos de los nidos.

## **2. Supervisión en Sector 3 (Surfistas) y Protección de Áreas de Anidación:**

Fundamento: El sector 3 sigue siendo una zona de alta energía durante la época húmeda y un sitio crítico para la anidación de tortugas. El surf, aunque permitido en esta área, debe gestionarse cuidadosamente para evitar perturbaciones en las áreas de anidación.

Lineamiento: Mantener la prohibición del surf en zonas donde se encuentran nidos activos. Implementar un sistema de vigilancia continua y patrullajes para asegurar que los surfistas respeten las áreas de anidación. Adicionalmente, se deben colocar marcas visibles alrededor de los nidos para alertar a los visitantes y surfistas sobre su ubicación.

## **3. Protección de Nidos en Sectores Vulnerables (Zonas 1 y 2):**

Fundamento: Durante la época húmeda, las zonas 1 y 2 son susceptibles a inundaciones, lo que puede afectar negativamente a los nidos de tortugas.

Lineamiento: Establecer un monitoreo continuo de los nidos en estas áreas para identificar y reubicar aquellos en riesgo de inundación. Implementar barreras físicas o sacos de arena alrededor de los nidos más vulnerables para protegerlos de la marea alta y la erosión. También se deben realizar esfuerzos adicionales para erradicar especies invasoras, como los gatos, que representan una amenaza significativa para los neonatos.

### **3.6.2 Segunda propuesta: Lineamientos para el manejo basado en la sensibilización**

Con el previo conocimiento que la playa Tortuga Bay se encuentra en un Parque Nacional y forma parte de las áreas protegidas del Ecuador, es importante no solo conocer las leyes y regulaciones que permiten proteger, conservar y salvaguardar este ecosistema, sino que también permita un uso adecuado de esta zona, permitiendo que el ser humano y la naturaleza puedan relacionarse de una forma sostenible. Para esta propuesta se busca que con ayuda de las

instituciones que poseen los conocimientos y han realizado estudios de estas zonas, la comunidad cercana y los turistas puedan ser los actores principales en cuidar esta playa.

### **Lineamientos basados en sensibilización para el Manejo Estacional para Tortuga Bay**

#### **Época húmeda (diciembre a mayo):**

##### **1. Zonificación Estacional de Actividades Turísticas**

- a. Restricción en áreas de mayor erosión: Durante la temporada húmeda, se observó un incremento en la erosión en varios sectores de la playa, especialmente en los transectos 13, 14 y 15. Se recomienda limitar el acceso turístico a estas áreas durante estos meses para evitar la exacerbación de la erosión.
- b. Desvío de actividades recreativas: En esta temporada, dirigir las actividades turísticas hacia las áreas menos afectadas por la erosión, como sectores de acreción moderada, garantizando la protección de las zonas más frágiles.

##### **2. Manejo de información de corrientes litorales y oleaje**

- a. Educación sobre la seguridad en el Oleaje: Dado que se registraron olas más altas y periodos más cortos durante la temporada húmeda, especialmente en las estaciones 1 y 3, se debe intensificar la educación de los turistas sobre los riesgos de estas condiciones. Se deben colocar advertencias visibles y ofrecer guías que expliquen las condiciones del mar durante esta temporada.

##### **3. Protección de zonas de anidación estacional debido a la temporada de anidación de tortugas (diciembre a junio)**

- a. Cierre temporal de zonas críticas: Durante la temporada de anidación de tortugas verdes, cerrar temporalmente las zonas de anidación identificadas para evitar la perturbación por

parte de los turistas. Asegurar que se instalen barreras naturales y señalización adecuada para desviar el tráfico turístico de estas áreas.

- b. Sensibilización intensiva: Implementar campañas intensivas de sensibilización para turistas durante este periodo, enfocándose en la importancia de respetar los sitios de anidación y las especies endémicas.

### **Época seca (junio a noviembre)**

#### **1. Zonificación estacional de actividades turísticas**

- a. Promoción de actividades educativas: La temporada seca muestra tendencias de acreción en varios sectores de la playa, especialmente en los transectos que presentan valores positivos. Este período es el más adecuado para promover actividades educativas en áreas que se recuperan naturalmente, para concienciar a los turistas sobre los ciclos naturales de la playa.
- b. Monitoreo y restauración natural: Aprovechar esta temporada para realizar actividades de monitoreo comunitario, como la plantación de vegetación costera en áreas erosionadas durante la temporada húmeda.

### **Época húmeda y seca**

#### **1. Ajuste de la infraestructura temporal**

- a. Instalación de infraestructura desmontable: Para minimizar el impacto durante las diferentes estaciones, se recomienda utilizar infraestructura temporal o desmontable (como pasarelas y señalizaciones) que se puedan retirar o reubicar en función de las condiciones estacionales, como la erosión o la acumulación de sedimentos.

#### **2. Monitoreo y evaluación estacional**

- a. Programas de monitoreo estacional: Implementar programas de monitoreo estacional que involucren a la comunidad local en la recolección de datos sobre la dinámica de la playa (erosión, acreción, corrientes y perfiles) durante las diferentes estaciones. Estos datos deben utilizarse para ajustar los lineamientos y asegurar que la gestión de la playa responda a las condiciones cambiantes.

### 3. Participación comunitaria y sensibilización

- a. Capacitación de la comunidad local en manejo estacional: Capacitar a la comunidad local para que pueda identificar las señales de cambio estacional en la playa y ajustar sus actividades de acuerdo con estas variaciones. Esto no solo empodera a la comunidad, sino que también asegura una respuesta rápida y adecuada a las condiciones estacionales

### 3.7 Ventajas y desventajas generales de cada propuesta

**Tabla 22**

*Ventajas y desventajas de las propuestas*

<b>Propuestas</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Lineamientos para manejo regulatorio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al tener reglas bien definidas, se garantiza una gestión más consistente de la playa, independientemente de cambios en el personal o en las administraciones locales. Las regulaciones establecidas aseguran</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No permite la autoevaluación de las acciones que se realizan como comunidad o como turistas.</li> <li>Poca apertura ante ideales o puntos de vista diferentes.</li> <li>Minimiza la capacidad de autoempoderarse como comunidad.</li> </ul>

---

que las decisiones y acciones sigan un marco preestablecido.

---

- Inculcar valores y autoanálisis ante los riesgos costeros.
  - Trabajo en equipo con todos los grupos sociales que dependen directa o indirectamente de esta zona.
  - Empoderar a la comunidad y turistas para el cuidado y desarrollo sostenible de la playa.
  - Compartir conocimientos acordes a la dinámica litoral, recursos costeros, especies endémicas, cuidado de ecosistemas siendo impartidos por especialistas para la comunidad en general.
  - Oportunidad para fortalecer los conocimientos de los isleños, tomando en cuenta conocimientos científicos y culturales.
  - Enseñar y poner en práctica tanto a instituciones como a la comunidad
- Costos altos por el transporte de los especialistas desde continente hasta las islas.
  - No se puede desarrollar si la comunidad, instituciones o turistas no forman parte o no tienen la predisposición.

**Lineamientos  
para manejo  
basado en la  
sensibilización**

---

---

el uso de métodos de monitoreo de las playas.

---

### 3.8 Análisis de Costos

#### 3.8.1 Costos referenciales de la primera propuesta: Lineamientos para un manejo regulatorio

**Tabla 23**

*Rubros de Costos para la Implementación de Lineamientos Estacionales en la propuesta 2*

<b>Actividad</b>	<b>No</b>	<b>Rubro/Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
<b>Colocación de señalización</b>	1	Señalización multilingüe y resistente a la intemperie	u	20	50.00	1,000.00
	2	Instalación de postes y soportes	u	20	30.00	600.00
<b>Implementación de barreras físicas en Playa Brava</b>	3	Barreras temporales (cinta de seguridad, estacas, sacos de arena)	m	200	5.00	1,000.00
	4	Mano de obra para instalación	jornada	10	80.00	800.00

---

<b>Programa de vigilancia y supervisión</b>	5	Contratación de guardaparques adicionales	Persona/mes	2	1,200.00	2,400.00
	6	Equipos de comunicación (radios, GPS)	u	5	150.00	750.00
<b>Educación y difusión</b>	7	Material educativo (folletos, carteles informativos)	impresión	500	2.00	1,000.00
	8	Charlas y capacitaciones	jornada	10	150.00	1,500.00
<b>Protección de nidos y monitoreo</b>	9	Monitoreo de nidos (personal técnico)	Jornada	20	100.00	2,000.00
	10	Material de protección para nidos	kit	20	25.00	500.00
<b>Total</b>						11,550.00

### 3.8.2 Costos referenciales de la segunda propuesta: Lineamientos para un manejo basado en la sensibilización

**Tabla 24**

*Rubros de Costos para la Implementación de Lineamientos Estacionales en la propuesta 1*

<b>Actividad</b>	<b>No</b>	<b>Rubro/Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
<b>Zonificación Estacional de Actividades Turísticas</b>						
	1	Diseño y fabricación de señales	u	100	65.00	6,500.00

		informativas y de advertencia				
<b>Señalización</b>						
<b>temporaria y Permanente:</b>	2	Instalación y mantenimiento de la señalización en áreas de acceso restringido	u	100	10.00	1,000.00
	3	Contratación de guardaparques o personal adicional para controlar el acceso durante las diferentes temporadas	pax	6	500.00	3,000.00
<b>Costos de personal</b>	4	Capacitación del personal para el manejo estacional y la orientación a turistas	u	1	800.00	800.00
<b>Manejo de Corrientes Litorales y Oleaje</b>						
<b>Materiales educativos</b>	5	Creación de QR informativos sobre la seguridad en el oleaje y las corrientes	u	1	20.00	20.00
	6	Desarrollo de contenido digital para	-	-	3,000.00	3,000.00

		aplicaciones móviles				
		o sitios web que				
		informe a los turistas				
		en tiempo real sobre				
		las condiciones del				
		mar				
	8	Equipamiento de				
		primeros auxilios y de				
		rescate, en caso de	u	1	100.00	100.00
		emergencias				
		relacionadas con el				
		oleaje				
<b>Protección de Zonas de Anidación Estacional</b>						
	9	Materiales para la				
		construcción de	$m^2$	200	7.00	1,400.00
		barreras naturales				
		(madera reciclada)				
<b>Barreras</b>						
<b>naturales y</b>						
<b>cercas</b>	10	Mano de obra para la				
		instalación y	u	50	20.00	1,000.00
		mantenimiento de				
		estas barreras				
<b>Monitoreo y Evaluación Estacional</b>						

<b>Equipos de monitoreo</b>	16	Herramientas de recolección de datos, como GPS portátiles, medidores de corriente, y drones	u	3	1,000.00	3,000.00
	18	Capacitación de personal en técnicas de monitoreo específicas para diferentes estaciones	u	1	1000	1000.00
<b>Costos del personal</b>	19	Licencias de software especializado para analizar los datos de erosión, oleaje, y otros factores	año	1		6,000.00
	20	Servicios de consultoría para el análisis avanzado de los datos recolectados	u	2	1,000.00	2,000.00
<b>Participación Comunitaria y Capacitación Estacional</b>						
<b>Programas de capacitación</b>	21	Costos asociados a la organización de talleres y programas	u	2	1,200.00	2,400.00

		educativos para la comunidad				
	22	Honorarios de expertos y capacitadores	pax	2	1,000.00	2,000.00
	23	Producción de materiales didácticos (manuales, guías, videos) para la capacitación de la comunidad.	-	2	800.00	1600.00
<b>Materiales educativos</b>						
	24	Pequeños incentivos materiales para fomentar la participación de la comunidad en actividades de monitoreo y gestión	-	2	250.00	500.00
<b>Incentivos para participación comunitaria</b>						
	25	Costos de transporte de personal, materiales, y equipos entre la isla y el	u	2	1000.00	2,000.00
<b>Logística y transporte</b>						



## Capítulo 4

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- Los resultados obtenidos en los análisis del retroceso de línea de costa en los últimos 30 años de estudio (1994-2024) permite reconocer que la zona de playa cerca a los acantilados ubicada al lado izquierdo mirando al mar, es más propensa a la erosión, aunque en promedio de todos los años, la playa se encuentra en equilibrio.
- El sector 1 que corresponde a la zona de sombra generada por las rocas volcánicas y los manglares que existe en este extremo, son los principales factores para el cambio de dirección del oleaje que llega a esta zona. En esta zona existe acumulación de sedimentos
- Playa Tortuga Bay se ve afectada por el oleaje que viene principalmente del Suroeste, la posición céntrica en el archipiélago de la Isla Santa Cruz permite que islas como Isabela, Santiago y San Cristóbal sean una barrera contra el oleaje. La Isla Isabela cubre toda la sección del noreste y este de la isla, la Isla Santiago cubre la sección noreste de Santa Cruz y San Cristóbal protege la sección sureste.
- El análisis estacional de la playa Tortuga Bay realizado en los modelos computacionales y en el análisis del retroceso de líneas de costa permite reconocer los riesgos y posibles amenazas no antropogénicas que pueden poner en peligro los nidos de las tortugas verdes.
- La corrección de marea que se realiza en las líneas de costa obtenidas con CoastSat, es para disminuir o anular errores que puedan aparecer por la dinámica de la marea, puesto que la línea de costa puede variar dependiendo del instante en que fue tomada la imagen satelital, sea esta en marea baja o alta.

- Los resultados obtenidos en las dos salidas de campo son una línea base para poder iniciar con un análisis de las características litorales en esta playa, más no se puede decir que estos resultados muestren el comportamiento de los 30 años de estudio.
- Los puntos con mayor concentración energética en la Isla Santa Cruz se encuentran en la sección suroeste de la Isla pudiendo llegar a erosionar el acantilado que se encuentra a ese lado de la isla, además en época húmeda existen puntos de concentración energética en el norte de la Isla Baltra.
- Las características oceanográficas son diferentes dependiendo de la época. En época húmeda (diciembre a mayo) la altura de ola es mayor al de la época seca (junio a noviembre). Mientras que el periodo es mayor en época seca.
- La playa presenta una pendiente muy empinada durante ambas épocas. Tortuga Bay se define como una playa reflectiva que va de acuerdo con su perfil pronunciado.
- El manejo costero basado en la sensibilización es una opción que puede tardar muchos años en ejecutarse, ya que se necesita de la comunidad y expertos en el tema que estén dispuestos a poner de su parte, por lo que se realizó la definición de lineamientos primordiales que se deben considerar siempre al diseñar un plan de manejo de este tipo.
- El manejo basado en la sensibilización es una opción larga pero duradera ya que la misma comunidad y turistas con la ayuda de los expertos aprende, valora, analiza y esos conocimientos pueden ser valiosos en un futuro.

## 4.2 Recomendaciones

- Para conocer el comportamiento y dinámica de esta playa es necesario realizar mediciones de las características litorales periódicamente para comprender el porqué de los cambios en las costas
- En esta playa como en varias ubicadas en las Islas Galápagos es necesario tomar datos de caracterización litoral estacionales con el fin de analizar su climatología y comprender si pone en peligro a las especies que en esta viven o a los turistas
- Se puede realizar otro estudio basándose en los datos aquí obtenidos para analizar diferentes escenarios ante el cambio climático e intentar predecir que podría ocurrir en playas ubicada en estas islas y si se encuentran en riesgo.
- Es importante la presencia de voluntarios y expertos en el tema, aunque es recomendable sean residentes temporales o permanentes de las islas con el fin de reducir costos por los viajes desde continente.
- Al momento de realizar los modelos con Delft3D es importante tomar en cuentas los valores tanto de la dirección como la de velocidad del viento, ya que estos influyen mucho en el resultado que se va a obtener.
- Para el diseño de un plan de manejo basado en la sensibilización es necesario tomar en cuenta con anterioridad los puntos de vista de los turistas y personeros del Parque Nacional, por lo que se debería realizar encuestas o entrevistas con el fin de involucrarlos.

## Bibliografía

- Andrade, F., & Ferreira, M. (2006). A Simple Method of Measuring Beach Profiles. *Journal of Coastal Research*, 4, 996-997.
- Autores. (2024). *Lineamientos para el manejo basados en caracterización costera: Tortuga Bay, Galapagos*.
- Azuz, I. (2004). El manejo de los Cambios en la Morfología Costera. *El manejo costero en México*. UAC, Semarnat, CETYS, 654.
- Boranic, I. (2024). *Coastal Management: Its Importance and The Methods Used*. Obtenido de Aggregate Industries: <https://www.aggregate.com/blog/coastal-management>
- Bruun, P. (1962). The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion on Large-Scale Two- and Three-Dimensional Usages. En P. Bruun, *Coastal Research* (Vol. 4, págs. 627-648). Coastal Education & Research Foundation, Inc.
- Calderon, C. (2012). *Feasibility of a marina port along the Buenos Aires coast*. Argentina.
- Casa, Á. (2023). *Google Earth Engine - CoastSat*. Guayaquil.
- Centre de Suivi Ecologique. (2010). *Adaptación a la erosión costera en zonas vulnerables*. Joal, Rufisque y Saly, Senegal.
- Climate ADAPT. (2023). *Integration of climate change adaptation in coastal zone management plans*. Obtenido de <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/adaptation-of-integrated-coastal-management-plans>
- Conservación Internacional & WWF. (2011). *Adaptándonos al cambio climático en las Islas Galápagos*. Quito.
- Copernicus. (2024). *Programme of the European Union*. Obtenido de Europe's eye on Earth: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure-overview/discover-our-satellites>
- Copernicus. (2024). *Programme of the European Union*. Obtenido de Misión T2: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>
- Correa, S. (2012). Procesos culturales y adaptación al cambio climático: la experiencia en dos islas del Caribe colombiano. *Boletín de Antropología*. Universidad de Antioquia, 27(44), 204-222.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Cuarta ed.). Mexico D.F.
- Deltares. (2024). *D-Waves*. Obtenido de <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-fm-suite/modules/d-waves>

- Desonie, D. (2021). *FlexBooks*. Obtenido de Erosión a causa de las olas:  
<https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-conceptos-de-ciencias-de-la-tierra-grados-6-8-en-espanol/section/9.15/primary/lesson/erosi%C3%B3n-a-causa-de-las-olas/>
- DPNG. (2023). *Informe Anual de visitantes a las áreas protegidas de Galápagos 2023*. Galápagos.
- Environmental change and management. (2020). En *Oxford Big Ideas Humanities & Social Sciences 10* (pág. 96).
- Galapagos Conservancy . (2023). *New Visitor Checkpoint at Tortuga Bay to Protect the Natural Paradise*. Obtenido de <https://www.galapagos.org/newsroom/new-visitor-checkpoint-tortuga-bay/>
- GESAMP. (1997). *The Contributions of Science to Integrated Coastal Managment* . Roma: GESAMP Reports and Studies No. 61. FAO.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Cruz. (2014). *Localización Geográfica*. Obtenido de <https://www.gadsantacruz.gob.ec/puerto-ayora/localizacion-geografica/>
- Graziati, G. (2024). *Ecología Verde*. Obtenido de Bahía: qué es y ejemplos:  
<https://www.ecologiaverde.com/bahia-que-es-y-ejemplos-4895.html>
- Guido, P., Ramírez, A., Godínez, L., Cruz, S., & Juárez, A. (2009). Estudio de la erosión costera en Cancún y la rivierra Maya, México. *Avances en Recursos Hidráulicos*(20), 41-56. Obtenido de file:///C:/Users/hp/Downloads/mprada,+n20a03.pdf
- Himmelstoss, E., Henderson, R., Kratzmann, M., & Farris, A. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*. Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179.
- IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007*. Informe de Síntesis, Ginebra.
- Jacome, E. (2022). Analisis de Condiciones Extremas de Oleaje en el Archipiélago de Galapagos. *Revista Politecnica* .
- Landsat Missions. (2019). *USGS science for a changing world*. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>
- Landsat Missions. (2019). *USGS science for a changing world*. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>
- Landsat Missions. (2023). *USGS science for a changing world*. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>
- Lemay, M. (1998). *Manejo de los recursos costeros y marinos en América Latina y el Caribe*. Informe Técnico, Washington, D.C.
- Lizano, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Revista de Ciencia y Tecnología*. Obtenido de

file:///C:/Users/hp/Downloads/2654-Texto%20del%20art%C3%ADculo-4134-1-10-20121016.pdf

- Luijendijk , A. (2018). The State of the world's Beaches. *Scientific Reports*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-018-24630-6>
- Marquez, L., Loose, A., Tamayo, V., Arce, M., Espinoza, E., Parra , M., . . . Salazar, H. (2015). *Informe de la temporada de anidación de la tortuga verde den Tortuga Bay 2015*. Galápagos.
- Meteoblue. (2024). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puerto Ayora*. Obtenido de [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/puerto-ayora\\_ecuador\\_3652764](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/puerto-ayora_ecuador_3652764)
- Meteoblue. (2024). *Simulated Historical Climate and weather data for Galapagos Islands*. Obtenido de [https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/galapagos-islands\\_ecuador\\_3658931](https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/galapagos-islands_ecuador_3658931)
- Ministerio de Turismo. (2017). *Tortuga Bay, entre las 10 mejores playas del mundo*. Obtenido de <https://www.turismo.gob.ec/tortuga-bay-entre-las-10-mejores-playas-del-mundo/>
- Nativi et al. (2018). Clasificación de la Línea Costera de la Isla Santa Cruz, Galapagos a Partir de Imágenes Satelitales. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 22(1).
- NIBIB. (2016). *Modelando Computacional*. Washington DC.
- NOAA. (2023). *Digital Shoreline Analysis System*. Obtenido de Office for Coastal Management : <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/tools/dsas.html>
- Otvos, E. (1982). *Regla de Bruun. En: Playas y geología costera. Serie Enciclopedia de Ciencias de la Tierra*. Springer. New York, NY. Obtenido de [https://doi.org/10.1007/0-387-30843-1\\_79](https://doi.org/10.1007/0-387-30843-1_79)
- Portilla, J. (2018). *Open Access Atlas of Global Spectral Wave*, 8, 1-9.
- Portilla-Yandún, J., & Jácome, E. (2020). Covariate extreme value analysis using wave spectral partitioning. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Obtenido de <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0198.1>
- Post, J., & Lundin, C. (1996). *Guidelines for integrated coastal zone management*. Washington, D.C.: Environmentally Sustainable Development Studies and Monograph Series No. 9. Banco Mundial.
- RAE. (2024). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de 23.<sup>a</sup> ed., [versión 23.7 en línea]: <https://dle.rae.es>

- Saad, R. (2022). Importance of Beach Evaluation for Integrated Coastal Zone Management: A Case Study of Tyre Southern Lebanon . *Bulletin de la Société Royale desd Sciences de Liege*. doi:10.255118/0037-9565.10907
- Sapiains, R., Ugarte, A., & Hasbún, J. (2019). Perceptions of climate change on the Island of Chiloé: Challenges for local governance. *Magallania*, 47(1). Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-22442019000100083>
- Seelos et al. (Junio de 2021). Composition and Provenance Analysis of Beach Sands in an Almost Isolated Sedimentary System-A Field Study of The Galapagos Archipiélago. *American Journal of Science*, 321. doi:10.2475/05.2021.04
- Sosa, J. (2014). *Wave modelling in the Ecuadorian Pacific using WAVEWATCH III and SWAN*. Quito.
- The Tanzania Coastal Management Partnership. (2000). *Chapter 1: Coastal Erosion*. A.S. Ngusaru.
- Valderrama, L., Castaneira, M., & Martínez, M. (2010). *Evaluación de los cambios en la línea costa de manglar y otras coberturas, empleando el programa DSAS de la USGS*. [http://speck.conabio.gob.mx/manglarfotos/CAM/coastline2/Metodo\\_linea\\_costa.pdf](http://speck.conabio.gob.mx/manglarfotos/CAM/coastline2/Metodo_linea_costa.pdf).
- Vera, L., & Marín, S. (2015). Clima de Olas en la Zona Ecuatorial con Informacion Satelital. *Acta Oceanografica del Pacifico*, 20(1).
- Vos, K., Harley, M., Splinter, K., Simmons, J., & Turner, I. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160-174. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Vos, K., Spliner, K., Harley, M., Simmons, J., & Turner, I. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815219300490>

## Anexos

### Anexo 1: Rutina de Matlab para la obtención de datos de WAVEWATCH III

```

link='http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/Model_output/WAVEWATCH_III/3hourl
y';
% atributos
ncdisp(link);

% longitud, latitud
lo=ncread(link,'lon');
la=ncread(link,'lat');

% generando los vectores columna "full" para lo, la
[lom,lam]=meshgrid(lo,la);
lom=reshape(lom,157*288,1);
lam=reshape(lam,157*288,1);

% graficando la linea de costa %
coastmap([277,283,-5,2],'nofill',1,'ecu_hr2'), hold on,
plot(lom,lam,'r*')

% elegir el punto de grilla mas cercano es a su zona de interes, ejemplo: [278.8,-2] --> [278.75,-
2]

% antes, extraemos el eje de tiempo
tim=ncread(link,'time');
ixtim=find(tim>737090);
tim(ixtim)=NaN;

% id de posicion
% Ubicar el punto identificado en la grilla, para que solo se extraiga la informacion de ese unico
punto
ixlo=find(lo==270);
ixla=find(la== 0);

% altura significativa --> htsgwsfc
% Size: 288x157x65256
% Dimensions: lon,lat,time
% start, count
w_hsig=ncread(link,'htsgwsfc',[ixlo,ixla,1],[1,1,Inf]);
w_hsig=squeeze(w_hsig); %eliminar las dimensiones unitarias

% [qc] hsig --> [0,3] "control de datos"
% cualquier valor fuera de este rango sera [NaN]
ixhsig=find(w_hsig>5 | w_hsig<0);

```

```

w_hsig(ixhsig)=NaN;

% grafica preliminar
plot(tim,w_hsig); datetick,

% -----

% periodo --> perpwsfc
% Size: 288x157x65256
% Dimensions: lon,lat,time
% start, count
w_per=ncread(link,'perpwsfc',[ixlo,ixla,1],[1,1,Inf]);
w_per=squeeze(w_per);

% [qc] per --> [0,20]
% cualquier valor fuera de este rango sera [NaN]
ixper=find(w_per>25 | w_per<0);
w_per(ixper)=NaN;

% grafica preliminar
plot(tim,w_per); datetick,

% -----

% direccion oleaje --> dirpwsfc
% Size: 288x157x65256
% Dimensions: lon,lat,time
% start, count
w_theta=ncread(link,'dirpwsfc',[ixlo,ixla,1],[1,1,Inf]);
w_theta=squeeze(w_theta);

% [qc] theta --> [0,360]
% cualquier valor fuera de este rango sera [NaN]
ixtheta=find(w_theta>360 | w_theta<0);
w_theta(ixtheta)=NaN;

% grafica preliminar
plot(tim,w_theta); datetick,

% -----

% decimar, solo tomar un dato por dÃ-a
wd_tim=tim(1:8:end);
wd_hsig=w_hsig(1:8:end);
wd_per=w_per(1:8:end);
wd_theta=w_theta(1:8:end);

```

```

%-----viento
uu=ncread(link,'ugrdsfc',[ixlo,ixla,1],[1,1,Inf]);
uu=squeeze(uu);
vv=ncread(link,'vgrdsfc',[ixlo,ixla,1],[1,1,Inf]);
vv=squeeze(vv);

ww=sqrt(uu.^2+vv.^2);
% [qc] ww --> [0,100]
% cualquier valor fuera de este rango sera [NaN]
ixww=find(ww>100 | ww<0);
ww(ixww)=NaN;
wwdir=atan2d(vv,uu);
wwdir=wwdir+180;

%Grafico de viento

Options = {'anglenorth',0,'angleeast',90,'labels',{'N (0°)','E (90°)','S
(180°)','W(270°)'},'freqlabelangle',45,'cmap','invjet','lablegend','Velocidad de Viento
[m/s]','TitleString',{'Rosa de viento';'Posición de la boya [268.75,0]';'Período: 1996-2018'}};

[figure_handle,count,speeds,directions,Table] = WindRose(wwdir,ww,Options);

%Grafico de oleaje

Options = {'anglenorth',0,'angleeast',90,'labels',{'N (0°)','E (90°)','S
(180°)','W(270°)'},'freqlabelangle',45,'cmap','invjet','lablegend','Altura Significativa
[m]','TitleString',{'Rosa de oleaje';'Posición de la boya [268.75,0]';'Período: 1996-2018'}};

[figure_handle,count,speeds,directions,Table] = WaveRose(w_theta,w_hsig,Options);

%Descargar data

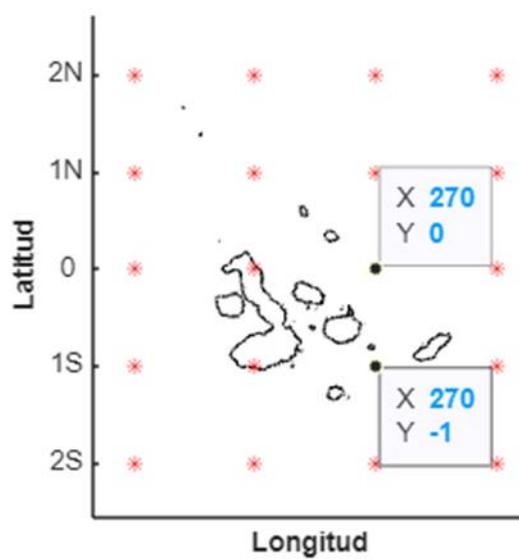
data_oleaje = [tim,datevec(tim),w_hsig,w_per,w_theta,ww,wwdir];
csvwrite('data_oleaje_Gala_268.75_0.csv',data_oleaje);

```

## Anexo 2: Análisis de información de las boyas

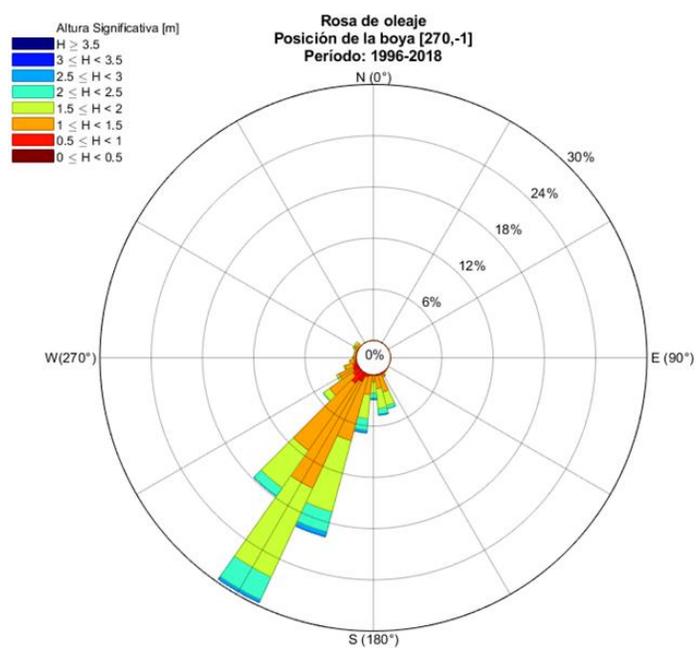
### Figura 28

*Posición de las boyas virtuales en Galápagos*



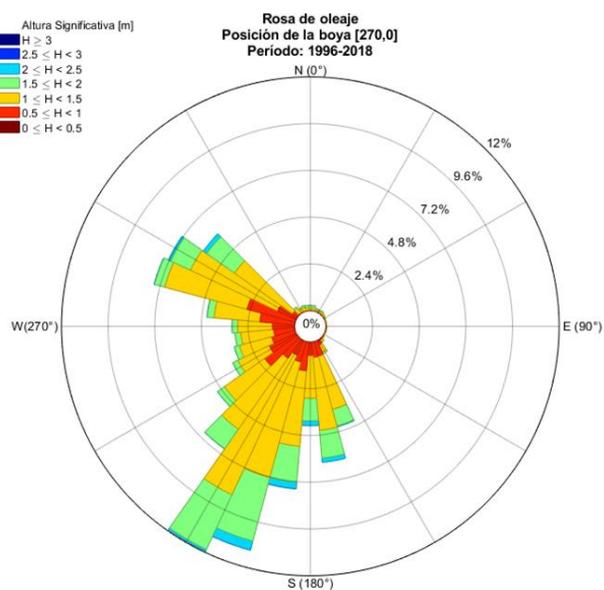
### Figura 29

*Rosa de oleaje de la boya al sur de Santa Cruz*



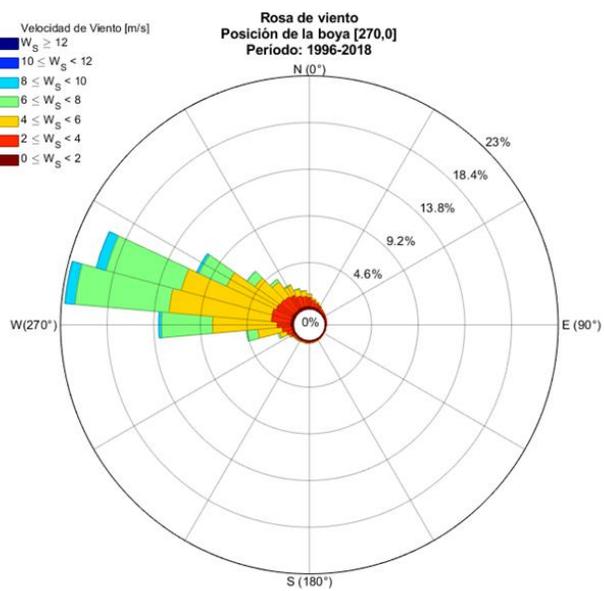
**Figura 30**

*Rosa de oleaje al Norte de Santa Cruz*



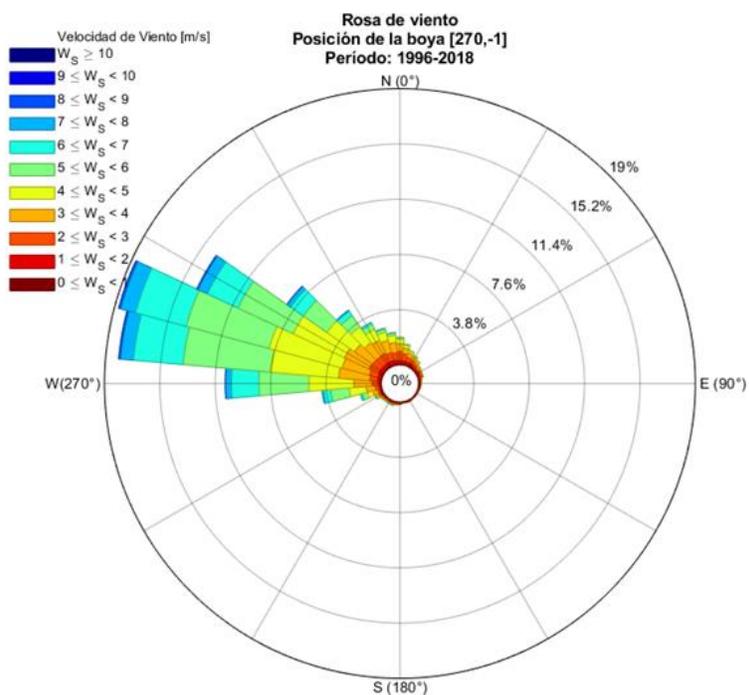
**Figura 31**

*Rosa de Viento de la boya al norte de Santa Cruz*



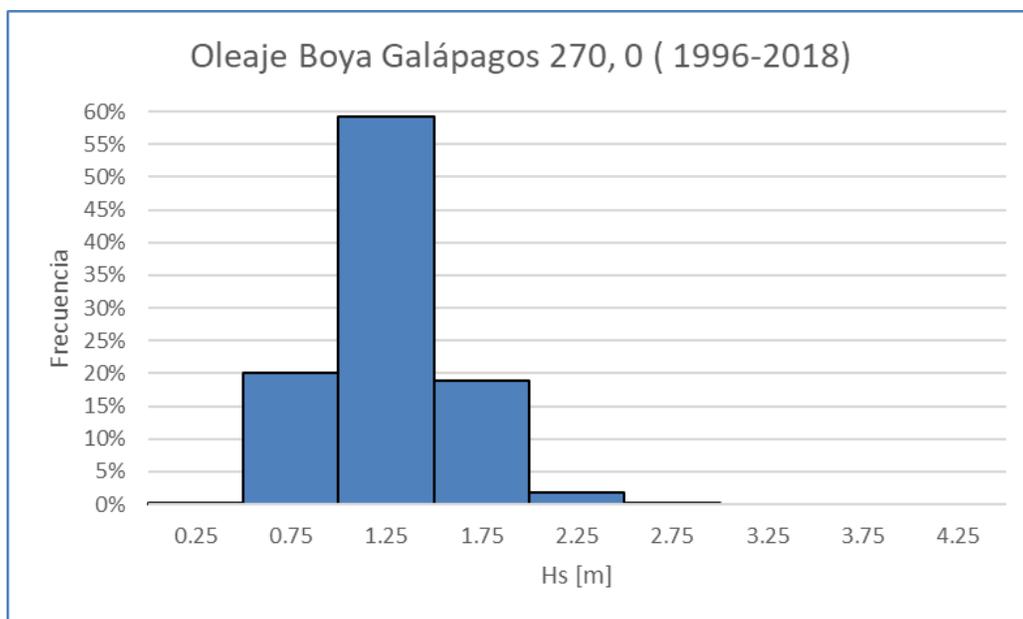
**Figura 32**

*Rosa de Viento de la boya al sur de Santa Cruz*



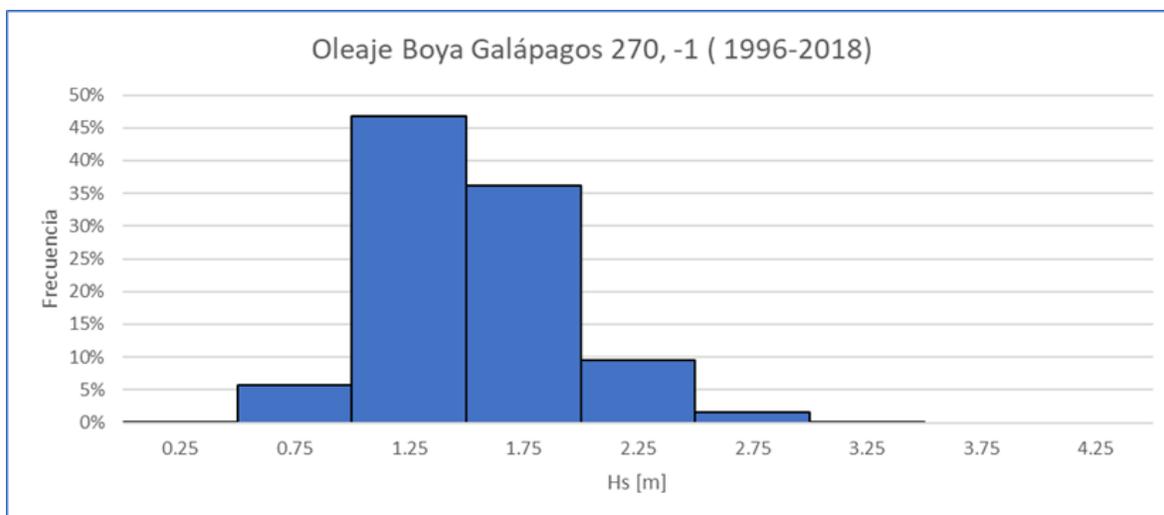
**Figura 33**

*Histograma de altura de ola de la boya al norte de Santa Cruz*

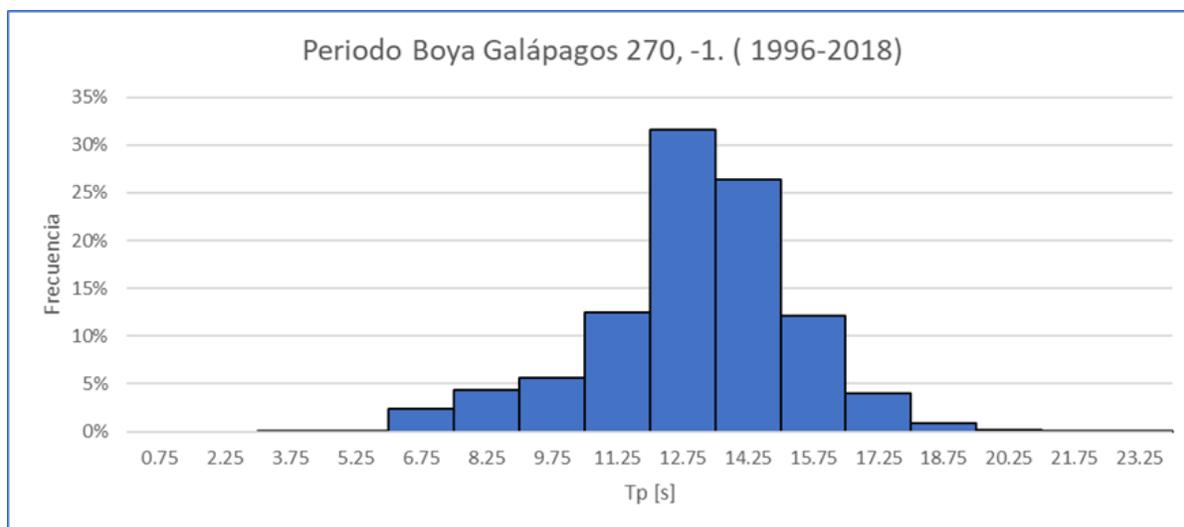


**Figura 34**

*Histograma de altura de ola de la boya al sur de Santa Cruz*

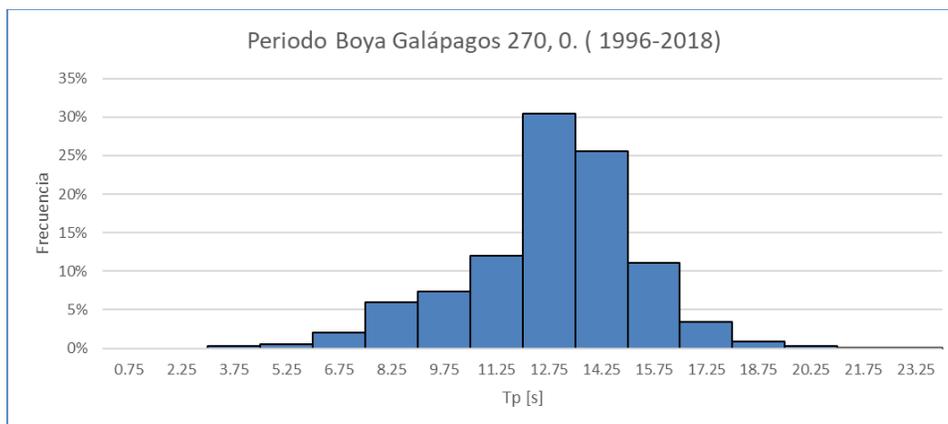
**Figura 35**

*Histograma de periodo de la boya al sur de Santa Cruz*



**Figura 36**

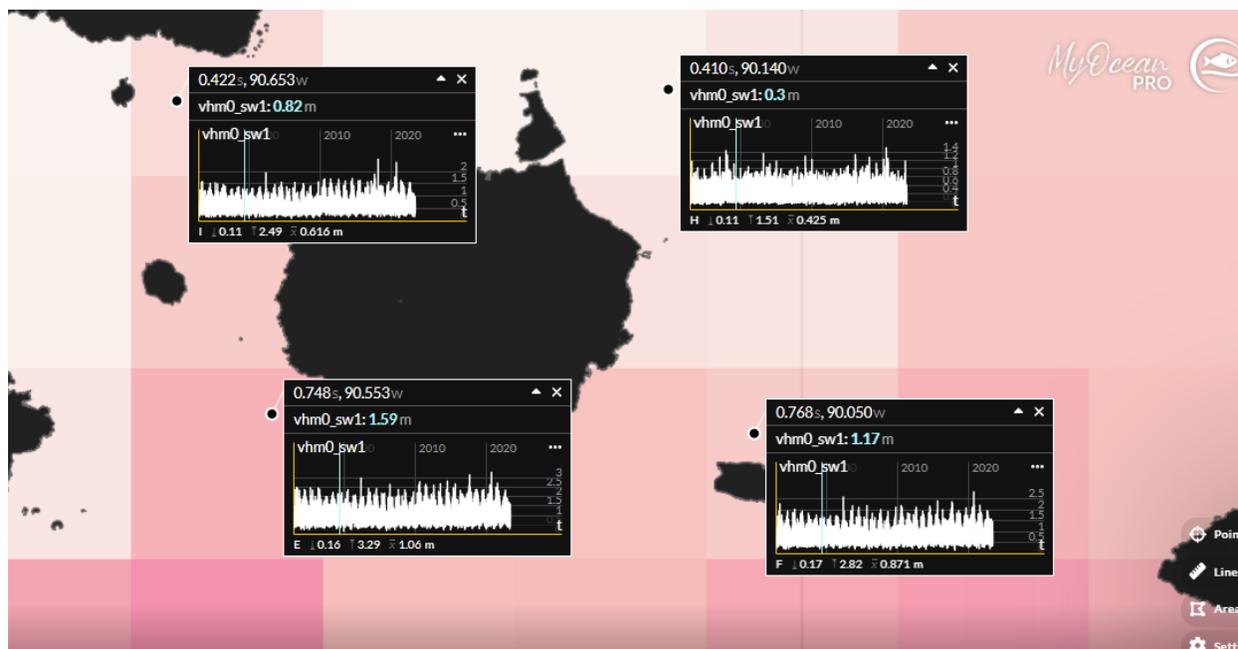
*Histograma de periodo de la boya al norte de Santa Cruz*



### Anexo 3: Elección de datos de la plataforma de Copernicus para la validación del modelo

**Figura 37**

*Altura significativa obtenida en Copernicus MyOcean Viewer para el 16/12/1999 en los cuatro puntos*



Anexo 4: Raster de los resultados generados en el Modelo Computacional

Figura 38

Raster del Transporte de Energía para Época Seca y Húmeda

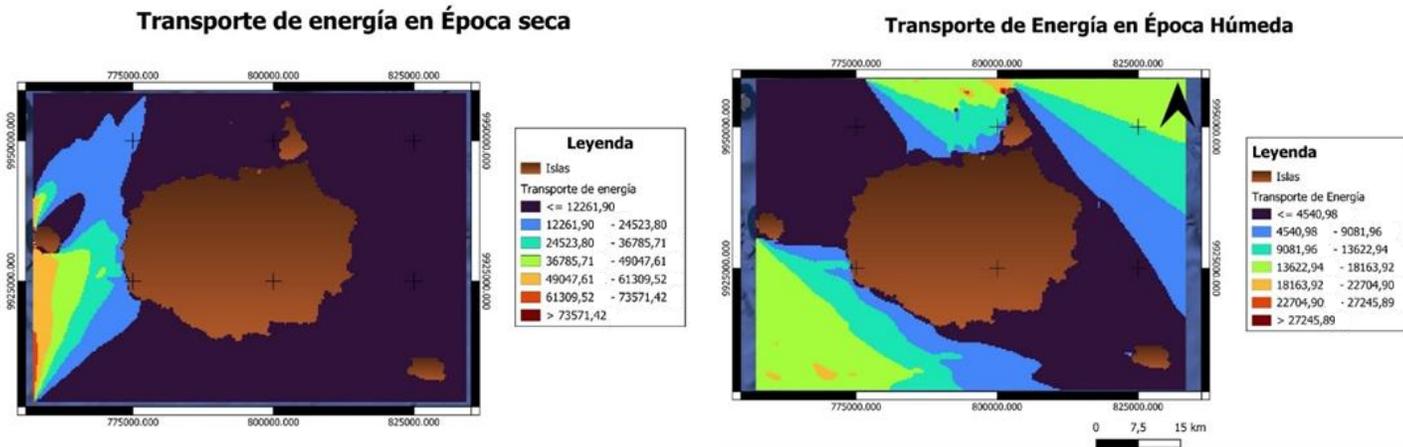
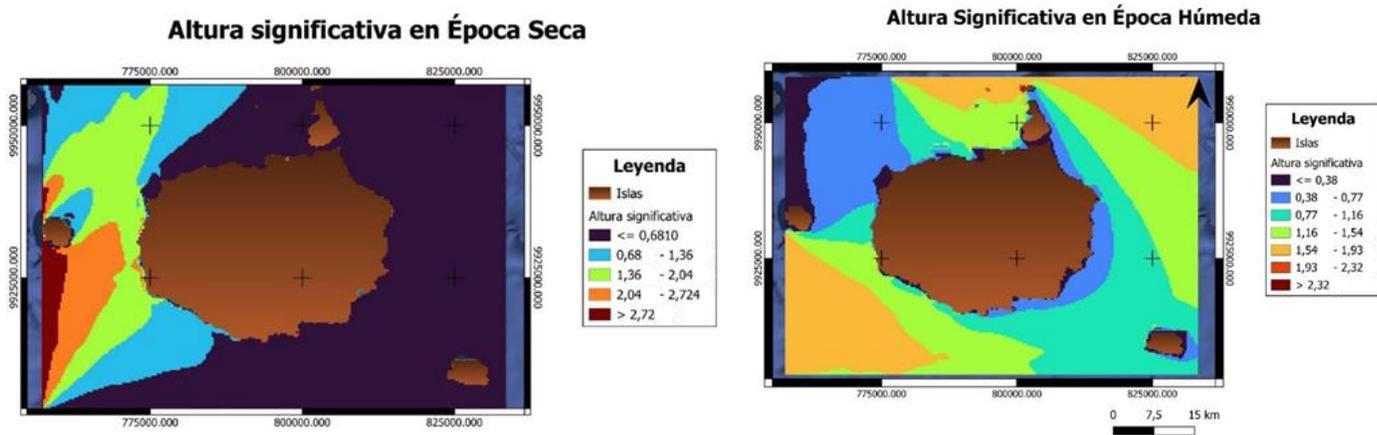


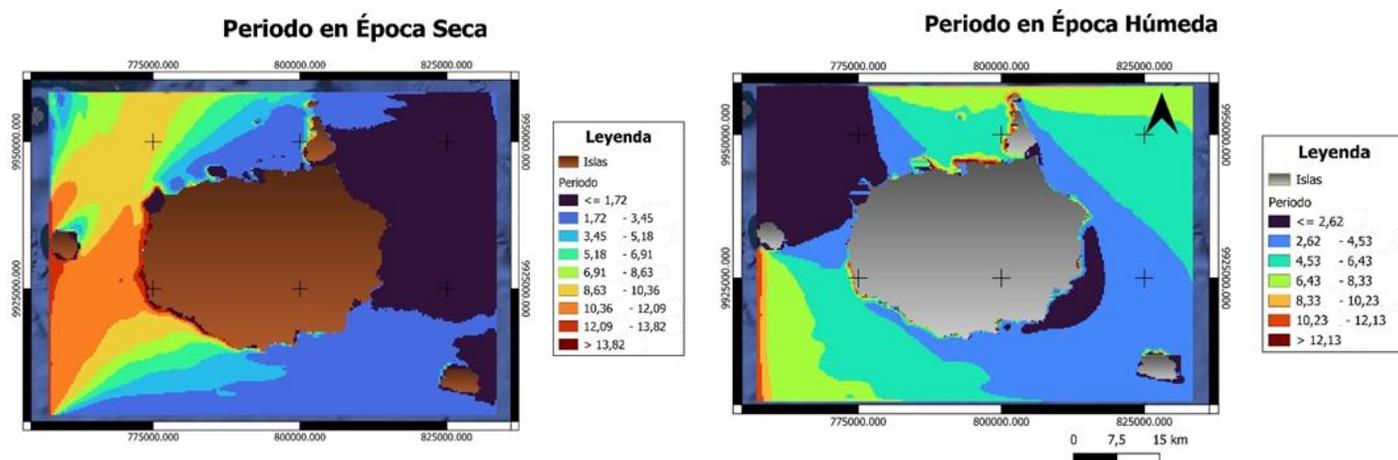
Figura 39

Raster de Altura significativa para Época Seca y Húmeda



**Figura 40**

*Raster de Período de oleaje para época seca y húmeda*



**Figura 41**

*Raster de Dirección de Oleaje s para época seca y húmeda*

