

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Marítima y Ciencias del Mar

Análisis del cambio de la línea de costa en la playa El Murciélago-Manta
durante el periodo 2006-2022

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera Oceanográfica

Presentado por:

Campos Parra Doménica Alejandra

Intriago Basurto Analía

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a Dios, por la fuerza que me ha dado para avanzar con cada reto.

A mi padre, Ernesto Campos, por haberme inculcado desde pequeña el amor a la ciencia; por haber sido mi primer paso en el mundo de la ingeniería, y que a pesar de su partida me acompañó en cada aprendizaje todos los días durante la carrera.

A mi hermana, Natalia Campos, por ser el apoyo que nunca me faltó en los días buenos y malos.

A mi madre, Patricia Parra, y mis abuelas, Piedad Ríos y Amparo López, por cuidarme desde el cielo en cada camino.

Y a Cesar Robalino, por ser quien siempre me impulsó a ser una mejor estudiante, compañera y amiga.

Doménica Campos P.

DEDICATORIA

Este trabajo representa la culminación de algunos años de estudio fuera de casa, por lo cual se lo dedico a mis papás Mayra y José, por su esfuerzo desmesurado y apoyo en cada etapa, y como no, a mi pequeño hermanito José Ángel que llegó a iluminar mis días cuando menos lo imaginaba. A mis abuelitos Doris, Manuel y Lidia por su cariño constante, y a quienes tuvieron que partir antes, pero desde el cielo festejan conmigo, mi mamá de corazón Cerela, y mis tíos Telma y Franklin, quienes me acogieron como hija y me hicieron sentir como en casa.

A mi enamorado Bryan, por todo su amor y paciencia, especialmente durante las salidas de campo.

Y por último a todos mis docentes, quienes han inculcado excelentes conocimientos en mí, especialmente a mi profesora del colegio, Herminia.

Analía Intriago Basurto

AGRADECIMIENTOS

Nuestros sinceros agradecimientos al M.Sc. Iván Saltos, por toda su guía y apoyo en la realización de este trabajo, como también al Ph D. Carlos Martillo por sus valiosos comentarios en todo el proceso.

Al Ing. Elvis Espinoza, por su ayuda en los diversos procedimientos.

A nuestras queridas amigas, Ing. Arcelia Portilla e Ing. Doménica Coello, y a todos los compañeros que nos brindaron soporte durante las actividades de campo, especialmente a Jefferson Cárdenas, Daniel Escalante y Yuneski Solórzano.

Al Ing. Freddy Barreiro, por su disposición para las reuniones y actividades en campo.

Doménica Campos & Analía Intriago

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Doménica Alejandra Campos Parra, Analía Intriago Basurto* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Doménica Campos P.
Doménica Campos

Analía Intriago B.
Analía Intriago

EVALUADORES

Jorge Espinoza A., M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

Iván Saltos A., M.Sc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La playa El Murciélago en Manta evidencia procesos de sedimentación y erosión luego de la construcción del rompeolas del Puerto de Manta en 1970, lo que representa un problema, debido a que la acumulación del sedimento hacia el espigón genera un “bypass” hacia la dársena, generando una disminución de la profundidad del puerto y como consecuencia se necesitaran dragados de mantenimientos más constantes para no afectar su operatividad. En este contexto, el presente estudio analiza el proceso morfodinámico en esta zona mediante la evaluación del cambio de línea de costa en la playa El Murciélago durante el periodo entre 2006 y 2022 utilizando imágenes Landsat y Sentinel, y modelos computacionales como LITPACK. Los resultados coincidieron en un avance promedio mayor a 5.2 m/año en la región más cercana al rompeolas y erosión menor a -1m/año en la zona frente al malecón, tanto el de imágenes como el del modelo, mientras que el mayor avance fue de 7.9 y 9.8 m/año respectivamente. Los resultados del modelo computacional fueron calibrados y validados previo a la generación de futuros escenarios hacia el 2033, indicando que para este año la línea de costa crecería a una razón máxima de 12.3 m/año, los mismos que permitirían a los tomadores de decisiones conocer el problema y diseñar medidas de mitigación. Finalmente existen variables que deben ser consideradas en el modelo para representar mejor la realidad, como la influencia del viento y la disposición más adecuada de la estructura por lo que además es importante tener una base de datos con información actualizada.

Palabras Clave: sedimentación, erosión, cambio de línea de costa, DSAS, LITPACK.

ABSTRACT

El Murciélago beach in Manta shows evidence of sedimentation and erosion processes after the construction of the breakwater of the Port of Manta in 1970, which represents a problem because the accumulation of sediment towards the breakwater generates a "bypass" towards the dock, generating a decrease in the depth of the port and therefore more constant maintenance dredging will be needed in order not to affect its operability. In this context, the present study analyzes the morpho dynamic process in this area by evaluating the coastline changes in El Murciélago beach during 2006 and 2022 using Landsat and Sentinel images, and computational models such as LITPACK. The results coincided with an average advance greater than 5.2 m/year in the region closest to the breakwater and erosion less than -1 m/year in the area in front of the seawall, both from images and the model, as the maximum advance was 7.9 and 9.8 m/year respectively. The results of the computational model were calibrated and validated before the generation of future scenarios for 2033, indicating that for this year the coastline would grow at a maximum rate of 12.3 m/year, which would allow decision-makers to understand the problem and design mitigation measures. Finally, some variables should be considered in the model to better perform reality, such as the influence of wind and the most appropriate arrangement of the structure, so it is also substantive to have a database with updated information.

Keywords: sedimentation, erosion, change of coastline, DSAS, LITPACK.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Descripción del área de estudio.....	3
1.4.1 Climatología y meteorología.....	4
1.4.2 Corrientes	5
1.4.3 Olas	5
1.4.4 Sedimentología	5
1.4.5 Vientos.....	5
1.5 Marco Teórico.....	6
1.5.1 Generación de oleaje	6
1.5.2 Transporte de sedimentos.....	6
1.5.3 Estructuras costeras	7
1.5.4 Modelos numéricos	8

1.5.5	MIKE ZERO	8
CAPÍTULO 2		12
2.	METODOLOGÍA	12
2.1	Etapa 1. Recopilación de información.....	14
2.1.1	Cartas Náuticas y batimetrías	14
2.1.2	Datos de oleaje y viento	14
2.1.3	Salida de campo	15
2.2	Etapa 2. Procesamiento de imágenes	20
2.2.1	Google Earth Engine - Descarga de imágenes satelitales.....	20
2.2.2	Sistemas de Información Geográfica (GIS)	21
2.3	Etapa 3. Configuración del modelo computacional	22
2.3.1	MIKE ZERO	22
2.3.2	MIKE 21SW	23
2.3.3	LINTABL	23
2.3.4	LITLINE.....	24
2.4	Etapa 4. Calibración y validación de resultados.....	24
2.4.1	Validación de la línea de costa y perfiles.....	24
2.4.2	Validación del avance de línea de costa en DSAS	25
2.5	Etapa 5. Generación de escenarios.....	26
CAPÍTULO 3		27
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	27
3.1	Etapa 1. Recopilación de información.....	27
3.1.1	Cartas náuticas y batimétricas	27
3.1.2	Datos de oleaje y viento	29
3.1.3	Salida de campo	31
3.2	Etapa 2. Procesamiento de imágenes satelitales.....	37

3.3	Etapa 3. Configuración del modelo	38
3.3.1	MIKE ZERO	38
3.3.2	MIKE 21 SW	41
3.3.3	LINTABL	41
3.3.4	LITLINE.....	42
3.4	Etapa 4. Calibración y validación de resultados.....	43
3.4.1	Validación de la línea de costa y perfiles.....	43
3.4.2	Validación del avance de línea de costa en DSAS	44
3.5	Etapa 5. Generación de escenarios	46
3.6	Análisis de costos	47
CAPÍTULO 4		49
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
4.1	Conclusiones	49
4.2	Recomendaciones.....	51
BIBLIOGRAFÍA		52
APÉNDICES.....		56
APÉNDICE A: Reuniones con el cliente		56
APÉNDICE B: Códigos de programación		58
APÉNDICE C: Salida de campo		63
APÉNDICE D. Granulometría		65
APÉNDICE E. Cartas Náuticas proporcionadas por TPM.....		67
APÉNDICE F. Cartas Náuticas INOCAR		69

ABREVIATURAS

APM	Autoridad Portuaria de Manta
DEM	Digital Elevation Model
DHI	Danish Hydraulic Institute
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
Dx	Diámetro del xpor ciento de la muestra
GIS	Geographic Information System
IOA	Instituto Oceanográfico de la Armada
INOCAR	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada
MLWS	Mean Low Water Spring
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
MWL	Mean Water Level
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SW	Spectral Wave
T	Periodo
TIN	Triangular Irregular Networks
TSM	Temperatura Superficial del Mar
TPM	Terminal Portuaria de Manta
WWIII	WAVEWATCHIII
WLR	Weighted Linear Regression

SIMBOLOGÍA

km	kilómetro
m	metro
mm	milímetro
s	segundo
m/s	metros sobre segundos
m/año	metros por año
N	Norte
S	Sur
E	Este
O	Oeste
°C	Celsius
Ex	Estación número x
PPx	Perfil de Playa número x
MSTx	Muestra de Sedimento en Tierra número x
MSAx	Muestra Sedimento en Agua número x
PBTx	Perfil Bati-Topo número x
CLx	Característica Litoral número x

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Batimetría de la playa El Murciélago, Manta. Comparación de líneas de costa 2007 y 2020. (Fuente: TPM, 2020).....	2
Figura 1-2 Ubicación de la Terminal Portuaria de Manta, y la playa El Murciélago (oeste). (Autoras, 2022).....	4
Figura 1-3 Movimiento del sedimento por incidencia oblicua del oleaje. (The coast, beaches and shoreline processes, 2011)	7
Figura 1-4 Resultados ploteados de LITDRIFT. Parámetros de la ola y corriente longshore a través del perfil. Dirección de la ola, altura y velocidad. (DHI, 2014)	10
Figura 1-5 Evolución de línea de costa. Figure 2.16 (DHI, 2014).....	11
Figura 2-1 Diagrama de metodología (Autoras, 2022).	13
Figura 2-2 Ubicación de la boya virtual respecto a Manta. (Autoras, 2022)	15
Figura 2-3 Tabla de marea estación puerto de Manta para salida de campo (INOCAR, 2022).	16
Figura 2-4 Estaciones en la playa El Murciélago. (Autoras,2022)	16
Figura 2-5 Tipo de rompiente del oleaje. (Galvin y Cyril, 1968).	17
Figura 2-6 Uso del método Andrade para medir pendiente de la playa. (Autoras,2022)	19
Figura 2-7 Ubicaciones de las muestras de sedimento a lo largo de la playa. (Autoras,2022).....	19
Figura 2-8 Draga Van Veen abierta, lista para captar sedimento del fono. (OceanNet, 2022).....	20
Figura 2-9 Código para ubicación del sitio y comando previo a la descarga de imágenes desde Google Earth Engine. (Autoras, 2022)	21
Figura 2-10 Código de extracción de líneas de costa en formato shapefile. (Autoras, 2022).....	22
Figura 2-11 Perfiles que a). No cumple la validación. b), Sí cumple la validación. (Autoras,2022).....	24
Figura 3-1 DEM generado a partir de puntos digitalizados de la Carta Náutica 2008 y datos batimétricos proporcionada por TPM (Autoras, 2022)	28
Figura 3-2 Proceso morfodinámico observado a través de las Cartas Náuticas 2008 y 2018. (Autoras, 2022)	29

Figura 3-3 Rosa de oleaje generada a partir de datos de la boya de WWIII (Autoras, 2022)	30
Figura 3-4 Rosa de vientos generada a partir de datos de la boya de WWIII (Autoras, 2022)	31
Figura 3-5 Ubicación de las estaciones para la toma de muestra de sedimentos, perfiles de playa y características litorales. (Autoras,2022)	32
Figura 3-6 Ubicación de las estaciones MSA con respecto al espigón de TPM. (Autoras,2022).....	36
Figura 3-7 Sedimento de la estación MSA2 antes del análisis granulométrico. (Autoras,2022).....	36
Figura 3-8 Resultado del procesamiento de imágenes satelitales. (Autoras,2022) ...	37
Figura 3-9 Líneas de costa extraídas por CoastSat. (Autoras,2022).....	38
Figura 3-10 Perfiles bati-topo (PBT) a lo largo de la playa El Murciélago, para ser ingresados al modelo. (Autoras,2022)	39
Figura 3-11 Zona de la Playa el Murciélago de la carta náutica IOA-10401(2008). (Autoras,2022).....	40
Figura 3-12 Resultado de la corrida del módulo SW para el año 2006. (Autoras,2022)	41
Figura 3-13 Resultado del cambio en la línea de costa realizado por LITLINE. Periodo 2006-2022. (Autoras,2022)	43
Figura 3-14 Validación de los resultados de LITLINE y CoastSat por medio del análisis del error relativo para la línea de costa del 2021. (Autoras,2022)	44
Figura 3-15 Resultado obtenidos por DSAS periodo 2003-2021. (Autoras,2022)	45
Figura 3-16 Resultado obtenido por DSAS para el cambio de la línea de costa para el periodo 2006-2022. (Autoras, 2022)	46
Figura 3-17 Resultados obtenidos por LITLINE como parte de los posibles escenarios del cambio de la línea de costa para periodo 2023-2033. (Autoras,2022)	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de estructuras costeras, objetivo y función. (Burcharth y Hughes, 2003)	7
Tabla 1.2 Módulos de LITPACK con su descripción. (DHI, 2014)	9
Tabla 2.1 Coordenadas de las estaciones. (Autoras, 2022)	17
Tabla3.1 Resultados de parámetros oceanográficos medidos en campo. (Autoras,2022)	33
Tabla 3.2 Tipo de oleaje mediante el número de Iribarren. (Autoras,2022)	33
Tabla3.3 Estado morfodinámico de la playa mediante parámetro de Dean. (Autoras,2022)	33
Tabla 3.4 Resultado de toma de perfiles. (Autoras,2022)	34
Tabla 3.5 Resultado de granulometría Estación1. (Autoras,2022)	34
Tabla 3.6 Resultado de granulometría Estación 2. (Autoras,2022)	35
Tabla 3.7 Descripción de muestras de sedimento tomadas en agua. (Autoras,2022)	35
Tabla 3.8 Descripción de parámetros de imágenes satelitales. (Autoras,2022)	37
Tabla 3.9 Descripción de valores de perfiles bati-topográficos.(Autoras,2022)	40
Tabla 3.10 Análisis de costos para el proyecto. (Autoras,2022)	48

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Ecuador cuenta con aproximadamente 5271 km de longitud de línea de costa considerando las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas y El Oro (Secretaría Técnica Planifica Ecuador, 2020). Sin embargo, el ambiente marino-costero es muy dinámico y genera procesos de erosión y sedimentación como resultado de la interacción de procesos hidrodinámicos (ej., olas, mareas, corrientes) y morfodinámicos (ej., el transporte de sedimentos).

En este contexto, se delimita el área de estudio a la playa El Murciélago ubicada en Manta, Manabí, hacia el oeste de la Terminal Portuaria de Manta (TPM) la misma que es considerada como la primera playa urbana de esta ciudad, cuyos inicios datan de 1960 (Sánchez, 2018). Con el paso de los años, en este sector se observa el depósito de arena (sedimentos) hacia el oeste del puerto, permitiendo, por una parte, tener una zona de recreación (playa) amplia para turistas y locales, sin embargo, esta acumulación de sedimentos genera también un transporte (bypass) debido a la acción del oleaje y corrientes hacia el interior de los muelles de TPM, disminuyendo de esta forma la profundidad, afectando la maniobrabilidad y operatividad de la terminal portuaria.

El presente trabajo analiza cambios en la línea de costa mediante el uso de imágenes satelitales y modelos computacionales durante el periodo 2006-2022, para posteriormente proyectar el cambio hacia el 2033, requiriendo de una salida de campo para comprender la dinámica litoral y el transporte de sedimentos, los mismos que sirven de insumo para la calibración y validación del modelo computacional.

1.1 Descripción del problema

En la playa El Murciélago, se ha generado un proceso de sedimentación a partir de la construcción del rompeolas del Puerto de Manta alrededor de 1970, hecho ocurrido luego de la creación de la Autoridad Portuaria de Manta en 1966 (Delgado, 2017).

Este proceso de sedimentación representa un incremento del volumen de arena seca sobre la playa El Murciélago, mostrado en la Figura 1.1. Esta acumulación de sedimento ha ido creciendo de manera constante y actualmente preocupa a las autoridades del puerto debido a que si continua de esta forma, el paso de sedimento tipo bypass se

depositaría en la dársena y muelles internacionales, lo cual representaría un continuo control de dragado para no afectar la operatividad del puerto.

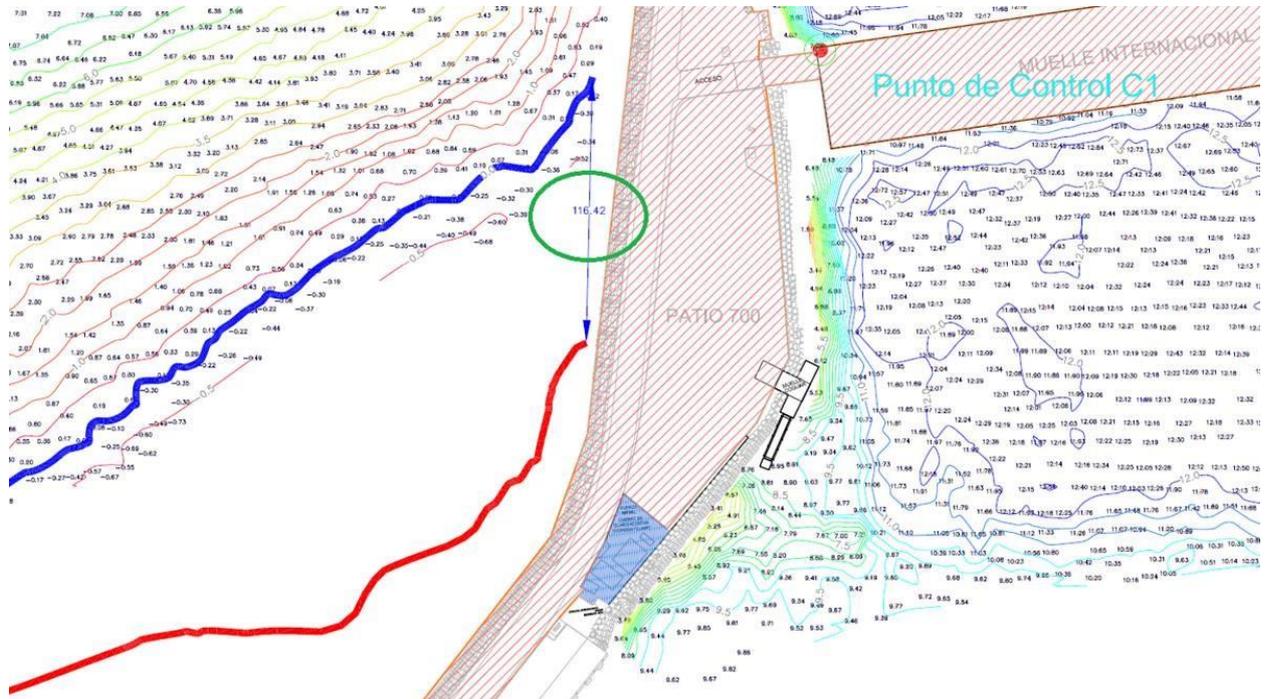


Figura 1-1 Batimetría de la playa El Murciélago, Manta. Comparación de líneas de costa 2007 y 2020. (Fuente: TPM, 2020)

Para el caso de la TPM (que es la actual empresa encargada de la Terminal Internacional) se desconoce el proceso de sedimentación sobre la zona colindante al rompeolas, la misma que puede ser estimada con la realización de un estudio de características oceanográficas y del proceso de sedimentación desarrollado hasta la actualidad, no obstante, para la obtención de estos resultados se requiere de una alta demanda computacional y una amplia base de datos, que pueden ser de sensores remotos que provean imágenes satelitales, y datos obtenidos en campo, de preferencia que brinden información de un registro histórico para un análisis más completo.

1.2 Justificación del problema

Manta es conocida como la “Capital Atunera del Mundo” siendo una ciudad que desarrolla varias actividades comerciales que contribuyen a la economía al país, donde la TPM juega un rol importante al importar grandes cantidades de trigo y exportar varias toneladas de conservas hacia otros países (Osejos et al., 2022). Debido a esto, los

procesos de sedimentación que ocurren hacia el oeste del puerto pueden afectar la operatividad con el transporte y acumulación de sedimentos hacia los muelles internacionales, reduciendo su profundidad actual de 13m (Terminal Portuario de Manta, 2020) limitando que buques de mayor calado y como tal mayor capacidad atraquen en el puerto. Es por esto por lo que es importante estudiar estos procesos para poder tomar acciones de prevención sin que se vean perjudicadas las actividades de carga y descarga en las condiciones óptimas que requiere el puerto para su funcionamiento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el cambio de línea de costa en la playa El Murciélagu durante el periodo 2006 y 2022 mediante imágenes satelitales y modelos computacionales como un estudio de línea base para el establecimiento de medidas de mitigación por parte de TPM.

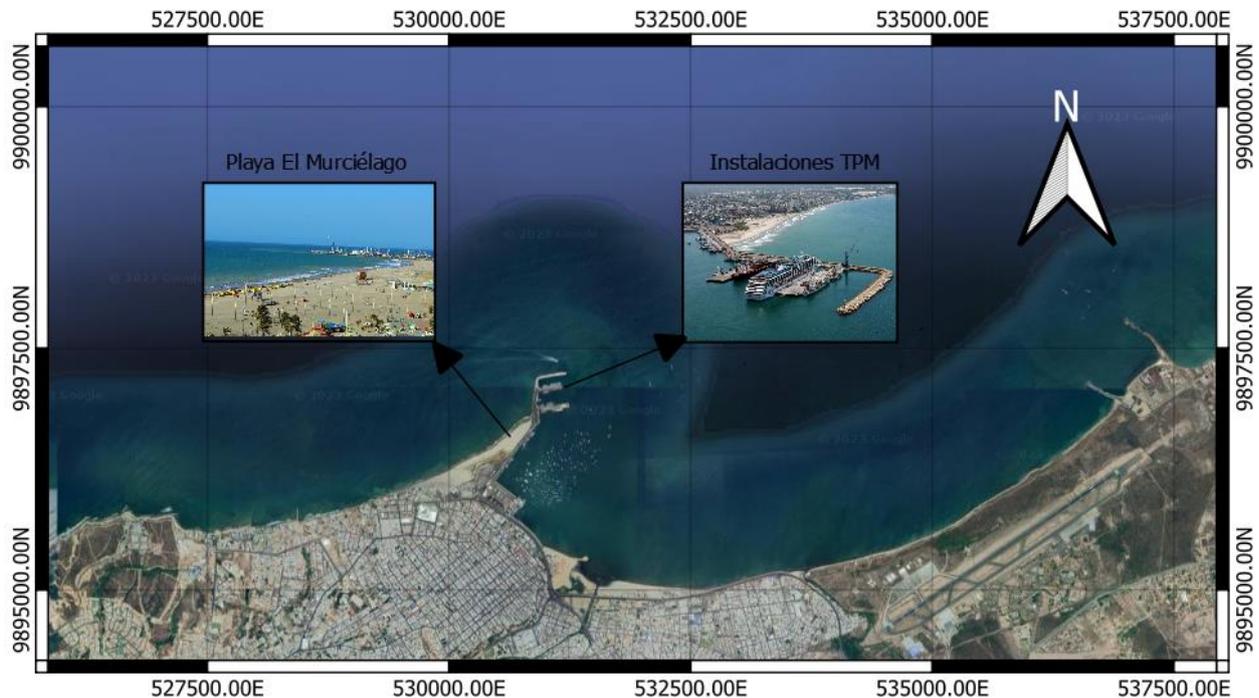
1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información bibliográfica e insumos para la realización del proyecto.
- Procesar imágenes satelitales (Landsat y Sentinel) a través de Google Earth Engine y DSAS para el estudio del cambio de la línea de costa
- Configurar los modelos computacionales MIKE 21 SW y LITPACK para la transformación del oleaje, procesos costeros y cambio de línea de costa.
- Calibrar y validar los resultados de LITPACK utilizando imágenes satelitales y datos de campo para la determinación del cambio de la línea de costa.
- Generar escenarios del cambio en la línea de costa hacia el año 2023 al 2033.

1.4 Descripción del área de estudio

El Puerto de Manta se encuentra ubicado entre las coordenadas -0.9313° S y -80.7220° O (Figura 1.2). Se considera como uno de los puertos más importantes del país por el gran volumen de cargas de granel sólido seco (51%), carga líquida (15%), granel sólido pesca (15%), carga al granel (11%) y carga contenerizada (8%) que moviliza, destacando que el 88% de la totalidad de carga corresponde a importaciones (Narváez et al., 2022). Posee una ubicación privilegiada, a tan solo 25 millas náuticas de la ruta internacional de tráfico y 600 millas náuticas del Canal de Panamá, permitiendo que cargas

latinoamericanas puedan cruzar hacia Norteamérica, Europa o Asia lo que lo convierte en referente para el comercio exterior (MTOPE y APM, 2018).



**Figura 1-2 Ubicación de la Terminal Portuaria de Manta, y la playa El Murciélago (oeste).
(Autoras, 2022)**

1.4.1 Climatología y meteorología

De acuerdo con los datos registrados para la ciudad de Manta, las temperaturas superficiales del mar (TSM) registran una tendencia estacional cuyos meses más cálidos son febrero y marzo con valores alrededor de 27.3°C, y los más fríos como agosto con un registro de 24.5°C. Para la temperatura del aire, en un año normal se encuentran entre 24°C -26°C, (CONSULSUA, 2017) presentando los máximos valores entre los meses de enero a mayo, alcanzando el mayor de 32.4°C, y los mínimos valores en los meses de julio, agosto y septiembre siendo el más bajo de 19.2°C en agosto (ENTRIX AMERICA, 2015). Respecto a las precipitaciones, existen dos épocas bien marcadas. La primera corresponde a la época húmeda comprendida entre los meses de enero a abril, con un pico de 107.5mm durante febrero, y la época seca entre los meses restantes con promedios mensuales por debajo de 10mm, lo que en el año 2015 sumó un acumulado de 393mm (ENTRIX AMERICA, 2015).

1.4.2 Corrientes

Mediciones frente al puerto de Manta han reportado durante la época húmeda valores máximos en la capa superficial de 0.93m/s en el estado de flujo, y 0.77 m/s durante el reflujó, ambas en direcciones hacia el noreste, destacando que el promedio se encuentra 0.43m/s y 0.19 m/s para flujo y reflujó, respectivamente (Vera et al., 2009).

1.4.3 Olas

Las olas que arriban al Ecuador son generadas por el viento lejos de la costa, por lo que se les denomina mar de leva o swell, caracterizándose por ser alargadas y con periodos mayores a 12 segundos, encontrándose así una altura de ola significativa entre 0.2 y 0.6m con densidad de eventos de 65.83% y una variación temporal entre los meses de diciembre a marzo excediendo los valores promedios (Allauca y Cardín, 1987). Según Vera et al., (2009), esta es la zona costera más sobresaliente respecto al norte del país, por lo que encuentra expuesta a las olas que ingresan directamente desde el Pacífico noroeste (NW), creando una gran dinámica y arrastre de sedimentos que la hacen propensa a la erosión o acreción, evento que sucede entre los meses de diciembre y marzo. En este sentido, para este estudio se reportaron alturas de ola promedio de 0.60m.

1.4.4 Sedimentología

De acuerdo con Soledispa (2009), 3 estaciones fueron ubicadas en mar frente a la playa El Murciélagó, es decir al lado oeste del espigón de TPM, el sedimento que prevalece es la arena, con un porcentaje entre 70.21 y 95.60% de la muestra, cuyo diámetro medio (D_{50}) se clasifica como muy fino en 2 estaciones, una ubicada al oeste de la playa en mención y otra justo al frente del rompeolas, a diferencia de la estación ubicada frente a El Murciélagó cuyo grano medio se clasifica como fino.

1.4.5 Vientos

Para la zona de estudio se ha registrado que los vientos predominantes arriban desde el suroeste (SW), encontrándose el menor valor en el mes de febrero con 2.4 m/s, mientras que los mayores valores se dan entre septiembre a noviembre con 3.8 m/s. (CONSULSUA, 2017).

1.5 Marco Teórico

1.5.1 Generación de oleaje

Las olas son generadas sobre el mar como el resultado de la transferencia de energía de la atmósfera sobre el agua, de modo que sus partículas realizan un movimiento circular, subiendo y bajando sobre la superficie (NOAA, 2022). El principal mecanismo motor de las olas es el viento, siendo la principal fuente de energía que es transmitida hacia el agua, la generación de las olas depende de la profundidad del agua y la longitud y duración del fetch, siendo este último el área en la cual el viento corre por encima del agua transmitiendo la energía) (Fagherazzi y Wiberg, 2009). Este evento de fetch ocurre en mar abierto, es decir, a largas distancias lejanas a la orilla, motivo por el que se denomina mar de fondo, mar tendida o mar de leva, mientras que por otro lado existe el mar de viento, el cual es originado por vientos locales a la playa, con la diferencia más notable que una longitud de onda menor (Perez, 2016).

1.5.2 Transporte de sedimentos

El transporte litoral también es conocido como deriva litoral, cual definición se refiere al transporte de sedimentos resultantes de la acción de diversos factores ambientales, siendo el oleaje el más importante (Giraldo y Lonin, 1997). La dirección y cantidad de la tasa de transporte varía según las características del tipo de sedimento, rango de marea, pendiente costera y la energía del oleaje incidente sobre la costa y su transformación, ya que el transporte de sedimentos es el resultado entre fuerzas hidrodinámicas y la respuesta morfológica de la playa (Aagaard, 2011). Existen 2 zonas donde se desarrolla el transporte de sedimentos, una zona “offshore” a la costa, es decir que está más alejada desde la orilla, cuando el transporte es en sentido transversal a la playa, en cambio el otro modo de transporte es sobre la zona “onshore”, es decir sobre la misma costa, pero en todo caso este transporte se caracteriza por un movimiento tanto transversal, así como longitudinal.

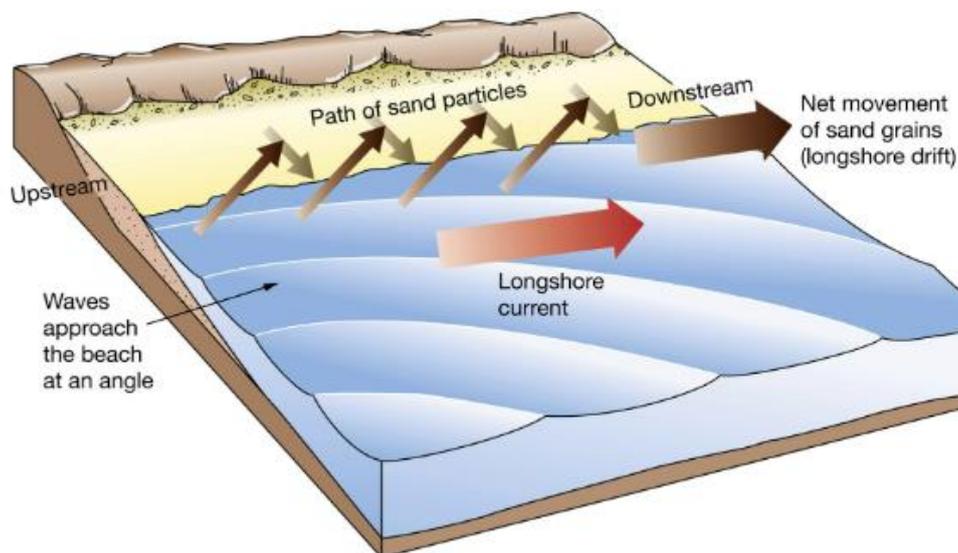


Figura 1-3 Movimiento del sedimento por incidencia oblicua del oleaje. (The coast, beaches and shoreline processes, 2011)

1.5.3 Estructuras costeras

Las estructuras costeras son obras e infraestructuras desarrolladas con el objetivo de aprovechar un espacio en la zona costera y protegerla de las condiciones marino-costeras. Estas infraestructuras se las utiliza para prevenir o mitigar erosión, inundaciones, elevación del nivel del mar, embate del oleaje, estabilizar el oleaje sobre canales de navegación (Salles y Silva, 2004). Y debido a que los eventos a proteger son distintos, las estructuras también son distintas, para ilustrar estos ejemplos se encuentra la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Tipos de estructuras costeras, objetivo y función. (Burcharth y Hughes, 2003)

Tipo de Estructura	Objetivo	Función Principal
Dique	Mitigar posibles inundaciones	División entre zonas bajas y línea de costa
Malecón de retención	Evitar el deslizamiento de arena hacia el mar	Refuerzo para el perfil costero.
Espigón	Proteger de posible erosión costera.	Mitigación de transporte longitudinal sobre la playa.
Dique sumergido	Proteger de posible erosión costera.	Demorar el transporte de sedimento mar adentro
Rompeolas no ligado a la playa	Proteger de posible erosión costera.	Reducción de altura de ola sobre la estructura o costa.
Rompeolas	Proteger zonas del embate del oleaje.	Dispersión de energía del oleaje.

1.5.4 Modelos numéricos

Los modelos numéricos computacionales ayudan a representar eventos o fenómenos naturales reales por medio del uso de ecuaciones matemáticas que se resuelven usando algoritmos. Para los modelos que estudian el oleaje existen 2 tipos:

Los modelos que promedian la fase (espectrales): Basados en la ecuación mild-slope, modelo bidimensional que asume una pendiente del suelo suave, con una linealidad en la descripción del oleaje, así es como lo describe en termino de tres características, altura, periodo y dirección. Con este modelo pueden ser simulados efectos de propagación como shoaling, difracción y refracción, disipación de energía debido a la fricción del fondo. Este modelo no simula efectos no lineales y puede tener un área relativamente grande (Modesto, 2009).

Modelos que resuelven la fase: Se basan en ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, no consideran disipación de energía, asumen la transformación de las olas en escala y longitud. Son limitados a áreas pequeñas, en orden de kilómetros (Guisado et al., 2010).

1.5.5 MIKE ZERO

Es un software que posee una interfaz gráfica que puede ser usada en Windows y que es desarrollada por DHI¹, con el cual se puede realizar una análisis previo o posterior al procesamiento de información de oleaje; presentación y visualización dentro de un ambiente dirigido a proyectos. Partiendo desde MIKE Zero se puede acceder a los siguientes módulos como MIKE 21SW o LITPACK (DHI, MIKE Zero, 2019).

1.5.5.1 MIKE 21 SW

Basado en el análisis espectral, se refiere a la descomposición de una señal de onda compleja, que es estudiada en partes más sencillas, es decir que la señal es dividida en segmentos cortos y estudiado como individuales (Escudero et al., 2016). MIKE 21 SW simula el crecimiento, decaimiento y transformación del oleaje sobre la playa e incluye dos tipos de formulaciones. (DHI, 2014)

¹ Firma internacional de consultoría de ingeniería y desarrollo de software para el agua.

Paramétrico direccional desacoplada: basada en la parametrización de la ecuación de conservación de acción de la onda. Los parámetros realizados son el cero y primer momento del espectro de la ola como variable dependiente (Holthuijsen et al., 1989).

Multiespectral: basado en ecuación de conservación de acción de la onda descrita.

1.5.5.2 LITPACK

Es un software basado en el concepto de MIKE Zero, desarrollado para simular transporte de sedimentos no cohesivos debido a influencia por olas y corriente litoral, también modela el desarrollo del perfil costero sobre playas casi uniformes (Khalifa et al., 2017). LITPACK se compone de diferentes módulos que tiene un enfoque determinista, es decir que permite ingresar consideraciones de diferentes factores que no están incluidos en formulaciones semi empíricas, como por ejemplo LITDRIFT y LITLINE detallados en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Módulos de LITPACK con su descripción. (DHI, 2014)

Nombre	Descripción
LITDRIFT	Corriente paralela a la costa y deriva litoral.
LITLINE	Evolución de la costa.

- **LITDRIFT**

Abarca la descripción de corrientes litorales y costeras sobre una playa de perfil uniforme. LITDRIFT se refiere también a un modelo numérico determinista el cual consiste en:
Modelo hidrodinámico: el presente modelo toma en consideración la propagación, asomeramiento, rompimiento de la ola, el cálculo de fuerzas generadoras de movimiento debió al gradiente de fricción por radiación, balance de momento de la configuración del oleaje en la dirección longitudinal y transversal a la playa. Modelo de transporte de sedimentos: se denomina al modelo cuando en un punto en especial (con respecto al valor local de la hidrodinámica y sedimentología), tienen un valor de ingreso de parámetro, como altura de ola, profundidad, periodo de ola, velocidad de corriente, entre otros. Figura 1-4.

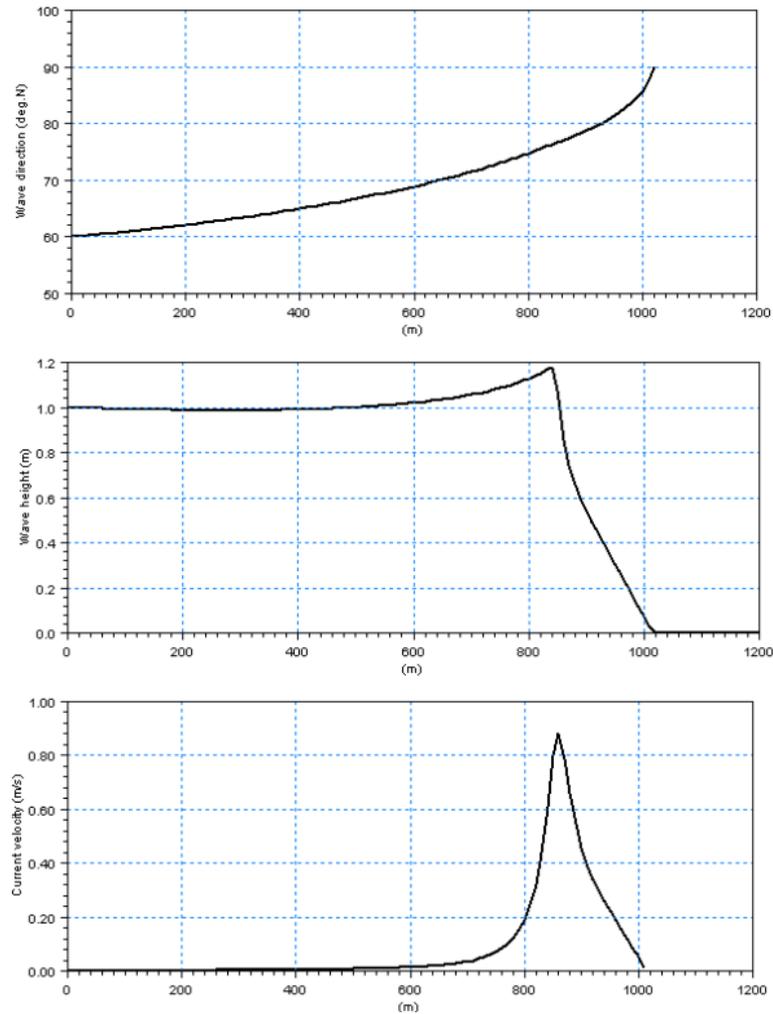


Figura 1-4 Resultados ploteados de LITDRIFT. Parámetros de la ola y corriente longshore a través del perfil. Dirección de la ola, altura y velocidad. (DHI, 2014)

- **LITLINE**

LITLINE calcula la posición de la línea de playa a partir del ingreso de datos de clima del oleaje como una serie de tiempo. El modelo se basa en la teoría lineal, donde se asume que la sección transversal del perfil se mantiene sin cambios durante la erosión o acreción, por este motivo la morfología de la costa es únicamente descrita por la posición de línea de costa. (DHI, 2014). Figura 1-5.

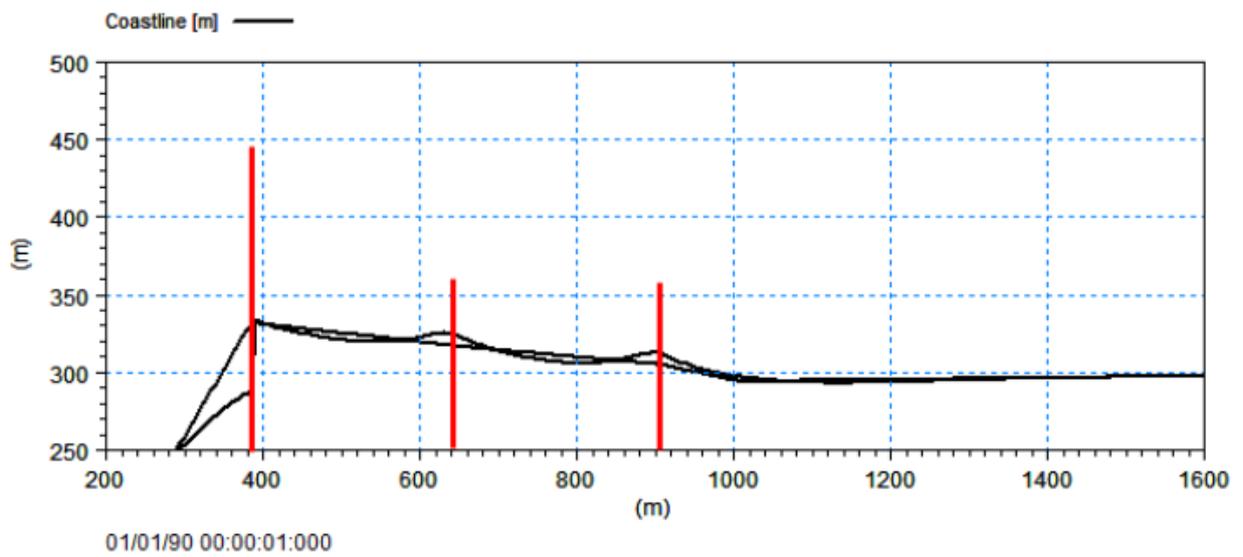


Figura 1-5 Evolución de línea de costa. Figure 2.16 (DHI, 2014)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este apartado se describen los pasos de este estudio, dividido en 5 etapas como se muestra en la Figura 2.1. La primera etapa consistió en la recopilación de diferentes tipos de información proveniente de diversas fuentes, como por ejemplo cartas náuticas y batimetrías procesadas con Sistemas de Información Geográfica (GIS), datos de oleaje tratados en MATLAB, entre otros. Luego, en la Etapa 2 se obtuvieron las imágenes satelitales que se discriminaron a través de algunos filtros hasta poder obtener las líneas de costa con ayuda de CoastSat, para en la Etapa 3 usar los archivos de los pasos anteriores como datos de entrada en el programa MIKE ZERO y sus diversos módulos, dando como resultado final las posiciones de la línea de costa que fueron analizadas en Microsoft Excel y luego calibradas y validadas, lo que permitió llegar hasta la etapa 5 en la generación de escenarios con la proyección de la línea de costa desde el 2023 hacia el 2033.

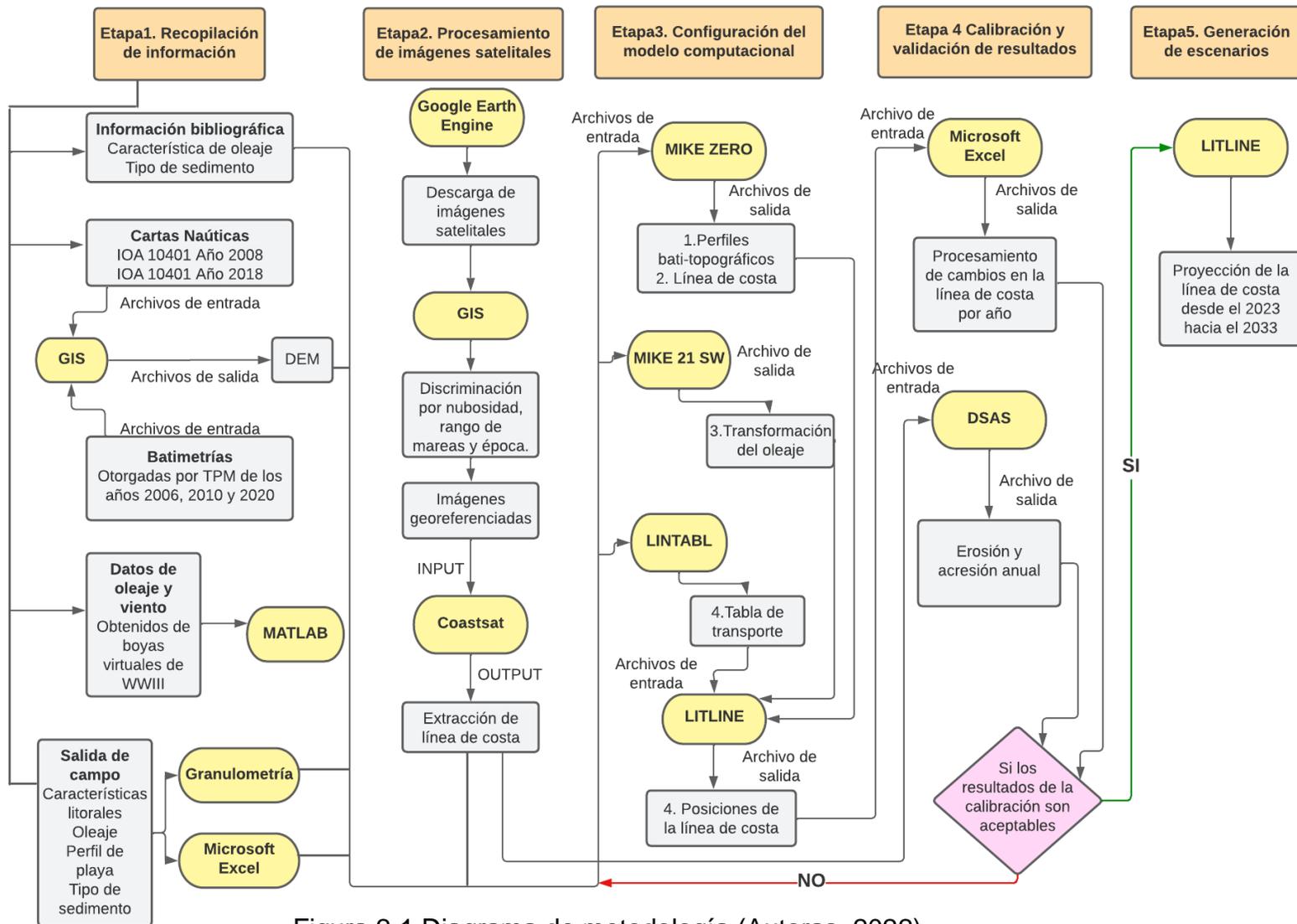


Figura 2-1 Diagrama de metodología (Autoras, 2022).

2.1 Etapa 1. Recopilación de información

Parte de la información base fue entregada por TPM, la misma que consistió en archivos de estudios de línea base sobre ciertas características del oleaje en la zona del puerto de Manta, así como las batimetrías realizadas en la zona del puerto.

2.1.1 Cartas Náuticas y batimetrías

Las cartas náuticas utilizadas en este proyecto son la IOA-10401 del INOCAR de la Bahía de Manta, del año 2008 y 2018. Adicional, fueron proporcionadas 3 batimetrías por el cliente de los años 2006, 2010 y 2020 con diferentes extensiones de la zona de estudio entre sí. Cabe recalcar que todas las batimetrías están referidas al MLWS, por lo que se aplicó un valor de corrección de +1.5m correspondiente a la estación del puerto de Manta, para que sean llevadas al MWL y así poder ser ingresadas en el modelo computacional.

2.1.2 Datos de oleaje y viento

Los datos de altura significativa, periodo pico y dirección de la ola, velocidad y dirección del viento fueron obtenidos del modelo WAVEWATCH III de una boya virtual ubicada en las coordenadas 0°S, 81° W y descargados a través del servidor OPENDAP mediante una rutina de MATLAB que se encuentra en el Apéndice B, para el periodo entre 2006 a 2018, que es el último año de disponibilidad de datos.

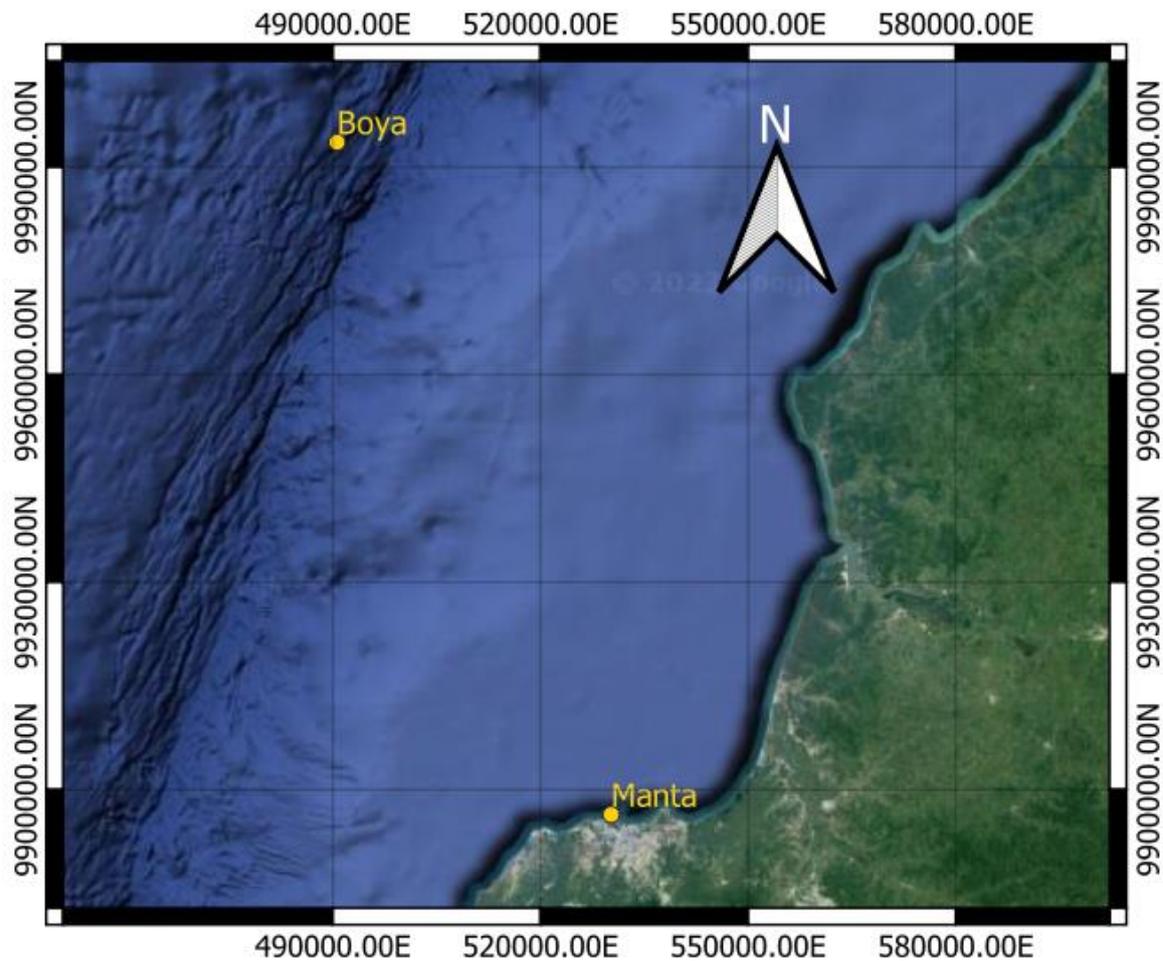


Figura 2-2 Ubicación de la boya virtual respecto a Manta. (Autoras, 2022)

2.1.3 Salida de campo

La salida de campo se realizó el 26 de octubre del 2022, donde se presentaron condiciones de sicigia y aguaje (Figura 2.3) definiéndose 2 estaciones en tierra (Figura 2.4) cuyas coordenadas se detallan en la Tabla 2.1, y una estación móvil en agua correspondiente a MSA de la Figura 3.5.

26/10/2022 Miércoles	
Hora (hh:mm)	Altura (metros)
03:56	2.79 P
10:13	0.16 B
16:23	2.71 P
22:26	0.34 B

Figura 2-3 Tabla de marea estación puerto de Manta para salida de campo (INOCAR, 2022).



Figura 2-4 Estaciones en la playa El Murciélago. (Autoras,2022)

Tabla 2.1 Coordenadas de las estaciones. (Autoras, 2022)

Estación	Latitud [m]	Longitud [m]
E1	9896693.04	530790.81
E2	9896376.39	530318.16

2.1.3.1 Características litorales

La toma de características litorales fue realizada desde las 11:00 hasta las 15:00 cada 40 minutos. Los datos medidos fueron los siguientes

- **Olas**
 - **Altura.** El observador se coloca sobre la línea de agua y estima la altura de la ola que se levanta sobre el nivel del agua.
 - **Periodo.** El observador inicia a contar el tiempo con el cronómetro en el momento que la cresta de una ola ha empezado a romper y lo detiene en cuando rompe la onceaba cresta, ese tiempo es dividido para 10 y se obtiene el periodo estimado por ola.
 - **Tipo.** Es una característica que mide el observador dependiendo de la forma en la cual rompen las olas (Figura 2.5).
 - **Ortogonal.** Se refiere al ángulo con respecto al norte con el cual arriba la ola sobre la playa, medido con una brújula.

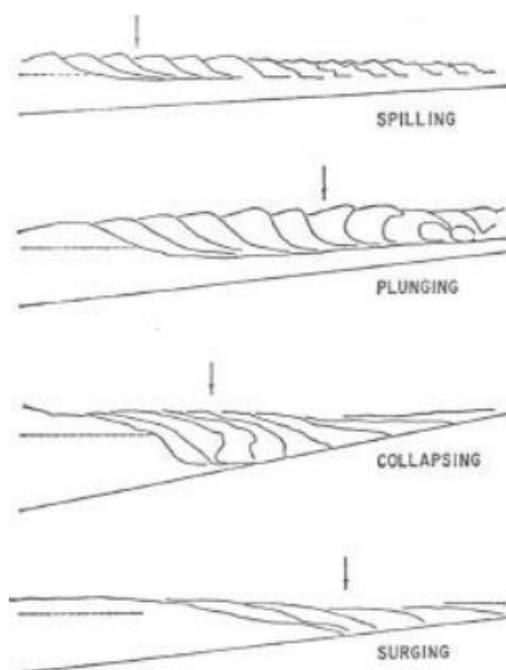


Figura 2-5 Tipo de rompiente del oleaje. (Galvin y Cyril, 1968).

- **Corriente litoral**

Para la corriente litoral se utilizó un derivador, que en este caso fue una botella de plástico llena un tercio de agua de mar. El derivador fue lanzado sobre la cresta rompiente más lejana posible y fue tomado el tiempo desde ese momento hasta que es empujado hacia la orilla y toca el fondo, además del tiempo, en este ejercicio es estimada la distancia sobre un eje ortogonal a la orilla, desde la línea de agua hasta el punto de lance y luego desde el punto final del derivador hacia el punto de origen sobre la orilla, siendo esta segunda distancia paralela a la costa. Con esta información se calcula la velocidad de la corriente litoral considerando la distancia diagonal recorrida por el derivador y el tiempo.

- **Ancho de zona de surf**

El ancho de la zona de surf fue medido desde la línea de agua estimando la distancia entre la rompiente más lejana y la posición del observador.

- **Viento**

- Velocidad, con ayuda de un anemómetro
- Dirección, es calculada utilizando una brújula para determinar la dirección desde donde viene el viento.

2.1.3.2 Perfil de playa

Esta característica fue medida en 13 posiciones distintas de la playa, utilizando dos técnicas diferentes. Con estos métodos se obtiene la distancia y altura entre 2 puntos sobre un mismo eje transversal a la playa, pudiendo calcular la pendiente.

- Nivel óptico. Consta de una regla móvil que se desplaza sobre el perfil a una distancia elegida en campo y un trípode estático que porta el instrumento del nivel óptico, el cual mide tres valores, nivel superior, medio e inferior. Con esta técnica se calcula distancia y cambio de altura a la posición de la regla.
- Andrade. Se trata de un instrumento con 2 reglas conectadas por una manguera de 3 metros de longitud abierta en sus 2 extremos y con agua. La altura en la posición de las reglas cambia debido a la pendiente, pero el agua se mantiene sobre el mismo nivel debido a que la atmósfera ejerce la misma presión sobre ambos lados siendo el cambio de altura la diferencia sobre el nivel de referencia de ambas reglas (Figura 2.6).



Figura 2-6 Uso del método Andrade para medir pendiente de la playa. (Autoras,2022)

2.1.3.3 Tipo de sedimento y análisis granulométrico

Se tomaron muestras de sedimento en fundas plásticas en la berma, pleamar, zona intermareal y línea de agua, como se muestra en la Figura 2.7 estimando al menos 1kg de material, en las estaciones 1 y 2 en tierra de la Figura 2.4, correspondientes al inicio de cada perfil y la estación de características litorales, con un total de 8 muestras.



Figura 2-7 Ubicaciones de las muestras de sedimento a lo largo de la playa. (Autoras,2022)

Para las estaciones en agua, el sedimento se recolectó con una draga Van Veen (Figura 2.8) desde una embarcación, recolectando al menos 500g de muestra.



Figura 2-8 Draga Van Veen abierta, lista para captar sedimento del fono. (OceanNet, 2022)

2.2 Etapa 2. Procesamiento de imágenes

2.2.1 Google Earth Engine - Descarga de imágenes satelitales.

Para realizar este paso se usó el software Anaconda, creando un espacio desde el “Command Prompt” (cmd) para utilizar el código de CoastSat² que facilitó la descarga de imágenes mediante Google Earth Engine. Así es como luego se abrió Anaconda y se corrió las líneas de código descritas en el enlace, que se encuentran en el Apéndice B.

² Enlace CoastSat: <https://github.com/kvos/CoastSat>

- Una vez en el ambiente de CoastSat, en las líneas de código se definió un perímetro con 4 puntos, uno por cada esquina, en coordenadas de grados sexagesimales, elegidos de forma horaria, y se agregó un quinto punto que es igual al primero.
- Se escogió el rango de fechas de la base de datos de imágenes que se desea considerar, en este caso fue desde 01 enero de 2003 hasta 31 de diciembre 2022.
- Se eligieron los satélites Landsat 7, 8 y 9; y Sentinel 2
- Se corrió el bloque de códigos para iniciar con la descarga de imágenes.

```
# region of interest (longitude, latitude)
polygon = [[[-80.764029, -0.937889],
            [-80.656323, -0.916114],
            [-80.654882, -0.949525],
            [-80.762051, -0.962268],
            [-80.764029, -0.937889]]]
# it's recommended to convert the polygon to the smallest rectangle (sides parallel to coordinate axes)
polygon = SDS_tools.smallest_rectangle(polygon)
# date range
dates = ['2003-01-01', '2022-10-12']
# satellite missions ['L5', 'L7', 'L8', 'L9', 'S2']
sat_list = ['S2', 'L7', 'L8', 'L9']
# choose Landsat collection 'C01' or 'C02'
collection = 'C02'
# name of the site
sitename = 'TPM'
# directory where the data will be stored
filepath = os.path.join(os.getcwd(), 'data')
# put all the inputs into a dictionary
inputs = {'polygon': polygon, 'dates': dates, 'sat_list': sat_list, 'sitename': sitename, 'filepath': filepath,
          'landsat_collection': collection}

# before downloading the images, check how many images are available for your inputs
SDS_download.check_images_available(inputs);
```

Figura 2-9 Código para ubicación del sitio y comando previo a la descarga de imágenes desde Google Earth Engine. (Autoras, 2022)

2.2.2 Sistemas de Información Geográfica (GIS)

2.2.2.1 Discriminación de imágenes

Estas imágenes fueron revisadas una a una utilizando Sistemas de Información Geográfica, primero haciendo una discriminación por porcentaje de nubosidad y segundo por de rango de marea. La amplitud del rango de marea fue definida a partir de la resolución del píxel (Landsat 15m y Sentinel 10m) y la pendiente de la playa, donde se establecieron los límites del rango de la altura de marea según la posición de la línea de agua de la playa, eligiendo así la mayor cantidad de imágenes que se encuentren dentro de ese intervalo. El tercer factor de discriminación fue la temporada, época seca y lluviosa, donde se tuvo preferencia por la seca.

2.2.2.2 Georreferenciación de imágenes

Para este paso se utilizó el software ArcMap ya que a pesar de que todas las imágenes corresponden al mismo polígono geográfico, hay un leve desplazamiento entre cada una, motivo por el que se eligió aquella con mejor resolución y donde se aprecie claramente cada detalle, y en las demás imágenes se escogieron al menos 2 puntos de control para realizar la georreferenciación de transformación “Zero” sobre la imagen de mejor resolución.

2.2.2.3 CoastSat: Extracción de línea de costa

Se utilizaron las líneas del código CoastSat, (Figura 2.10) en donde fueron procesadas las imágenes georreferenciadas y así son identificadas y extraídas como archivo shapefile (*.shp) las líneas de costa de las imágenes seleccionadas.

```
geomtype = 'lines' # choose 'points' or 'lines' for the layer geometry
gdf = SDS_tools.output_to_gdf(output, geomtype)
if gdf is None:
    raise Exception("output does not contain any mapped shorelines")
gdf.crs = {'init':'epsg:'+str(settings['output_epsg'])} # set layer projection
# save GEOJSON layer to file
gdf.to_file(os.path.join(inputs['filepath'], inputs['sitename'], '%s_output_%s.shp'%(sitename,geomtype)),
            driver='ESRI Shape', encoding='utf-8')
```

Figura 2-10 Código de extracción de líneas de costa en formato shapefile. (Autoras, 2022)

2.3 Etapa 3. Configuración del modelo computacional

Para la realización de esta etapa, se tomó como referencia metodologías empleadas por (Caiza y Nativí, 2019), (Andrade y Maquilón, 2019) y (Chuez y Ramirez, 2021).

2.3.1 MIKE ZERO

2.3.1.1 Perfiles bati-topográficos transversales.

Estos perfiles se refieren al procesamiento de las batimetrías que incluyen datos topográficos obtenidos en el paso 2.1.1. Para la creación de este archivo, se realizó una interpolación TIN en el software QGIS entre los datos de las batimetrías proporcionadas por el cliente y las cartas náuticas, para abarcar toda el área de estudio, y luego se crearon 4 capas vectoriales correspondientes a cada estación, que posteriormente se ingresaron en LITPACK. Cabe destacar que transversalmente entre cada punto del perfil

se configuró una distancia de 13m para obtención del dato de profundidad, y longitudinalmente entre cada perfil hay 100m de distancia.

2.3.1.2 Línea de costa

Para la creación de este archivo, en primer lugar, se estableció una línea base que permanece igual en el tiempo, con ayuda de las cartas náuticas en el software QGIS. Considerando que las variables que se ingresan son: posición de la playa, posición de la duna, altura de duna, número del perfil, profundidad del contorno offshore y la altura activa, y que las 2 primeras y la penúltima corresponden a distancias medidas desde la línea base, se calcularon con ayuda de QGIS, estableciendo puntos a lo largo de la costa para el cálculo de estas distancias cada 25m tomando como referencia la línea base. Para que el modelo pudiese entender mejor la posición y forma de la estructura, esta línea base se extendió incluso por las zonas donde en realidad corresponden a los muelles. En este proyecto en particular la posición de la playa equivale a la línea de CoastSat (que representa la línea de marea instantánea), incorporando datos de la carta náutica y las batimetrías otorgadas por TPM para un mejor resultado, ya que si se escogía una línea en tierra la diferencia iba a ser muy grande el error al no tener un mismo marco de referencia, al mismo tiempo que se deseaba aprovechar la línea extraída para los procesos de calibración y validación posteriores.

2.3.2 MIKE 21SW

Para la transformación del oleaje se empleó el módulo MIKE 21SW durante el periodo de análisis, siguiendo la metodología de los proyectos descritos al inicio de esta sección, con la información obtenida del portal WWIII luego de ser procesada. Cabe destacar que algunos archivos de entrada fueron aquellos diseñados por (Chuez y Ramirez, 2021) para la zona de estudio, cuyo resultado final es la climatología con variables como altura, periodo y dirección de ola.

2.3.3 LINTABL

En este submódulo del paquete LITPACK se configuraron variables como: dirección, altura y periodo de ola, nivel del mar y el transporte de sedimento con varios parámetros en base a los perfiles establecidos anteriormente.

2.3.4 LITLINE

Es el último módulo donde se corrieron los archivos de línea de costa, perfiles bati-topo, tabla de transporte y serie de tiempo de climatología, para obtener la posición de la línea de costa según cada fecha de la serie de tiempo. Este mismo módulo permite configurar la forma, posición y longitud de la estructura, que en este caso en particular se configuró como la unión de dos rompeolas.

2.4 Etapa 4. Calibración y validación de resultados

2.4.1 Validación de la línea de costa y perfiles

El primer paso para la validación de resultados corresponde a la figura de los perfiles y la línea de costa resultantes de la corrida en LITLINE, en donde se observó si los perfiles transversales se encontraban distantes paralelamente entre sí, y a su vez perpendiculares a la línea de costa, con una posición de la estructura de forma coherente y similar a la realidad, caso contrario, se descartaba aquella prueba, como se muestra en la Figura 2.11.

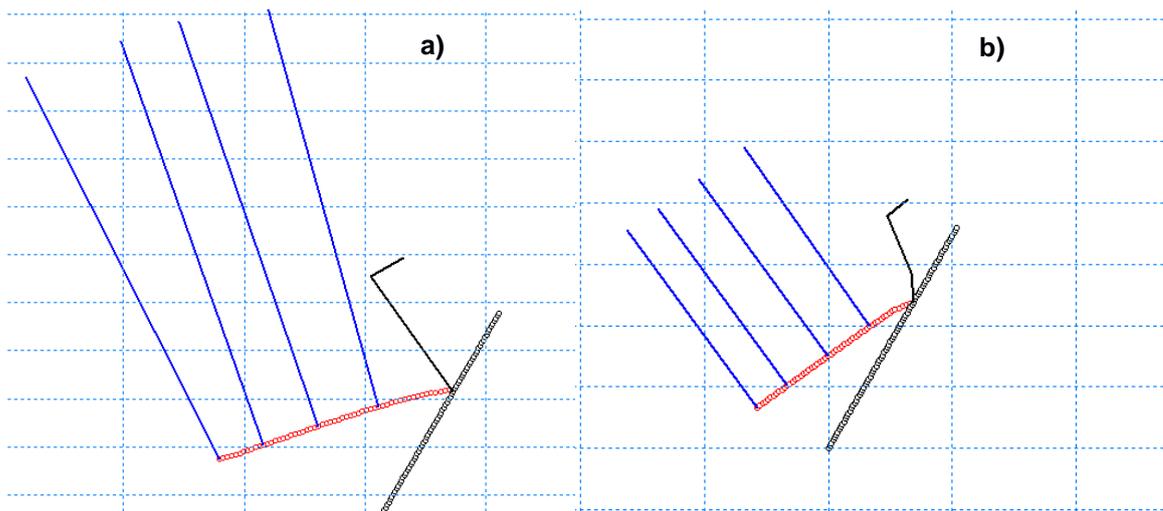


Figura 2-11 Perfiles que a). No cumple la validación. b), Sí cumple la validación.

(Autoras,2022)

Una vez cumplido este paso, para procesar y entender de mejor manera los resultados de LITLINE, el archivo de salida que contiene la posición de la línea de costa de acuerdo con las fechas de la climatología se procesó (Microsoft Excel), en donde se filtraron las posiciones de la línea de costa del inicio de cada año, para graficarse, visualizar y medir

el cambio entre cada una de ellas. Luego, se tomó la línea de costa inicial y final de todo el periodo de análisis, incluyendo la resta entre ambas para ser dividido entre el número de años, de esta manera se pudo conocer el valor del cambio de la línea de costa en cada una de las posiciones, representándose con valores tanto positivos como negativos. Estos valores de sedimentación y erosión, respectivamente, fueron comparados con los resultados de DSAS, y con el valor de avance de línea de costa provisto por TPM, para conocer qué tanta diferencia había entre ellos y si era aceptable o no. En caso de que no fuera aceptable, se volvía a la etapa 3 de la configuración del modelo para realizar los ajustes necesarios al archivo requerido, pudiendo ser la línea de costa, perfiles o tabla de transporte.

2.4.2 Validación del avance de línea de costa en DSAS

Después de haber extraído las líneas de costa de las imágenes que hayan pasado los filtros, fueron recortadas las partes que no son de mayor interés y podrían ser un resultado que genere error al análisis, como las secciones propias del puerto de Manta y Puerto Atún, y en este caso además fueron las regiones sobre el espigón que hay en la desembocadura del río Manta y las contiguas. Para la aplicación de DSAS cabe recordar que las zonas de acantilados también pueden mostrar resultados de error debido a fallas propias de la herramienta.

Consecuentemente, las secciones de una línea del mismo año fueron unidas entre sí para hacer un solo elemento por cada una de las líneas de costa, y luego se realizó un solo archivo shapefile (*.shp) que las contenga a todas como elementos individuales. Posteriormente, fue creada en una capa aparte una línea base que siga la forma de las líneas y se encuentre a 50m tierra adentro. En adición, se crearon geodatabases por cada uno de estos archivos y se instaló el complemento DSAS aplicable para ArcMap 10.5. Al archivo de líneas desde la geodatabase, con la herramienta en DSAS de Shoreline, Attribute Automator se le añadieron los campos de fecha y Uncertainty Field Name, que corresponde a la fecha en formato DD/MM/AAAA y en el segundo campo añadido se le escribió 10, que es la más alta resolución entre ambos satélites de las imágenes donde fueron extraídas las líneas.

Posteriormente, se creó el transecto definiendo cual será la línea base y a qué distancia se encuentra la línea más alejada (250m), de qué lado se encuentra la tierra, cada cuando serán definidos los transectos (100m) ortogonales a la línea base de modo que

entre ellos no se intercepten. Una vez hecho el transecto se calculó desde DSAS el WLR, que se refiere a la media ponderada del desplazamiento de los metros por años y se eligió que los transectos sean coloreados según esta propiedad. Al tener los resultados de cambio de línea de costa con DSAS y LITLINE, se llevaron ambos datos a Microsoft Excel donde se obtuvo el cambio de posiciones de la línea de costa, cuyas distancias se midieron desde la línea base, siendo el último paso de validación y calibración el error medio relativo entre ambas líneas, considerándose a la línea de costa de DSAS como el dato observado y al resultado de LITLINE el dato modelado.

2.5 Etapa 5. Generación de escenarios

Esta etapa se realizó con la intención de saber cuál sería la posible posición de la línea de costa en 2033 con ayuda del modelo computacional LITLINE, siguiendo los mismos pasos de la Etapa 3. Se tomó como archivo de entrada la última línea de costa extraída de DSAS y se complementó la información con la carta náutica del 2018 y la batimetría del 2020 provista por el cliente, datos que sirvieron también para la creación de los perfiles bati-topo.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se detallan los resultados correspondientes a las secciones anteriormente descritas en la metodología, con un breve análisis, en algunos casos del resultado en sí, y en otros realizando una comparación con datos obtenidos por otros métodos, los que permiten validar y calibrar de mejor manera los valores obtenidos.

Se destaca que los hallazgos del análisis de las cartas náuticas evidencian un proceso erosivo-sedimentario de oeste a este, desde el malecón de la playa hasta el espigón de TPM, así como valores de avance de la línea de costa máximos de 7.9m/año para DSAS, y 9.8m/año para el modelo computacional, mientras que la proyección indicó un 12.5m/año con la misma tendencia de erosión-sedimentación que mostraron las cartas náuticas.

3.1 Etapa 1. Recopilación de información

3.1.1 Cartas náuticas y batimétricas

TPM realizó levantamientos hidrográficos en los años 2006 y 2020 (Apéndice E) de las zonas de los puertos y en Playa Murciélago, específicamente al oeste del espigón. Esta información fue complementada con las cartas náuticas 2008 y 2018 (IOA 10401, digitalizadas) del INOCAR (Apéndice F). Con toda esta información y utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográficas (GIS), se generó un DEM para la configuración de los perfiles que fueron ingresados en el modelo computacional, como se observa en la Figura 3.1

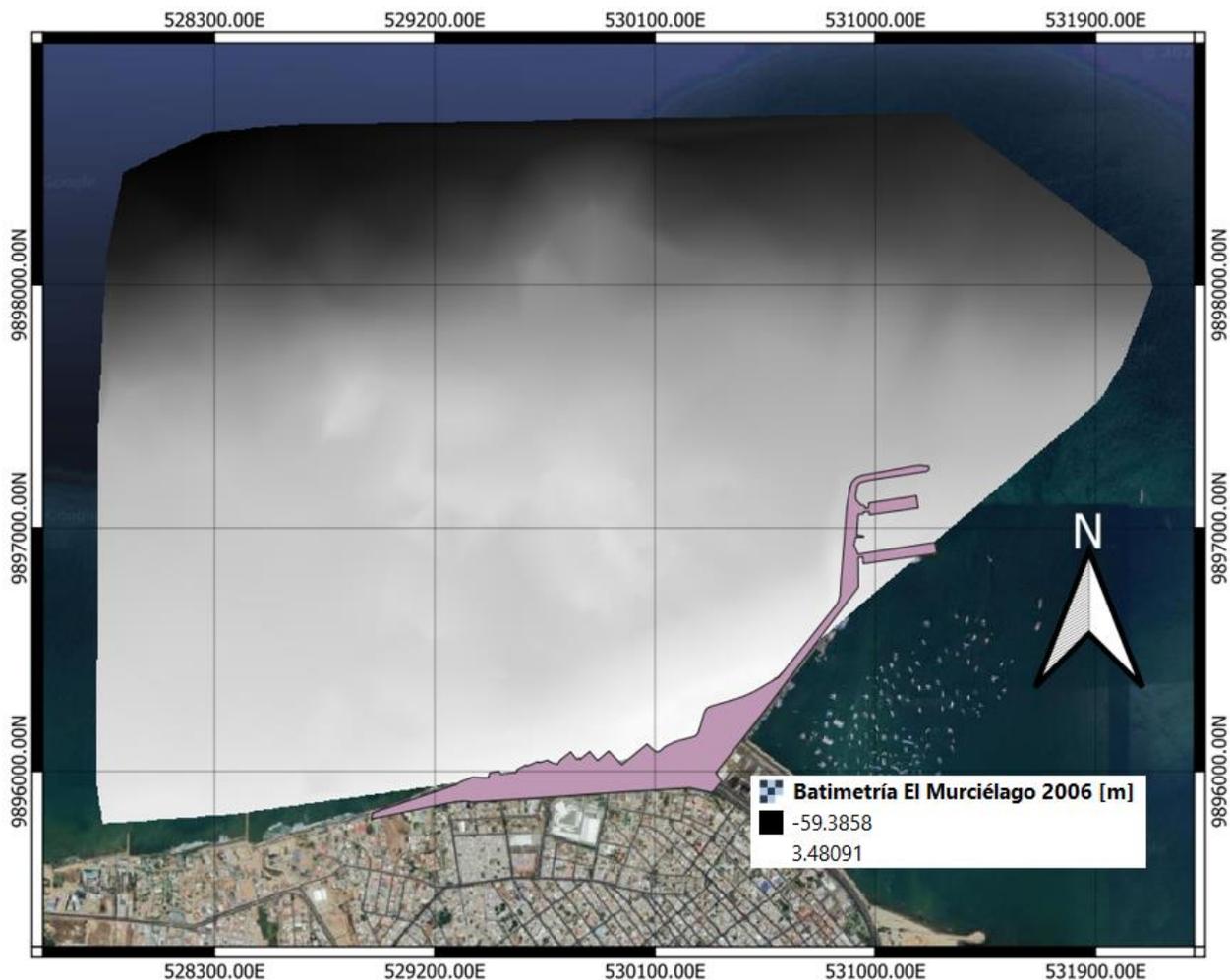


Figura 3-1 DEM generado a partir de puntos digitalizados de la Carta Náutica 2008 y datos batimétricos proporcionada por TPM (Autoras, 2022)

El análisis de cartas náuticas muestra que existe una convergencia de los veriles en la zona del rompeolas de la terminal, que indica cómo estos niveles de profundidad se han ido acoplado a la estructura. También se observa que los veriles de menor profundidad, (menores a -5m), están creciendo (sedimentación), caso contrario a lo que ocurre para los veriles mayores a -10m (transporte hacia la costa). Adicional, es importante resaltar que los bancos de arena (sedimentos) que se observan en la Carta Náutica 2008 frente a la playa el Murciélago, se redistribuyen (morfodinámica) de acuerdo con la información de la Carta Náutica 2018. En la Figura 3.2 se observa el cambio en la forma y posición, así como la aparición de nuevos bajos entre los veriles de -2m y -5m de la carta náutica 2018 (líneas naranjas Carta Náutica 2008 y líneas celestes Carta Náutica 2018).

Adicionalmente, se observa que existe erosión en la parte del malecón (zona oeste, polígono rojo), lo que demuestra un retroceso de la línea de costa, en comparación a la zona cerca del espigón (polígono verde), donde se visualiza acumulación de sedimento y avance en la línea de costa desde el 2008 al 2018. Realizando el cálculo de estas áreas, el total para la erosión corresponde a 20.600 m², mientras que para la sedimentación es 38.400 m², por lo que se podría inferir que alrededor del 54% de la arena sedimentada cerca del espigón corresponde al material erosionado.

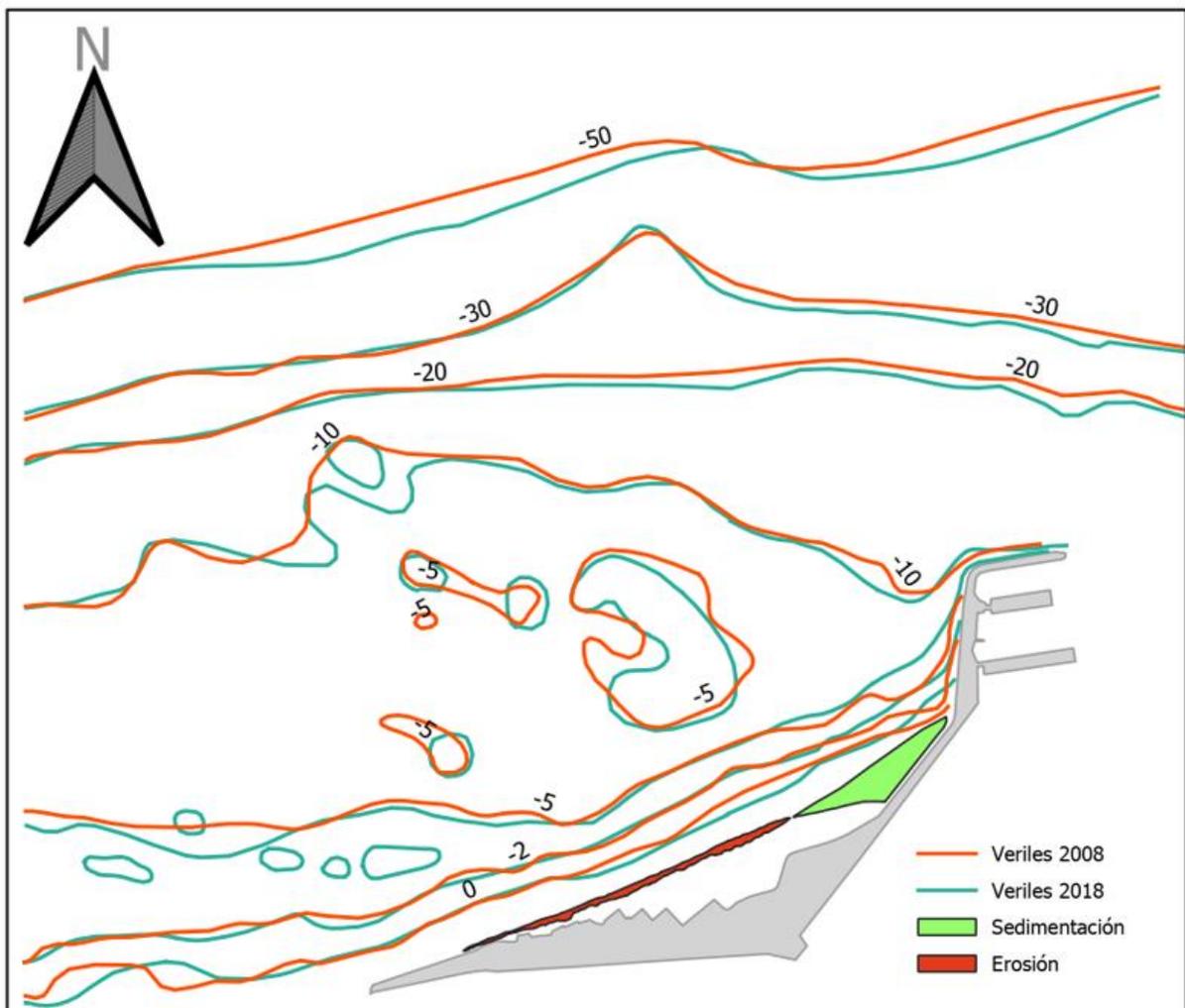


Figura 3-2 Proceso morfodinámico observado a través de las Cartas Náuticas 2008 y 2018. (Autoras, 2022)

3.1.2 Datos de oleaje y viento

Los datos obtenidos del portal WWIII mostraron un rango de altura de ola entre 1m y 3m, como se muestra en la Figura 3.3 con dirección predominante del suroeste (SW),

destacando que esta boya se encuentra en aguas profundas y al llegar a las costas (aguas someras) las olas pierden energía debido a la fricción de fondo marino y otros efectos como refracción. Respecto al viento, la dirección predominante es del suroeste (SW) con un rango entre 2 y 10 m/s, como se indica en la Figura 3.4

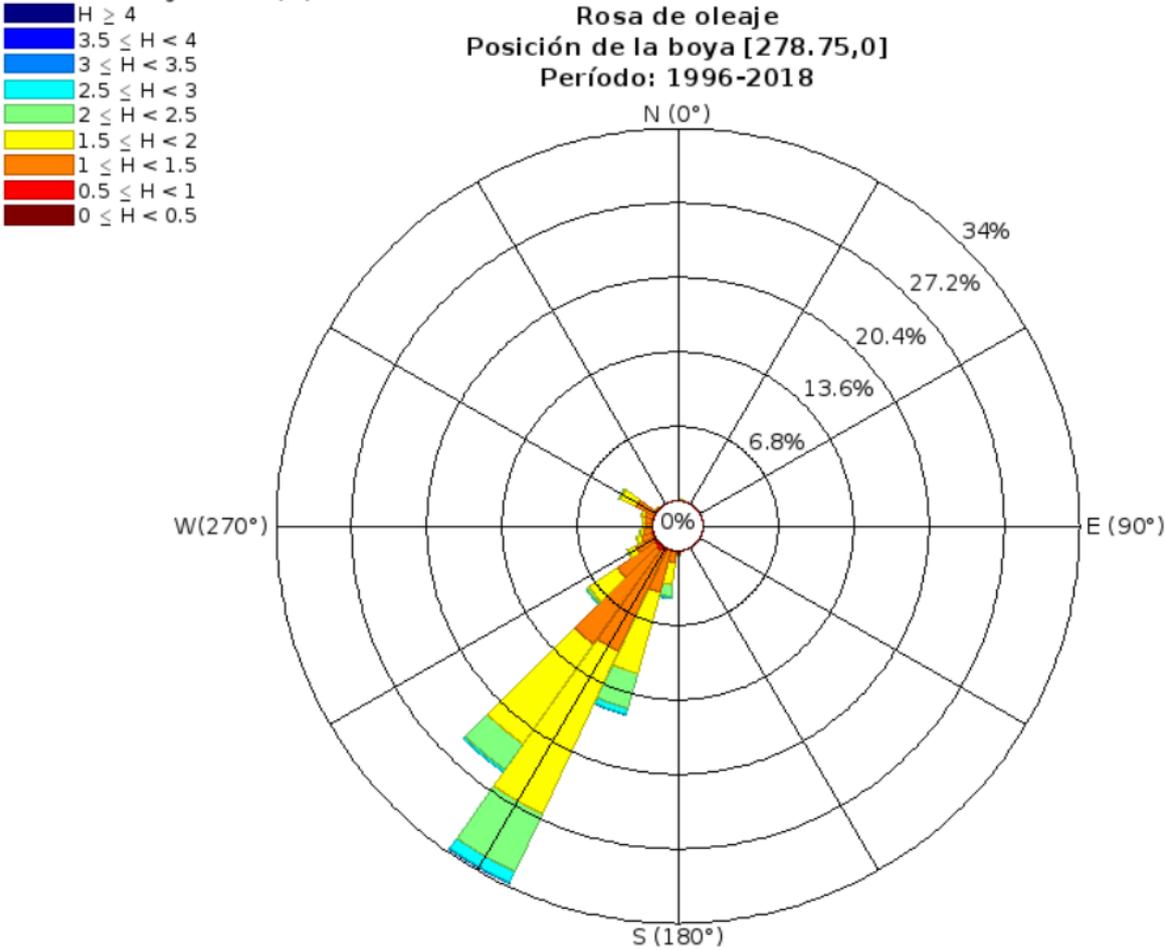


Figura 3-3 Rosa de oleaje generada a partir de datos de la boya de WWIII (Autoras, 2022)

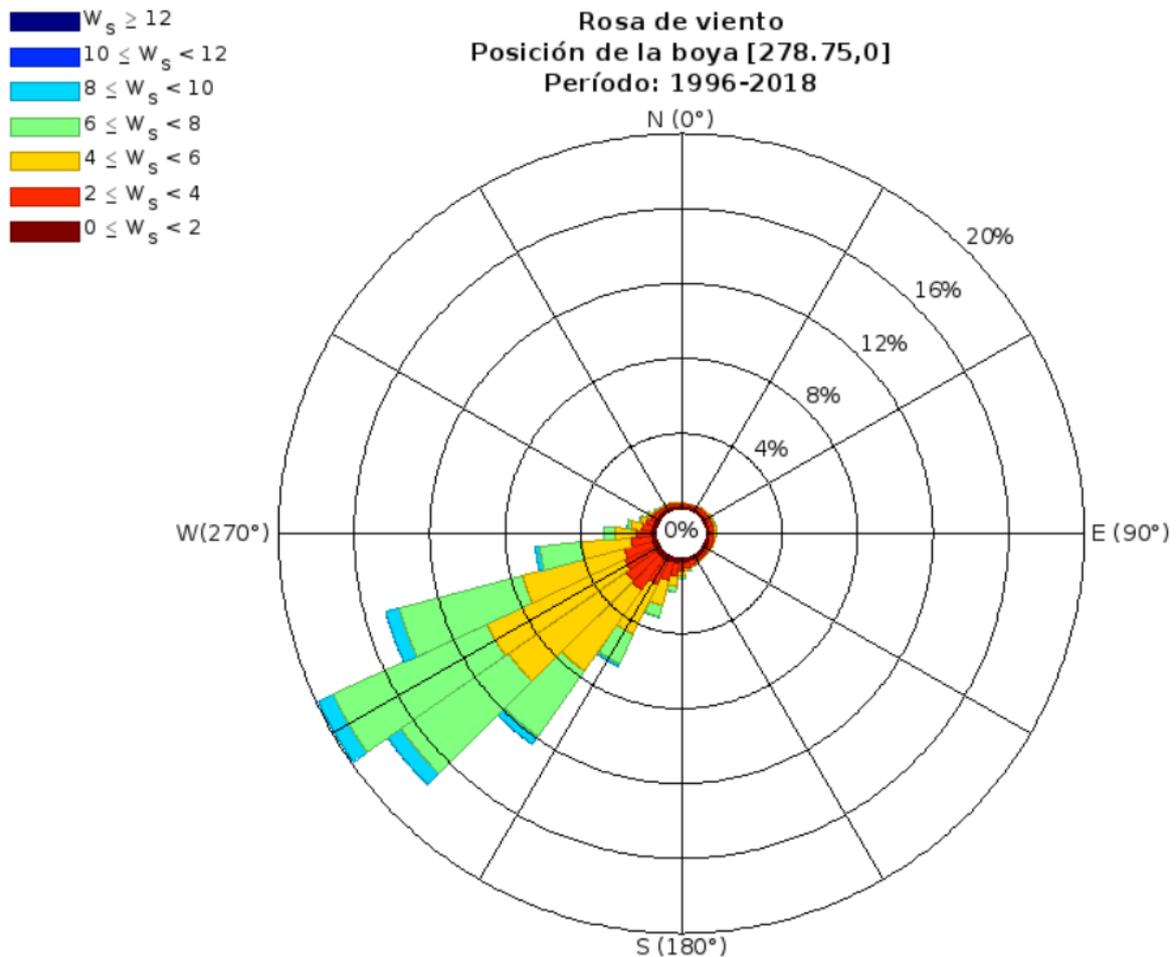


Figura 3-4 Rosa de vientos generada a partir de datos de la boya de WWIII (Autoras, 2022)

3.1.3 Salida de campo

Las mediciones en campo fueron de vital importancia, definiendo así 6 puntos de muestreo para cada estación de Perfil de Playa, donde se implementaron los métodos nivel óptico y Andrade para PP1 y PP2, respectivamente, y tomando las muestras de sedimento en las posiciones de la playa concorde a lo descrito en la Figura 2.7, al mismo tiempo que en las estaciones CL1 y CL2 se tomaron características litorales, sin embargo, por la cercanía de la posición de CL1 con el espigón los datos se vieron afectados por lo que no fueron considerados. Así mismo, las estaciones MS brindaron datos interesantes que se describen posteriormente.

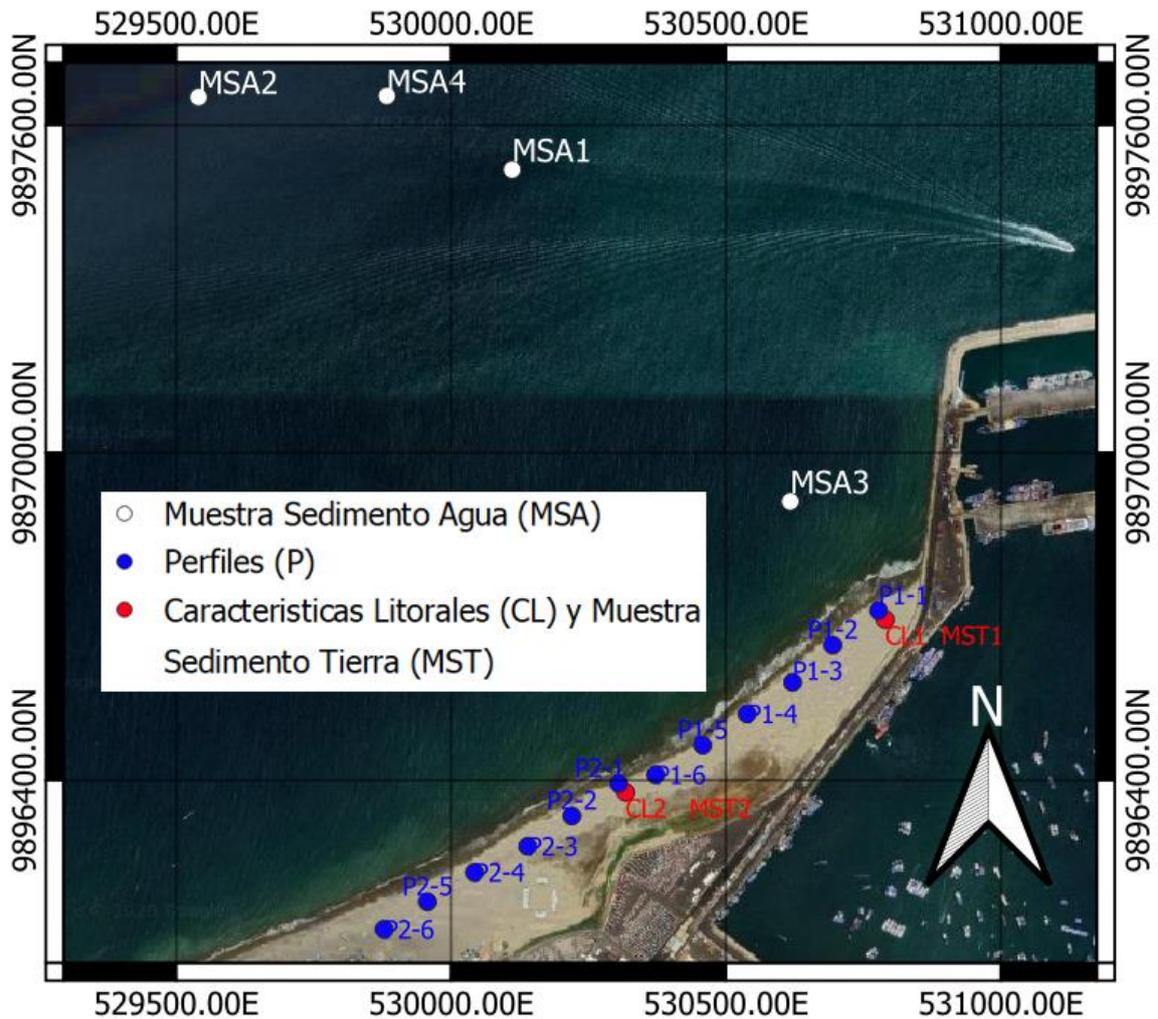


Figura 3-5 Ubicación de las estaciones para la toma de muestra de sedimentos, perfiles de playa y características litorales. (Autoras,2022)

3.1.3.1 Características litorales

Los resultados más representativos de la playa El Murciélago fueron reflejados en la CL2, ya que el oleaje de la CL1, al encontrarse muy cercana al espigón del puerto, se ve afectado por procesos de reflexión del oleaje mostrando resultados irregulares comparados con otros estudios de campo. Por este motivo, solo le consideraron los resultados de CL 2 (Tabla 3.1), para la configuración del modelo computacional. Los datos tomados en campo pueden ser observados en el Apéndice C.

Tabla 3.1 Resultados de parámetros oceanográficos medidos en campo. (Autoras,2022)

Parámetro	Máximo	Mínimo	Promedio	Unidad
Altura de ola	0.61	0.42	0.50	m
Periodo de ola	12.00	14.40	13.18	s
Ortogonal	336	300	316	Grados/N
Velocidad de corriente litoral	0.48	0.02	0.23	m/s
Ancho de zona de surf	25.85	18.80	22.16	m
Velocidad del viento	7.80	2.20	5.84	m/s
Dirección del viento	93	68	87	Grados/N

A partir de la Tabla 3.1 se pudo identificar a la playa según los siguientes parámetros, mencionados en las Tablas 3.2 y 3.3

Tabla 3.2 Tipo de oleaje mediante el número de Iribarren. (Autoras,2022)

L0 [m]	271.76
Hb[m]	0.495
Pendiente	0.031
N Iribarren	0.730
Criterio	Plunging

Tabla 3.3 Estado morfodinámico de la playa mediante parámetro de Dean. (Autoras,2022)

Ws [m/s]	0.020
Hb [m]	0.495
T [s]	13.185
Dean	1.800
Criterio	Intermedia

3.1.3.2 Perfil de playa

Durante la bajamar (10h15) se pudo medir secciones de mayor longitud de los perfiles de playa, en comparación con datos levantados durante la pleamar (14h15). Por este motivo al elegir el dato que pueda definir la pendiente de la playa para la configuración del modelo computacional y selección del rango de marea de las imágenes satelitales, se consideraron los tres primeros perfiles de cada estación.

Tabla 3.4 Resultado de toma de perfiles. (Autoras,2022)

Nombre de estación	Latitud [m]	Longitud [m]	Hora de toma de dato	Valor de pendiente
PP 1-1	530779	9896709	10:50	0.0312
PP 1-2	530695	9896646	11:59	0.0330
PP 1-3	530622	9896578	12:30	0.0359
PP 1-4	530540	9896520	13:04	0.0318
PP 1-5	530459	9896463	13:32	0.0835
PP 1-6	530373	9896409	14:00	0.0532
PP 1-7	530283	9896369	14:21	0.0529
PP 2-1	530305	9896393	11:06	0.0366
PP 2-2	530220	9896333	11:43	0.0353
PP 2-3	530140	9896277	12:39	0.0465
PP 2-4	530043	9896229	13:26	0.0518
PP 2-5	529957	9896175	13:53	0.0290
PP 2-6	529878	9896125	14:14	0.0208

3.1.3.3 Tipo de sedimento y análisis granulométrico

De la granulometría de las estaciones se obtuvo el D_{50} , que representa el diámetro medio, siendo ligeramente mayor en la estación MST2 en comparación a la estación MST1. Así mismo, se calculó la desviación estándar como la raíz del cociente entre D_{84} y D_{16} , dato que corresponde al Geometrical Spreading en la configuración del modelo computacional. El valor del D_{50} corresponde a una arena entre media y fina, y para el ingreso en el modelo se consideró el valor promedio de 0.2 mm para todos los perfiles, mientras que en el Geometrical Spreading también se tomó el valor promedio de 1.277.

Tabla 3.5 Resultado de granulometría Estación1. (Autoras,2022)

E1	D_{50} [mm]	D_{84} [mm]	D_{16} [mm]	Desviación estándar
Berma	0.183	0.294	0.153	1.389
Pleamar	0.184	0.236	0.154	1.238
Zona intermareal	0.199	0.242	0.159	1.234
Línea de agua	0.159	0.231	0.148	1.250
Promedio	0.181	0.251	0.153	1.277

Tabla 3.6 Resultado de granulometría Estación 2. (Autoras,2022)

E2	D₅₀ [mm]	D₈₄ [mm]	D₁₆ [mm]	Desviación estándar
Berma	0.215	0.274	0.163	1.298
Pleamar	0.223	0.260	0.164	1.257
Zona Intermareal	0.197	0.249	0.156	1.264
Línea de agua	0.166	0.215	0.129	1.290
Promedio	0.200	0.250	0.153	1.277

Las estaciones de muestra de sedimento en agua (MSA) se establecieron en las coordenadas que se muestran en la Tabla 3.7 obteniendo sus respectivos D_{50} . Los resultados demuestran que para las estaciones MSA1, MSA3 y MSA4 que se encuentran más cercanas al espigón, como se muestra en la Figura 3.6, el sedimento se clasifica como una arena fina, mientras que para la estación MSA2 que está ligeramente más lejos, el tipo de sedimento es grava, como se puede observar en la Figura 3.7, marcando una gran diferencia con los diámetros del mismo grupo e incluso los hallados en las estaciones de MST.

Tabla 3.7 Descripción de muestras de sedimento tomadas en agua. (Autoras,2022)

Muestra de Sedimento Agua (MSA)	Latitud [m]	Longitud[m]	D₅₀ [mm]	Tipo de sedimento
MSA1	9897517.42	530111.83	0.194	Arena fina
MSA2	9897650.41	529541.08	2.454	Grava fina
MSA3	9896909.45	530617.94	0.119	Arena fina
MSA4	9897652.56	529883.65	0.117	Arena fina

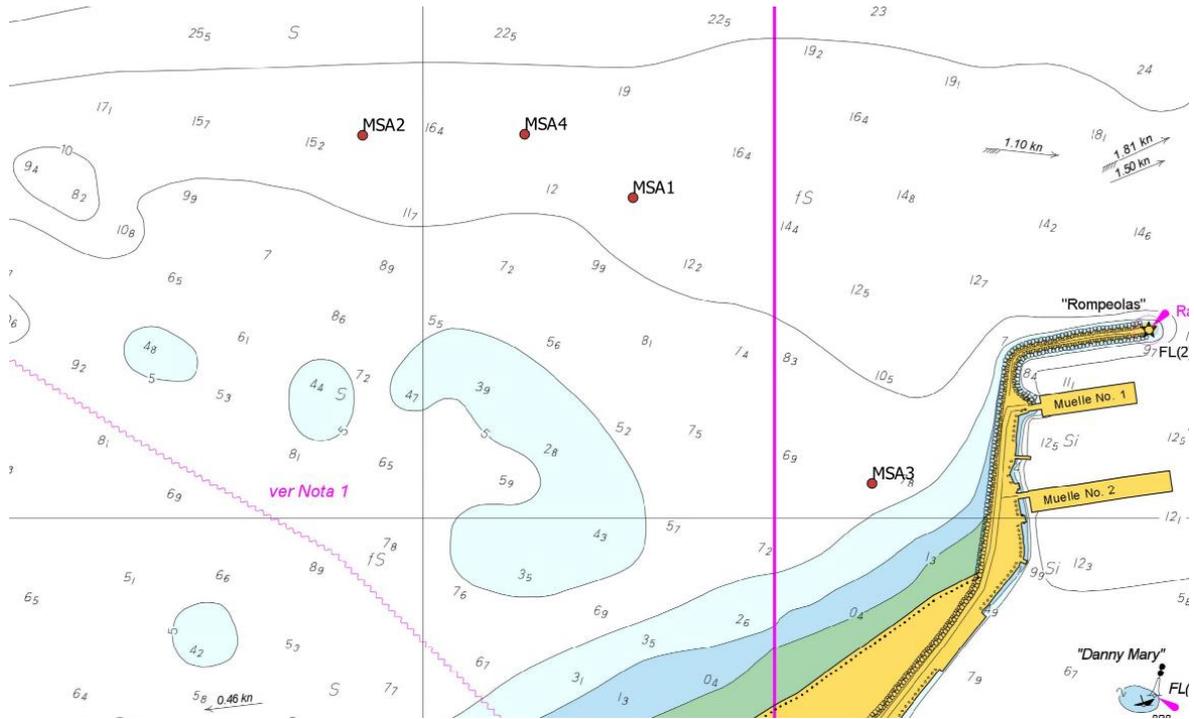


Figura 3-6 Ubicación de las estaciones MSA con respecto al espigón de TPM.
(Autoras,2022)



Figura 3-7 Sedimento de la estación MSA2 antes del análisis granulométrico.
(Autoras,2022)

3.2 Etapa 2. Procesamiento de imágenes satelitales

Al iniciar con la descarga de imágenes se consiguieron 500 imágenes entre los satélites de Landsat 7, 8, 9 y Sentinel 2, luego de esto 56 fueron las que contaban con el rango de nivel de nubosidad mínimo, 15 las que cumplían con el rango de marea, que para las imágenes de Landsat fue entre 2.03 a 1.56m y las de Sentinel entre 2.03 y 1.72m, y finalmente 6 fueron las que se encontraban en los meses donde predomina la temporada seca, es decir, entre mayo y octubre. De esta forma las imágenes a las cuales se obtuvieron las líneas de costa fueron de las presentadas en la tabla 3.8, con sus respectivas características, las mismas que son representadas en la figura 3.9 haciendo énfasis de las diferencias en la zona más cercana al espigón.



Figura 3-8 Resultado del procesamiento de imágenes satelitales. (Autoras,2022)

Tabla 3.8 Descripción de parámetros de imágenes satelitales. (Autoras,2022)

Fecha [AAAA-MM-DD]	Satélite	Tamaño pixel [m]	Rango de marea [m]	Marea instantánea [m]
2003-05-08	Landsat 7	15	2.03 – 1.56	1.83
2013-09-16	Landsat 8	15	2.03 – 1.56	1.73
2014-08-02	Landsat 8	15	2.03 – 1.56	1.61
2015-08-21	Landsat 8	15	2.03 – 1.56	1.63
2021-10-16	Sentinel 2	10	2.03 – 1.72	1.87

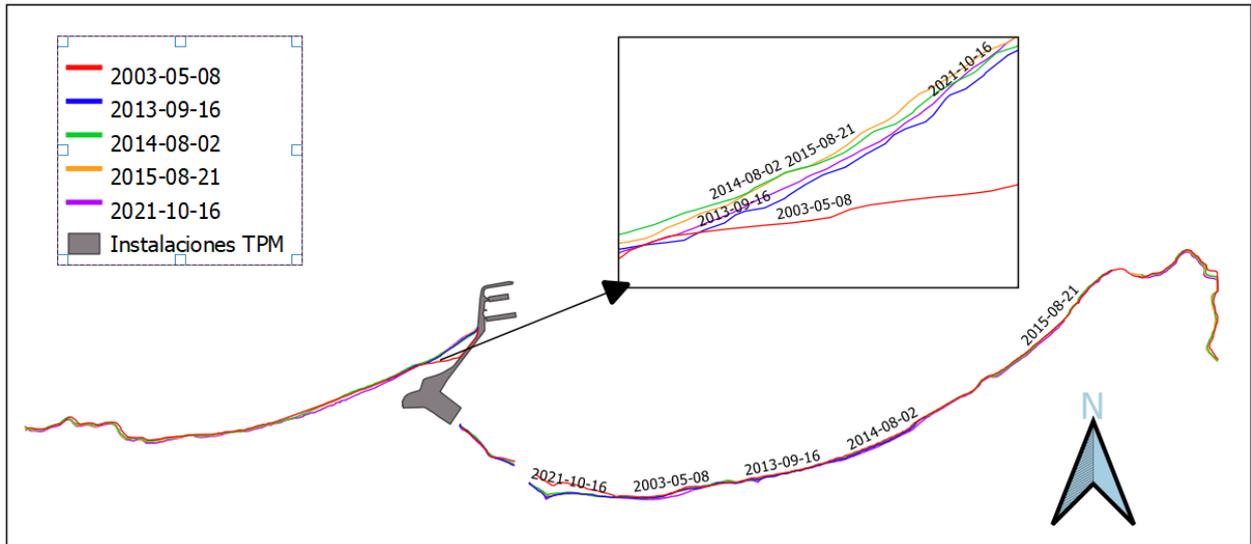


Figura 3-9 Líneas de costa extraídas por CoastSat. (Autoras,2022)

3.3 Etapa 3. Configuración del modelo

3.3.1 MIKE ZERO

3.3.1.1 Perfiles bati-topográficos

Luego de varias pruebas e interpolaciones (TIN), el mejor resultado para los perfiles se obtuvo a partir de la batimetría del 2006, y complementando las profundidades con los datos de la Carta Náutica del 2008 (IOA 10401) para aquellas zonas que no incluían la batimetría, o a su vez, corresponderían a los veriles más profundos. Los perfiles resultantes se muestran en la Figura 3.10, indicando que la existencia de algunos bancos de arena como se observa en la Figura 3.11 correspondiente a la Carta Náutica (IOA 10401) proporcionaban aumentos bruscos en las profundidades de los perfiles.

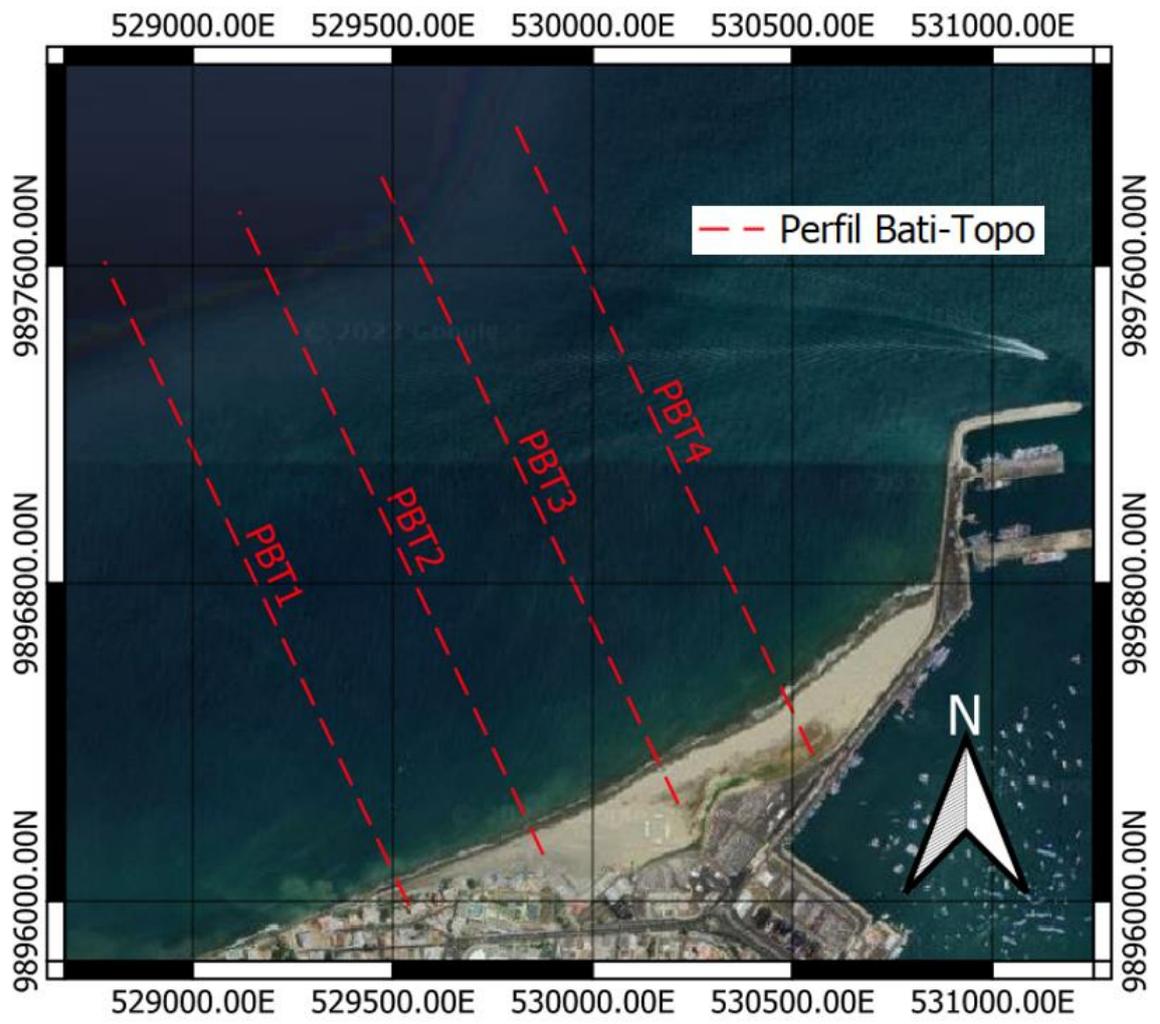
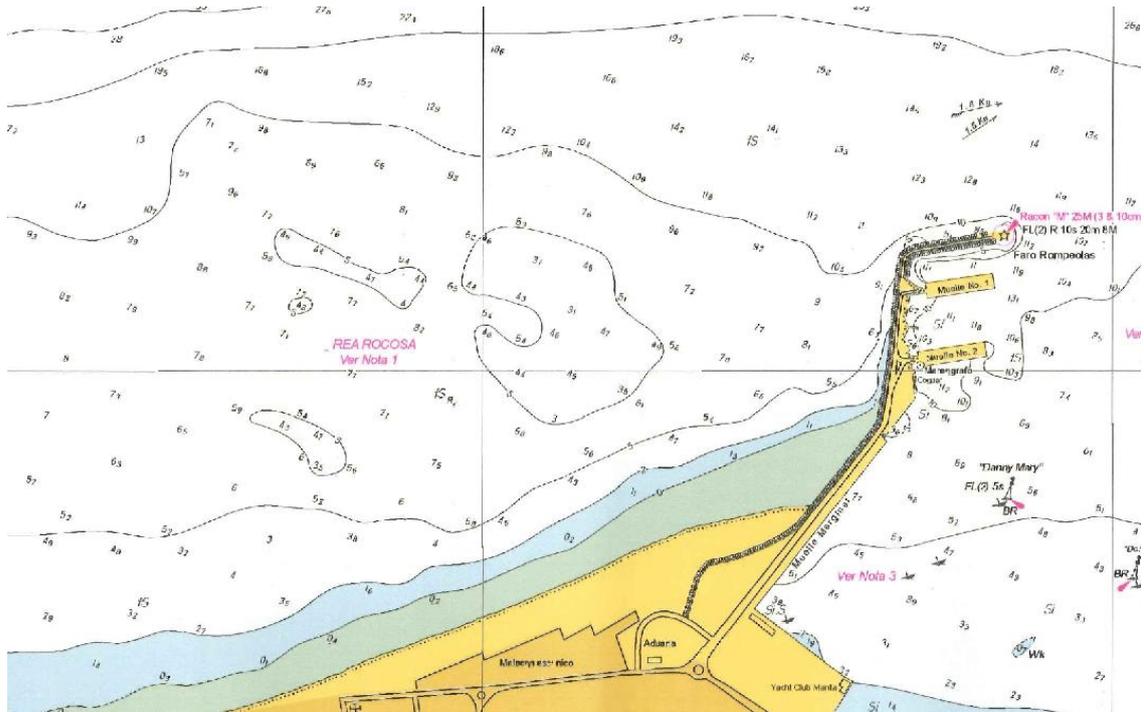


Figura 3-10 Perfiles bati-topo (PBT) a lo largo de la playa El Murciélago, para ser ingresados al modelo. (Autoras,2022)



**Figura 3-11 Zona de la Playa el Murciélago de la carta náutica IOA-10401(2008).
(Autoras,2022)**

Así mismo, se presenta en la Tabla 3.9 el resumen de los perfiles con los rangos y/o valores puntuales de los parámetros requeridos por el modelo.

Tabla 3.9 Descripción de valores de perfiles bati-topográficos.(Autoras,2022)

Perfil	Batimetría [m]	Rugosidad [m]	Diámetro medio del grano [mm]	Velocidad de caída [m/s]	Dispersión geométrica []
PBT1	-29.199 a 0.964	0.040	0.200	0.020	1.277
PBT 2	-18.624 a 0.593	0.040	0.200	0.020	1.277
PBT 3	-22.700 a 1.779	0.040	0.200	0.020	1.277
PBT 4	-24.389 a 2.132	0.040	0.200	0.020	1.277

3.3.1.2 Línea de costa

El mejor resultado para la línea de costa del año 2006 corresponde a la unión entre una pequeña porción de línea de costa extraída por DSAS para el año 2007, la cual no se mencionó en la sección 3.2 debido a que el nivel de nubosidad era aproximadamente

80% y tenía bandamiento, sin embargo, se pudo extraer una pequeña porción para la zona de la playa El Murciélagu. A su vez, se complementó esta información con la carta náutica IOA 10401 2008 y la batimetría del año 2006.

3.3.2 MIKE 21 SW

Se realizó la transformación de oleaje de aguas profundas a someras para el área de la Bahía de Manta, con la ayuda de los archivos generados por (Chuez y Ramirez, 2021) para el periodo de un año, desde el 2006 al 2007, como se muestra en la Figura 3.12. Sin embargo, la demanda computacional representó una limitante por lo que se implementó la serie de tiempo de (Andrade y Maquilón, 2019) con características de altura, periodo y dirección de ola semejantes a las de la zona de estudio.

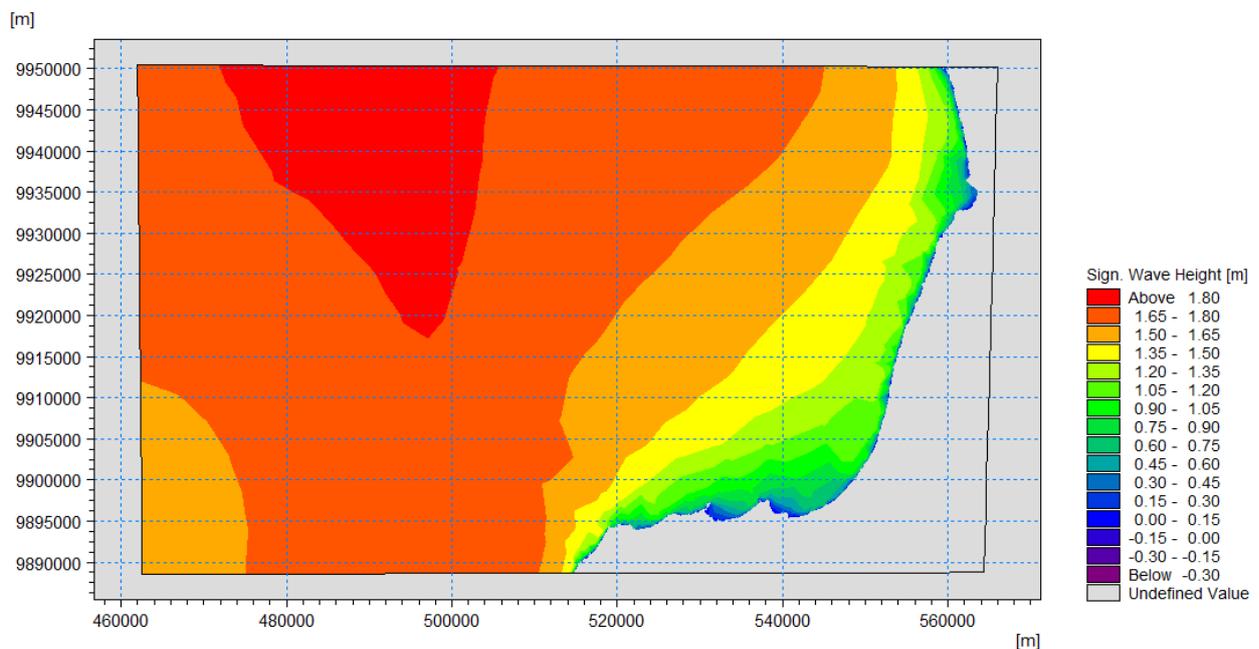


Figura 3-12 Resultado de la corrida del módulo SW para el año 2006. (Autoras,2022)

3.3.3 LINTABL

Considerando los valores obtenidos en la salida de campo para altura y periodo de ola, los cuales se encuentran en un intervalo entre (0.42 y 0.61m), y (12 y 14s), respectivamente, se configuró la tabla de transporte con los datos con altura de ola significativa entre 0.18 y 0.74m y un periodo entre 12 y 16s, basados en los estudios de (Vera, 2000) del ológrafo ubicado en Jaramijó (cercano a Manta), debido a que los intervalos son más amplios y han pasado por un proceso de calibración previo. Estos parámetros son los más sensibles en la configuración del modelo y posterior corrida en

LITLINE, ya que un aumento en 3s, o 0.20m en la altura de cambiaban notablemente los resultados. Cabe destacar que en esta tabla de transporte también se ingresaron los perfiles bati-topo y datos como la dirección del oleaje y tipo de sedimento, que junto con las variables antes mencionadas representan también los parámetros de validación del modelo.

3.3.4 LITLINE

La corrida del modelo incluyó los archivos de perfiles, línea de costa, y serie de tiempo antes mencionada. Los resultados más significativos para el periodo entre 2006 y 2022 muestran un crecimiento máximo de la línea de costa en 9.8m/año y en promedio de 5.23 m/año en los últimos 250m cerca de la estructura del puerto. Es importante resaltar que se configuró el espigón como un conjunto de 2 rompeolas, ya que al probar varias opciones de estructuras que brindaba el modelo como “jetties” o “groynes” no se ajustaban a la forma real de la estructura. A pesar de esta configuración, existe un espaciamiento en el punto de unión de la línea de costa y el espigón, lo que adiciona cierto nivel de incertidumbre al resultado. Finalmente, se observa que el modelo computacional es capaz de representar la sedimentación cerca del espigón, no así, la erosión que se evidencia en la parte del malecón (Figura 3.13).

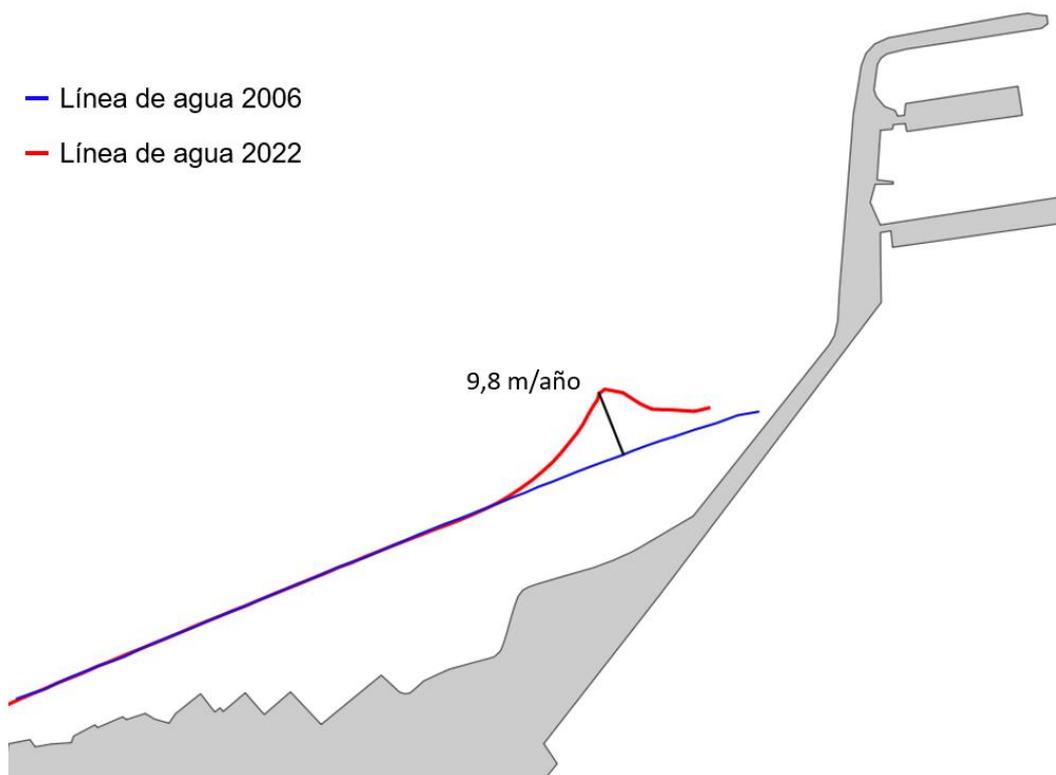


Figura 3-13 Resultado del cambio en la línea de costa realizado por LITLINE. Periodo 2006-2022. (Autoras,2022)

3.4 Etapa 4. Calibración y validación de resultados

3.4.1 Validación de la línea de costa y perfiles

Durante el proceso de calibración se observó que la línea de costa tuvo un mejor ajuste con un ángulo de 300° (respecto al norte), mientras que los perfiles se acoplaron mejor a un ángulo de 162° respecto a la línea de costa, cuyos valores se asemejan a los obtenidos con los SIG. El segundo paso corresponde a la gráfica de las líneas de costa del periodo entre 2006 y 2022 utilizando Microsoft Excel, donde se evidencia que, entre algunos periodos, (ej., 2011-2013 y 2018-2019), no hubo un cambio significativo en la línea de costa. Luego de haber cumplido con los pasos anteriores, la resta entre la línea inicial y final presentó un avance de 9.8 m/año. Y como último paso para la validación, se obtuvo el error relativo de las líneas de costa del año 2021, (CoasSat naranja, LITPACK azul) (Figura 3.14). El porcentaje de error en las posiciones 1 a 39 de la línea de costa, (desde malecón playa El Murciélago, hasta antes del inicio del espigón), tienen un porcentaje entre 7 a 11% de error, siendo el punto 37 donde está el menor error con porcentaje de 1%, mientras que en los puntos 41 y 51 el porcentaje de error es de 11 a

69%. Este aumento en el valor del error se atribuye a la configuración de la forma del espigón en el modelo.

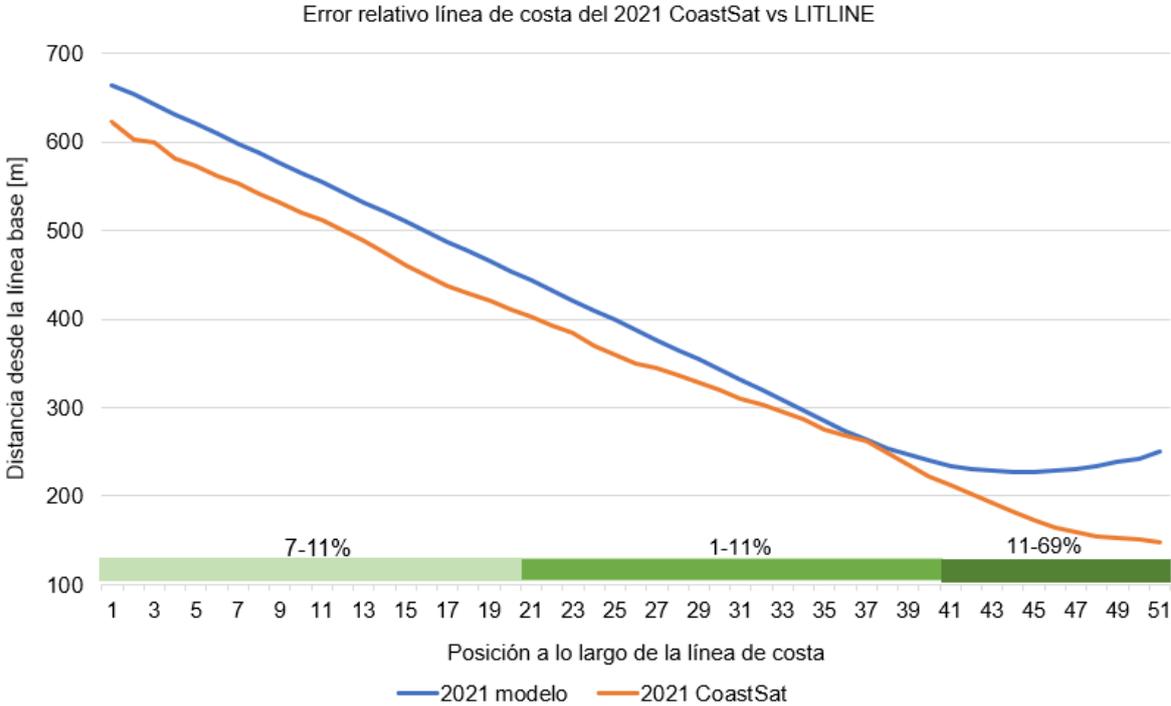


Figura 3-14 Validación de los resultados de LITLINE y CoastSat por medio del análisis del error relativo para la línea de costa del 2021. (Autoras,2022)

3.4.2 Validación del avance de línea de costa en DSAS

Los resultados obtenidos con DSAS muestran el análisis de WLR que representan una serie de transectos que cortan la línea de costa, cada una con un color distinto equivalente al cambio de desplazamiento anual (erosión, sedimentación). Se observa que desde el acantilado de Barbasquillo hasta la mitad de la playa El Murciélagu existen 2 secciones donde el desplazamiento total de la línea de costa es cercano a cero, y eso es debido a la construcción de 2 espigones que evitan el proceso de erosión. A mitad de la playa El Murciélagu también se presenta un desplazamiento total entre -0.5 y 0.5, contrario a lo que ocurre en el lado más cercano al espigón de TPM, donde se encuentran los mayores valores de sedimentación, siendo en promedio 5.79 m/año y el valor máximo de 7.90 m/año.

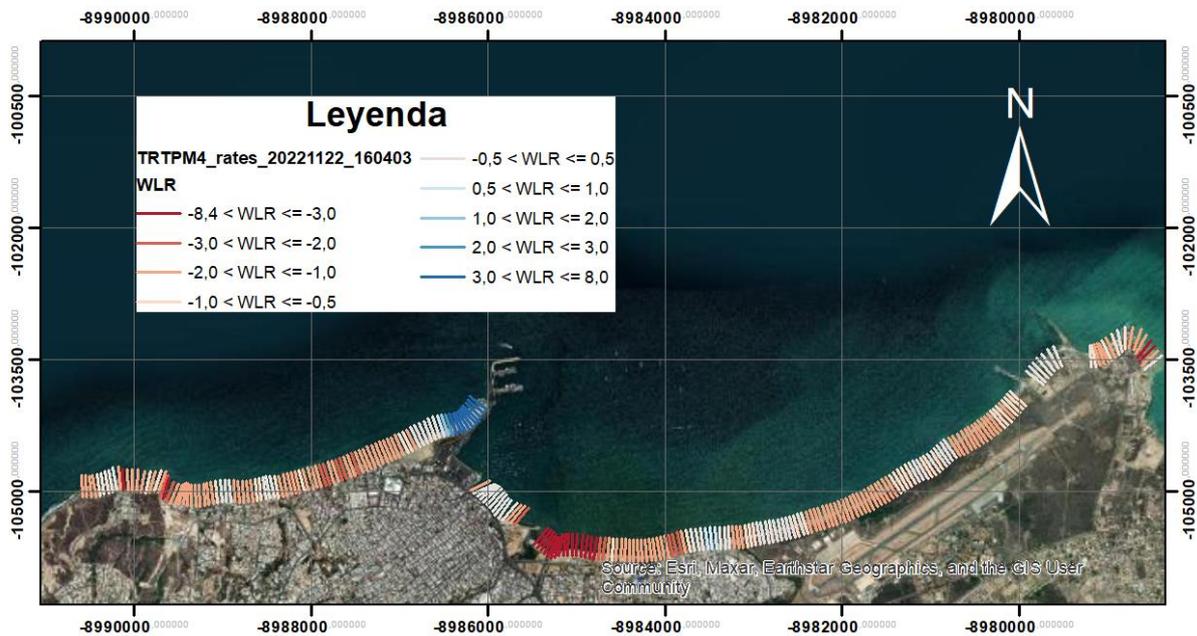


Figura 3-15 Resultado obtenidos por DSAS periodo 2003-2021. (Autoras,2022)

Se observa que desde Barbasquillo al espigón de TPM, los transectos que indican sedimentación representan el 12% de la línea de costa, mientras que, los transectos con rangos entre 0.5 m/año y -2 m/año representan un 24%, y el resto de los transectos (65%), tenemos una erosión mayor a -2 m/año. También se observa, que del lado este de TPM se localizan 5 secciones de poca erosión, debido a instalaciones del puerto artesanal de Manta, balance de sedimento por la salida de un río, un enrocado frente al aeropuerto y la construcción de las estructuras de puerto atún.

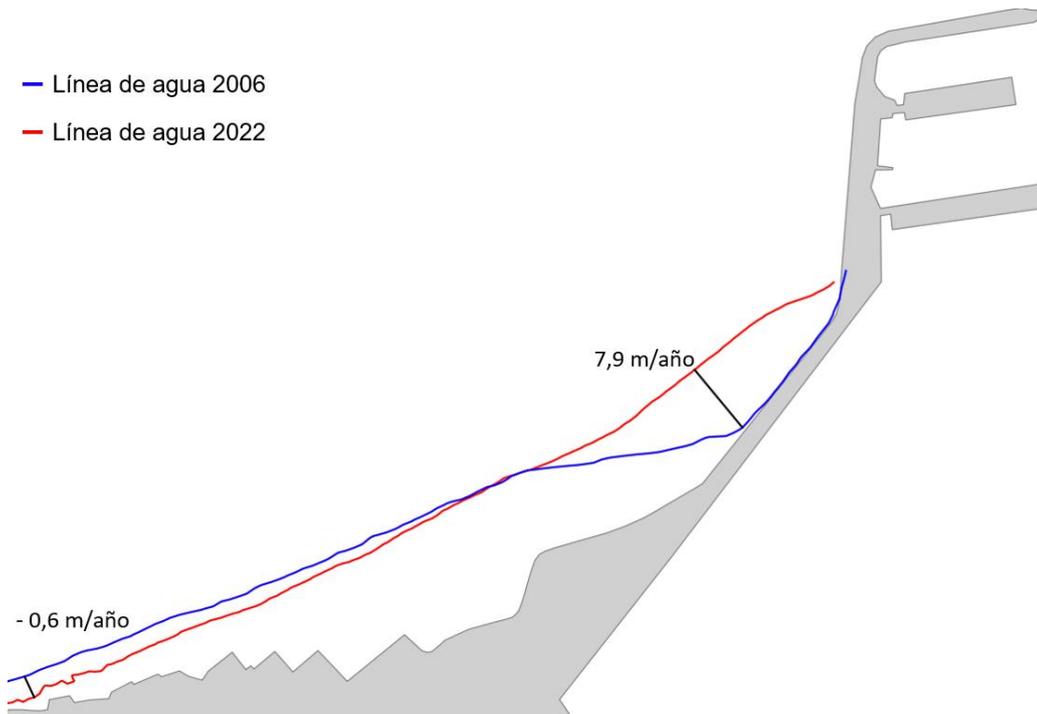


Figura 3-16 Resultado obtenido por DSAS para el cambio de la línea de costa para el periodo 2006-2022. (Autoras, 2022)

3.5 Etapa 5. Generación de escenarios

Para la generación de escenarios (una vez validados los resultados del modelo computacional), se consideró un ángulo de línea de costa de 300° y el ángulo de los perfiles de 155° con respecto a la línea de costa. Así mismo, respecto a los parámetros de ola se ingresó una altura con rangos entre 0.2 a 1.4m y un periodo comprendido entre 8 y 16s. El resultado mostró un pequeño avance en la línea de costa en la parte inicial de la playa, con un máximo de 3.5 m/año, mientras que en la parte central denota una erosión máxima de -2.3m/año, hasta acercarse al espigón donde la acumulación de sedimentos indicó que el máximo es 12.5m/año. El promedio de avance en estos últimos puntos cercanos a la estructura fue de 7m/año (Figura 3.17). Podemos observar que este resultado de proyección (2023-2033) sigue la tendencia de leve erosión (malecón) y gran sedimentación (espigón) obtenido por DSAS, ajustándose al comportamiento observado de las cartas náuticas, evidenciando como el problema de sedimentación irá aumentando con el tiempo, sobre los cuales deben realizarse acciones para su mitigación.

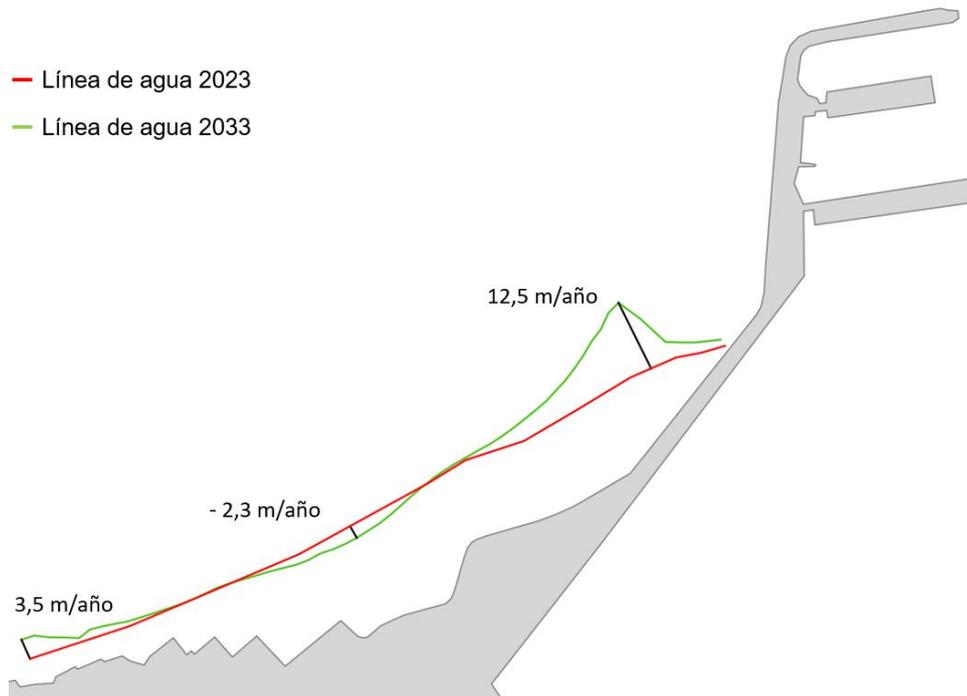


Figura 3-17 Resultados obtenidos por LITLINE como parte de los posibles escenarios del cambio de la línea de costa para periodo 2023-2033. (Autoras,2022)

3.6 Análisis de costos

La realización del presente proyecto incluye recursos humanos, tecnológicos y análisis en laboratorios. Todos estos valores sumados se estiman en \$50000 (USD), donde se incluye el análisis granulométrico en al menos 3 posiciones de la playa para 4 estaciones de perfiles a ser ingresados al modelo y 2 batimetrías para obtener los datos de la zona de estudio, asumiendo que los datos de olígrafos (o mediciones de ola) para los procesos de calibración y validación ya existen y son de acceso libre para la zona de estudio. Por otra parte, cabe mencionar que periódicamente se debe realizar dragados de mantenimiento para tener la profundidad adecuada (operatividad) de la Terminal Portuaria y esto representa un costo aproximado de \$500000 (USD) de acuerdo con la información proporcionada por TPM. Tomando esta información como base, se puede relacionar que este estudio representa un 10% de esa inversión, y aunque no reemplaza la acción de dragar, comprender este proceso morfodinámico (oeste del espigón de TPM) aporta información valiosa a los tomadores de decisiones respecto acciones de prevención. En otras palabras, comprender el proceso (monitorear la sedimentación) permitirá tener mayores insumos para realizar acciones de mitigación y ahorrar costos adicionales de dragado debido al “bypass” del sedimento. Sin duda, el problema de

sedimentación en los puertos es común, es así que, esta metodología puede ser utilizada para otros puertos con esta misma problemática.

Tabla 3.10 Análisis de costos para el proyecto. (Autoras,2022)

Item	Elemento	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Recursos Humanos	Oceanógrafo Senior	2	\$4000.00	\$8000.00
	Equipo logístico	2	\$400.00	\$800.00
Licencias	QGIS	1	\$0	\$0
	ARCGIS	1	\$2000	\$2000.00
	MIKE 21	1	\$5133	\$5133.00
	ANACONDA	1	\$0	\$0
	Jupyter Notebook	1	\$0	\$0
	MATLAB	1	\$2350	\$2350.00
	Google Earth	1	\$0	\$0
	Google Earth Engine	1	\$0	\$0
Equipos de campo	Anemómetro	2	\$190.00	\$380.00
	Nivel óptico	2	\$772.80	\$1545.60
	Brújula	2	\$76.70	\$153.40
	GPS	3	\$582.40	\$1747.20
	Cronómetro	2	\$26.00	\$52.00
	Draga Van Veen	1	\$4956.00	\$4956.00
	Alquiler de bote	1	\$200.00	\$200.00
Externos	Análisis granulométrico	12	\$300.00	\$3600.00
	Datos de olígrafo/mediciones de ola	1	\$0	\$0
	Ortofotos	3	\$40.00	\$120.00
	Estudio batimétrico	2	\$7500.00	\$15000.00
Total				\$46037.20

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El análisis del cambio de la línea de costa evidenció que existe un proceso de erosión y sedimentación sobre la playa El Murciélago que está afectando la dinámica y transporte de sedimentos.
- La recopilación de información batimétrica y de parámetros oceanográficos fue clave para la realización del modelo y los procesos de validación y calibración.
- El procesamiento de imágenes satelitales permitió conocer las zonas más afectadas en cuanto al cambio en la línea de costa.
- Los módulos de MIKE ZERO, herramientas y submódulos de dicho programa se implementaron para el modelamiento de eventos ya ocurridos y a su vez realizar una proyección sobre un posible escenario, donde los datos de campo de campo, bibliográficos e imágenes satelitales posibilitaron la calibración y validación de resultados.
- Tanto los resultados de LITPACK como de CoastSat muestran un proceso de erosión cercano a -1m/año (malecón) y una sedimentación mayor a 7m/año cercano al espigón de TPM, (transporte de sedimento sentido de oeste a este). Este hallazgo se respalda por medio de la herramienta DSAS (análisis desde Barbasquillo hasta la playa hasta El Murciélago) en donde también se evidencia las zonas de erosión (oeste) y sedimentación (espigón de TPM).
- DSAS es una herramienta que permite el estudio de procesos (erosión y sedimentación) por medio de imágenes satelitales que permite conocer cómo ha cambiado respecto a una referencia del pasado hacia el presente (hindcasting), a diferencia de los modelos computacionales (ej., MIKE ZERO, LITPACK), con los cuales utilizando una configuración, calibración y validación adecuada nos permiten modelar un resultado similar al real, y que luego generar posibles escenarios futuros (forecasting).
- DSAS no demanda una gran base de datos oceanográficos o parámetros en campo, adicional al uso imágenes satelitales como input, a las cuales actualmente se puede acceder con facilidad utilizando Google Earth Engine de manera

gratuita, por lo que representa una gran ventaja sobre el modelo, asimismo, que esta herramienta también ha desarrollado complementos para la mejor calidad del producto.

- Dentro de la configuración del modelo se resalta que los resultados son muy sensibles a los cambios en parámetros como altura, período y dirección del oleaje, los cuales pudieron ser calibrados gracias a la información bibliográfica recopilada y los datos de salida de campo, que garantizaron un buen ajuste y en condiciones adecuadas.
- Se puede concluir que la interfase del modelo no es tan amigable con playas que tienen una forma diferente a una línea recta, y también con el posicionamiento de estructuras de protección que poseen formas complejas.
- El promedio de sedimentación en la zona más cercana al espigón en ambos casos fue similar, siendo de 5.79 m/año para el resultado obtenido con DSAS y 5.23m/año el calculado en el modelo y respecto a los valores más altos en por cada método fueron de 7.90 y 9.89 metros por año, respectivamente.
- Los resultados de validación mostraron un rango de error relativo de las líneas de costa de DSAS y el modelo entre 6 a 11% en zonas cercanas al malecón, y acercándose a la estructura aumenta a valores entre 11 a 69%
- Parámetros de oleaje como altura y periodo de la ola, además del tipo de sedimento encontrados en campo, se asemejan a los hallados en bibliografía y fueron determinantes para la realización del modelo.
- Los resultados de la carta náutica mostraron cómo los veriles y bajos están convergiendo en forma de embudo hacia el espigón de TPM con el pasar de los años lo que podría causar afectaciones por el transporte de sedimentos.
- El viento es un parámetro sumamente importante en campo, que permite el transporte de sedimentos y la formación de dunas, sin embargo, al no considerarse en el modelo les otorga incertidumbre a los resultados.
- Una de las mayores limitantes fue la cantidad de información y la discordancia en los años de inicio o fin de los estudios, por lo que se implementaron diversos archivos e interpolaciones para un mejor resultado.
- Los resultados de LITLINE contemplan el cambio de línea de costa anual, por lo que no discrimina cambios estacionales como las época seca y húmeda, o eventos puntuales como agujajes u oleajes que afectan a TPM

4.2 Recomendaciones

- Aplicar la misma metodología, pero con un modelo que pueda tomar más variables en consideración, como el viento, y que también pueda adaptarse a la disposición y estructuras de la configuración de la playa obtener resultados más acordes a la realidad sobre la parte más cercana al espigón.
- Además de mantener un estudio de batimetría actualizado sobre la playa El Murciélago, sería un beneficio la instalación de un olígrafo, o plantear una metodología para mejorar la base de datos respecto a características del oleaje, como altura, periodo, dirección de oleaje, velocidad y dirección del viento, y de corrientes costeras y litorales.
- Realizar un estudio sobre la misma zona pero que considere también el cambio en los perfiles batimétricos o el volumen transportado a través de los veriles.
- Llevar a cabo campañas de medición de campo más frecuentemente que incluyan análisis de sedimento en las distintas fases de marea, en puntos sobre la playa como también en estaciones en agua cercanos a los diferentes veriles de profundidad.
- Se recomienda implementar rutinas de programación que permitan optimizar el tiempo al momento de crear los archivos de entrada, y a su vez al procesar los resultados.
- Se recomienda establecer una línea base de la información previo a la realización del proyecto, en donde los parámetros a analizar tengan el mismo año de inicio o fin.
- Comparar los resultados obtenidos con el módulo de LITPACK con otros modelos computacionales
- Se recomienda estudiar el cambio de línea de costa de las épocas seca y húmeda con DSAS por separado para comprender como cambia según la estación del año.

BIBLIOGRAFÍA

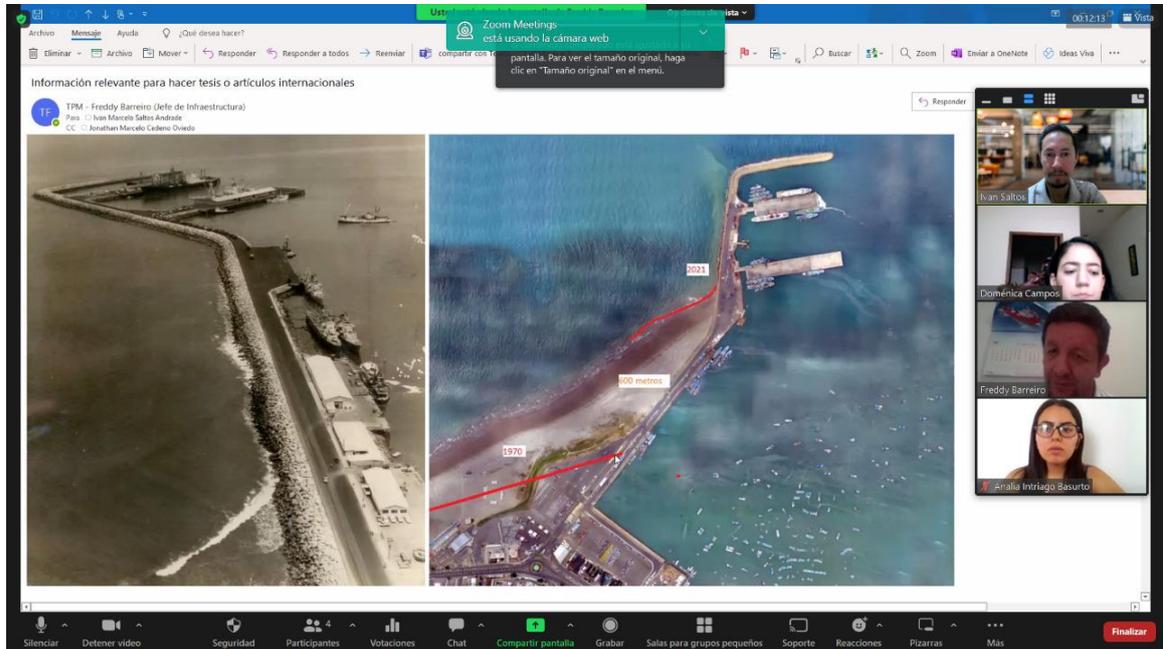
- Aagaard. (2011). *Sediment transfer from beach to shoreface: The sediment budget of an accreting beach on the Danish North Sea Coast*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X11004107?casa_token=en=eHtTmmRBQUAAAAA:y2Dz7Xco-Whg2P5NRZHQaNe0T0mELG4phZYsrDRxnMTQAjb8fWEFRpJMpGiwjPIZLsO7FOZq04E
- Allauca, y Cardín. (1987). Análisis de las olas en la costa central del Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 4(1).
- Andrade, y Maquilón. (2019). *Evaluación de diseños ingenieriles ante procesos erosivos costeros, utilizando modelos numéricos. Caso de Estudio: San Pedro, Santa Elena - Ecuador*. Tesis de ingeniería, ESPOL-FIMCM.
- Burcharth, y Hughes. (2003). *Types and Functions of Coastal Structures*. Denmark.
- Caiza, y Nativí. (2019). *Evaluación y modelamiento del cambio de línea de costa en condiciones naturales y bajo influencia de obras de protección costera. Caso de estudio: Libertador Bolívar, Santa Elena-Ecuador*. Tesis de ingeniería, ESPOL-FIMCM, Guayaquil. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/48144?mode=full>
- Chuez, y Ramirez. (2021). *Estudio de agitación de olas incidentes provenientes del norte dentro de la Terminal Portuaria de Manta utilizando MIKE 21*. Tesis de Ingeniería, ESPOL-FIMCM. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51445>
- CONSULSUA. (2017). *Estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de la Terminal Internacional del puerto de Manta fase 1A-1B*.
- Delgado. (2017). *Somos Manabí- Una nueva visión*. Parte 1.- Puerto de Transferencia Internacional de Carga del Ecuador en el Puerto de Manta: <http://www.somosmanabi.com/index.php/nuestro-blog/item/parte-1-puerto-de-transferencia-internacional-de-carga-del-ecuador-en-el-puerto-de-manta#:~:text=La%20construcci%C3%B3n%20del%20rompeolas%20de,modelo s%20hidr%C3%A1ulicos%2C%20en%20ninguna%20universida>
- DHI. (2014). *Module MIKE 21 SW, LITPACK: Coastline evolution module (LITLINE), Littoral Drift (LITDRIFT)*. (Danish Hydraulic Institute).

- DHI. (2019). *MIKE Zero. The Common DHI User Interface for Project Oriented Water Modelling - User Guide*: <https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2019/General/MIKEZero.pdf>
- ENTRIX AMERICA. (2015). *Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Depósito de Pesca Artesanal Petrocomercial San Mateo*.
- Escudero, Ortega, y Escalona. (2016). Análisis espectral de olas marinas: modelos univariados. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 9(2), 123-138. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt/article/view/251>
- Fagherazzi, y Wiberg. (2009). Importance of wind conditions, fetch, and water levels on wave-generated shear stresses in shallow intertidal basins. *Journal of Geophysical Research*, 114. <https://doi.org/doi:10.1029/2008JF001139>
- Galvin, y Cyril. (1968). Breaker type classification on three laboratory beaches. *Journal of Geophysical Research*, 73, 3651-3659. <https://doi.org/10.1029/JB073i012p03651>
- Giraldo, y Lonin. (1997). Cálculo del oleaje y el transporte de sedimentos en la costa Caribe colombiana. *Boletín científico CIOH*(18), 39-49. https://doi.org/10.26640/01200542.18.39_49
- Guisado, Malvárez, y Navas. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación y morfodinámica*. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/66640/GUISADO.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- Holthuijsen, Booji, y Herbers. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. (Elsevier, Ed.) *Coastal Engineering*, 13, 23-54. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3839\(89\)90031-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3839(89)90031-8)
- INOCAR. (2022). *Tabla de mareas*. <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/tabla-mareas#busqueda-de-datos-de-mareas>
- Khalifa, Solima, y Yassin. (2017). Assessment of a combination between hard structures and sand nourishment eastern of Damietta harbor using numerical modeling. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 545-555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.009>
- Modesto. (2009). *Modelación numérica del oleaje en zonas costeras con batimetría no constante mediante elementos finitos*.

- <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7896/01.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MTOP y APM. (2018). *Reporte de evaluación de impacto ambiental y social para la reconstrucción y ampliación del terminal pesquero y de cabotaje de la ciudad de Manta, provincia de Manabí*. https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/2_REIAS-Puerto-de-Manta-comprimido.pdf
- Narváez, Aguilar, y Oleas. (2022). El proceso logístico dentro del Terminal Portuario de Manta análisis de los costos de servicios portuarios. *Polo del Conocimiento*, 7(6), 1283-1303. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i6.4137>
- NOAA. (2022). *Why does the ocean have waves?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/wavesinocean.html#:~:text=Waves%20are%20most%20commonly%20caused,disturbance%20creates%20a%20wave%20crest>.
- OceanNet. (2022). Draga Van Veen: <https://www.ocean-net.es/catalogo/producto/draga-van-veen/>
- Osejos, Lucas, y Villegas. (2022). La Concesión del Puerto Marítimo de Manta y su Incidencia en el Comercio Exterior (TPM). *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, 8(1), 18-38. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i41.2556>
- Perez. (2016). *Mar de fondo*. SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/313412525/Mar-de-fondo-pdf#>
- Salles, y Silva. (2004). *Infraestructura de protección costera*. <http://etzna.uacam.mx/epomex/pdf/mancos/cap13.pdf>
- Sánchez. (2018). *Coloquio Manta Centerario 2022*. Manta, playa El Murciélago: <https://joselias2022.com/2018/09/23/manta-playa-el-murcielago/#:~:text=Su%20nombre%3A%20EL%20MURCI%3%89LAGO%2C%20recuerda,gruta%2C%20sal%3%ADan%20volando%20los%20murci%3%A9lagos>.
- Secretaría Técnica Planifica Ecuador. (2020). *Plan de Ordenamiento del Espacio Marino Costero 2017-2030*. Quito-Ecuador.
- Soledispa. (2009). Estudio de las características sedimentológicas de la zona costera frente al balneario de Manta, Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 15(1).
- Terminal Portuario de Manta. (2020). Arriban al puerto de Manta naves con mayor calado. <https://tpm.ec/arriban-al-puerto-de-manta-naves-con-mayor-calado>.

APÉNDICES

APÉNDICE A: Reuniones con el cliente



Reunión vía Zoom. Septiembre,2022.



Visita técnica a TPM. Octubre,2022



**Visita Técnica a TPM. Zona intermareal vista desde las oficinas de TPM.
Octubre,2022.**

APÉNDICE B: Códigos de programación

Código WWII

```
link='http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/Model_output/WAVEWATCH_III/3hourly';

% 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');

% id de posicion
% Ubicar el punto identificado en la grilla, para que solo se extraiga la
información de ese unico punto
ixlo=find(lo==278.75);
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 --> [0,5] "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 --> [0,25]
%   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 dÃa
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);
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', 'labeledge', 'Velocidad de
Viento [m/s]', 'TitleString',{'Rosa de viento'; 'Posición de la boya
[278.75,0]'; 'Período: 1997-2019'}};
[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', 'labeledge', 'Altura

```

```
Significativa [m]', 'TitleString', {'Rosa de oleaje'; 'Posición de la boya
[278.75,0]'; 'Período: 1997-2019'}]);
[figure_handle, count, speeds, directions, Table] = WaveRose(w_theta, w_hsig, Options);
%Descargar data
data_oleaje_Manta = [tim, datevec(tim), w_hsig, w_per, w_theta, ww, wwdir];
csvwrite('data_oleaje_Manta_27875_-1.csv', data_oleaje_Manta);
```

Código Anaconda

Se accede a la base de Coastsat y Google con los siguientes comandos respectivamente.

```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Versión 10.0.19044.2486]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

(base) C:\Users\domen>conda activate coastsat

(coastsat) C:\Users\domen>earthengine authenticate
```

Línea 1 y 2

Se ingresa con una cuenta de Google y, una vez descargado y extraído el código de Coastsat desde github, es copiado el enlace de la carpeta hasta donde se encuentra CoastSat-2.1, de la siguiente manera:

```
Successfully saved authorization token.

(coastsat) C:\Users\domen>cd C:\Users\domen\Downloads\Tesis\IMAGENES-TESES\CoastSat-2.1
```

Línea 3

Finalmente se continúa con Jupyter

```
(coastsat) C:\Users\domen\Downloads\Tesis\IMAGENES-TESES\CoastSat-2.1>jupyter notebook
```

Línea 4

Código CoastSat

```
%load_ext autoreload
%autoreload 2
import os
import numpy as np
import pickle
import warnings
warnings.filterwarnings("ignore")
import matplotlib
matplotlib.use('Qt5Agg')
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import gridspec
plt.ion()
import pandas as pd
from datetime import datetime
from coastsat import SDS_download, SDS_preprocess, SDS_shoreline, SDS_tools,
SDS_transects

# region of interest (longitude, latitude)
polygon = [[[-80.764029, -0.937889],
            [-80.656323, -0.916114],
            [-80.654882, -0.949525],
            [-80.762051, -0.962268],
            [-80.764029, -0.937889]]]
# it's recommended to convert the polygon to the smallest rectangle (sides parallel to
coordinate axes)
polygon = SDS_tools.smallest_rectangle(polygon)
# date range
dates = ['2020-01-19', '2020-01-21']
# satellite missions ['L5','L7','L8','L9','S2']
sat_list = ['S2']
# choose Landsat collection 'C01' or 'C02'
collection = 'C02'
# name of the site
sitename = 'TPMS25'
# directory where the data will be stored
filepath = os.path.join(os.getcwd(), 'data')
# put all the inputs into a dictionary
inputs = {'polygon': polygon, 'dates': dates, 'sat_list': sat_list, 'sitename': sitename,
'filepath': filepath,
         'landsat_collection': collection}

# before downloading the images, check how many images are available for your inputs
SDS_download.check_images_available(inputs);

# inputs['include_T2'] = True
metadata = SDS_download.retrieve_images(inputs)
metadata = SDS_download.get_metadata(inputs)

settings = {
    # general parameters:
    'cloud_thresh': 0.5,      # threshold on maximum cloud cover
    'dist_clouds': 300,      # distance around clouds where shoreline can't be mapped
    'output_epsg': 32717,    # epsg code of spatial reference system desired for the
output
    # quality control:
    'check_detection': True,  # if True, shows each shoreline detection to the user for
validation
    'adjust_detection': False, # if True, allows user to adjust the position of each shoreline
by changing the threshold

```

```

'save_figure': True,      # if True, saves a figure showing the mapped shoreline for
each image
# [ONLY FOR ADVANCED USERS] shoreline detection parameters:
'min_beach_area': 1000,   # minimum area (in metres^2) for an object to be labelled
as a beach
'min_length_sl': 500,     # minimum length (in metres) of shoreline perimeter to be
valid
'cloud_mask_issue': False, # switch this parameter to True if sand pixels are masked
(in black) on many images
'sand_color': 'default',  # 'default', 'latest', 'dark' (for grey/black sand beaches) or
'bright' (for white sand beaches)
'pan_off': False,        # True to switch pansharpening off for Landsat 7/8/9 imagery
# add the inputs defined previously
'inputs': inputs,
}
Shoreline detection
%matplotlib qt
output = SDS_shoreline.extract_shorelines(metadata, settings)

geomtype = 'lines' # choose 'points' or 'lines' for the layer geometry
gdf = SDS_tools.output_to_gdf(output, geomtype)
if gdf is None:
    raise Exception("output does not contain any mapped shorelines")
gdf.crs = {'init': 'epsg:' + str(settings['output_epsg'])} # set layer projection
# save GEOJSON layer to file
gdf.to_file(os.path.join(inputs['filepath'], inputs['sitename'],
'%s_output_%s.shp'%(sitename, geomtype)),
            driver='ESRI Shapefile', encoding='utf-8')

```

APÉNDICE C: Salida de campo



Formación de dunas por efecto del viento, cercanas al espigón.



Toma de perfiles con método Andrade.

CARACTERÍSTICAS LITORALES

Playa-Proyecto		Fecha:		Observador: Leon - Matias		Latitud: 53 03 05		
Estacion		Fase lunar:		Orientación (°): 330°		Longitud: 98 96 393		
Horas		10:28	11:15	12:00	12:45	13:20	14:15	
CORRIENTE LITORAL	Espacio (m)	119 p	261	804 p	217 p	309 p	132 p	
	Tiempo (s)	446	260	156	245	391	94	
	Dirección*	D	D	D	D	D	D	
	Velocidad (m/s)							
Corriente de resaca(SI/NO)		SI	SI	NO	NO	NO	NO	
Ancho de zona de surf		300 p	110 p	100 p	80 p	90 p	90 p	
Distancia L.A. al flotador (m)		260 p	165 p	168 p	100 p	96 p	90 p	
Distancia desde I.P. a L.A.		160 p	183 p	233 p	183 p	114 p	62 p	
VIENTO	Velocidad	2.2	3	6.3	6.9	7.3	7.4	
	Dirección	335°	92°	80°	67°	87°	93°	
	Ortogonal	336°	303°	332°	300°	302°	307°	
OLAS	Tipo**	P	P	P	P	S-P	S-P	
	Periodo***	13.6	13.4	14.4	12.0	12.5	14.4	
	Periodo/10	13.6	13.4	14.4	12.0	12.5	14.4	
N° de observación								Alturas (cm)
1		50	30	60	30	40	30	
2		40	40	65	50	50	30	
3		50	60	65	50	50	40	
4		70	60	50	40	60	50	
5		50	30	60	40	60	30	
6		50	30	70	50	40	35	
7		40	30	50	40	50	50	
8		60	40	60	50	50	70	
9		40	40	60	60	60	70	
10		50	60	70	50	40	70	
Promedio		50						

Dirección * D (derecha), I (Izquierda)

L.A. = Línea de agua

I.P. = Inicio de perfil (lo más atrás posible)

Tipo** Spilling (S), Plunging (P), (S-P)

Periodo *** 11 crestas

Datos sin procesar de características litorales

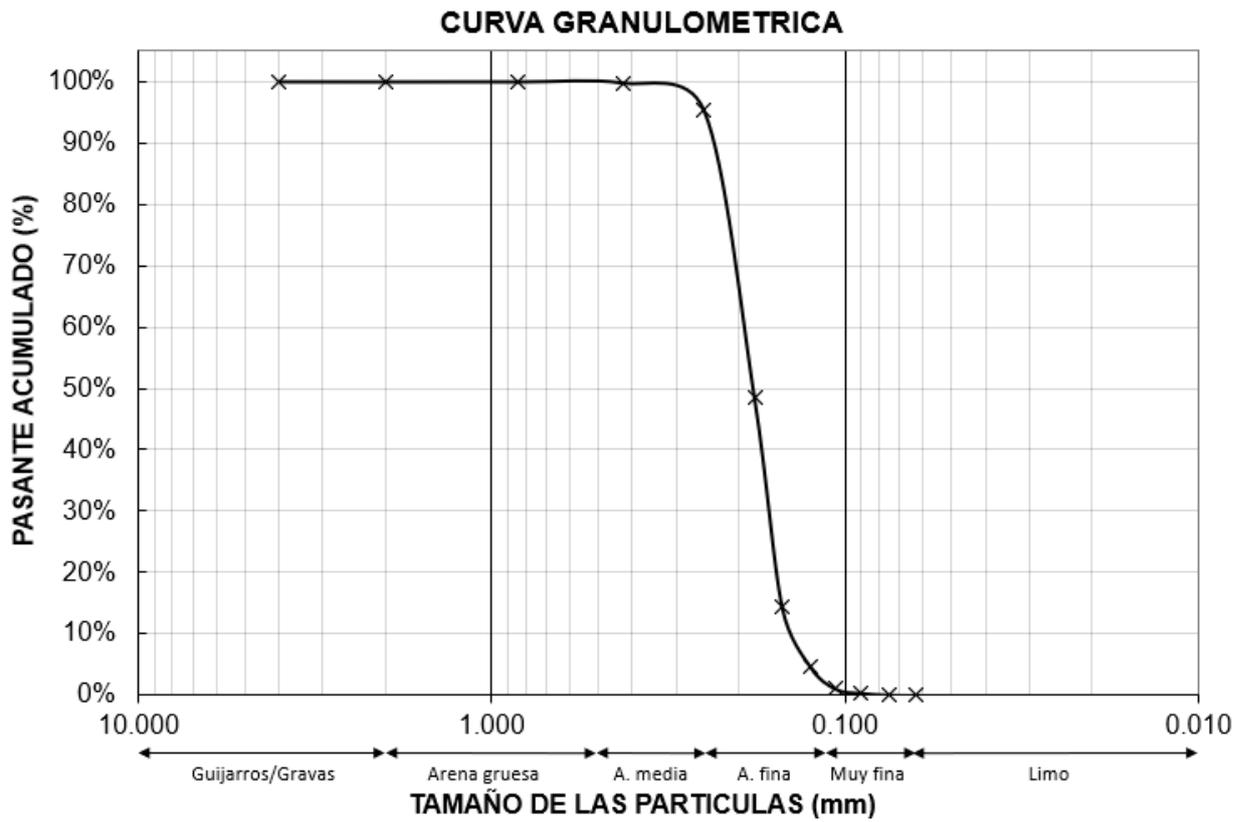
APÉNDICE D. Granulometría



Fraccionado de muestras de sedimento.

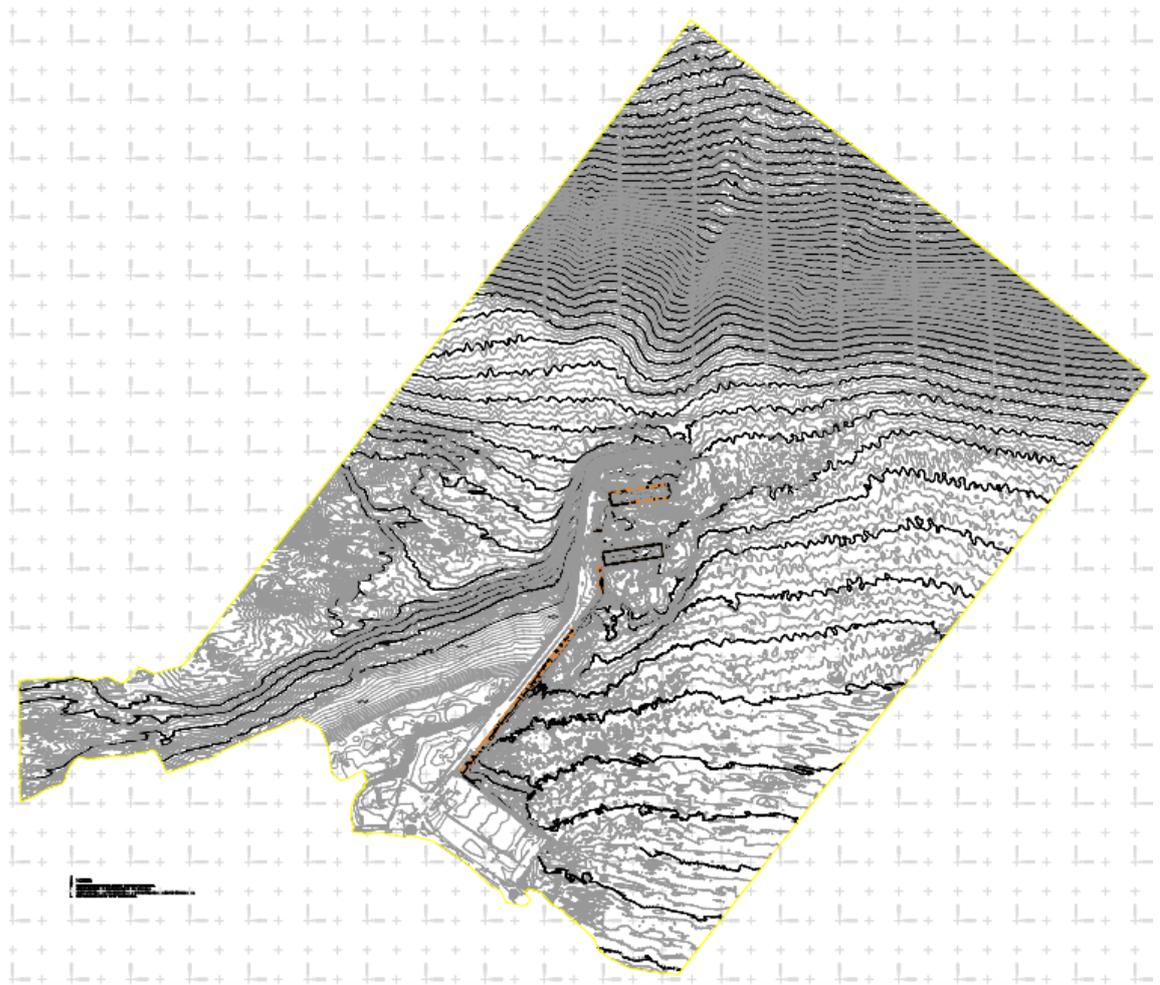


Pesaje de contenido retenido por tamiz.

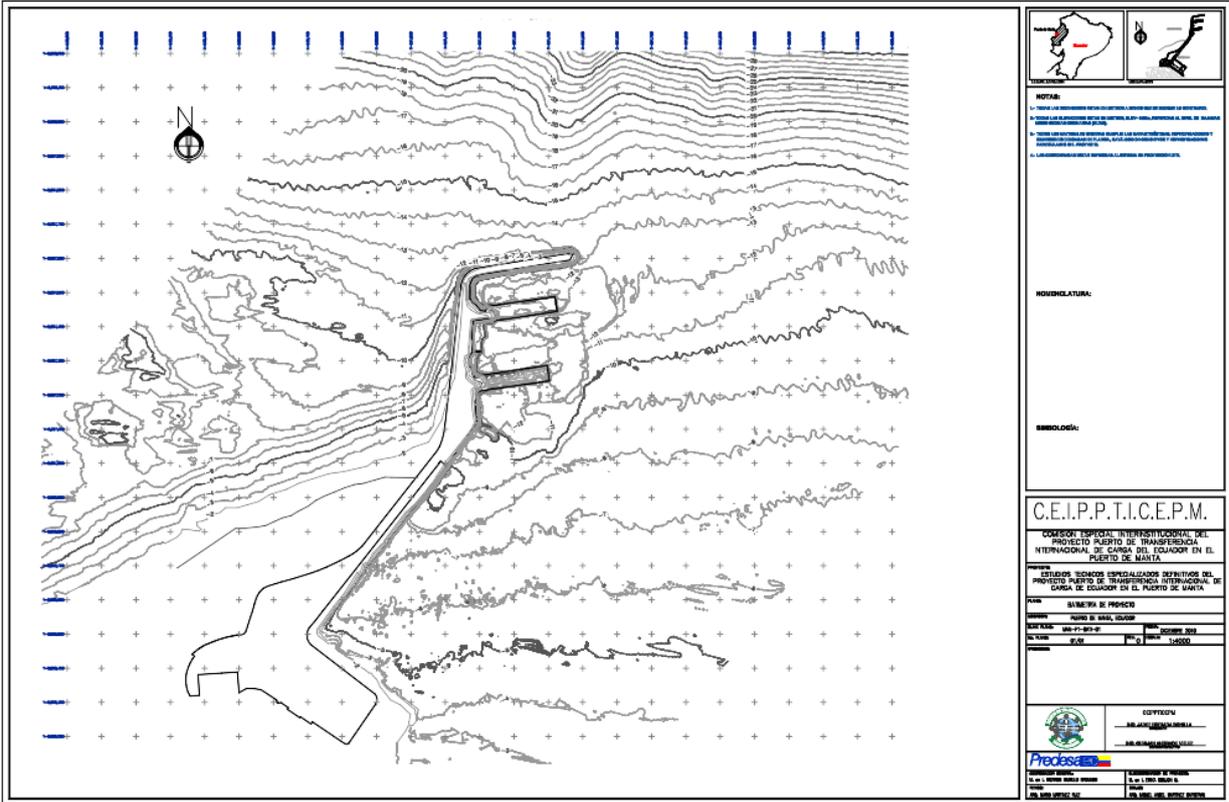


Curva granulométrica estación E1-Berma.

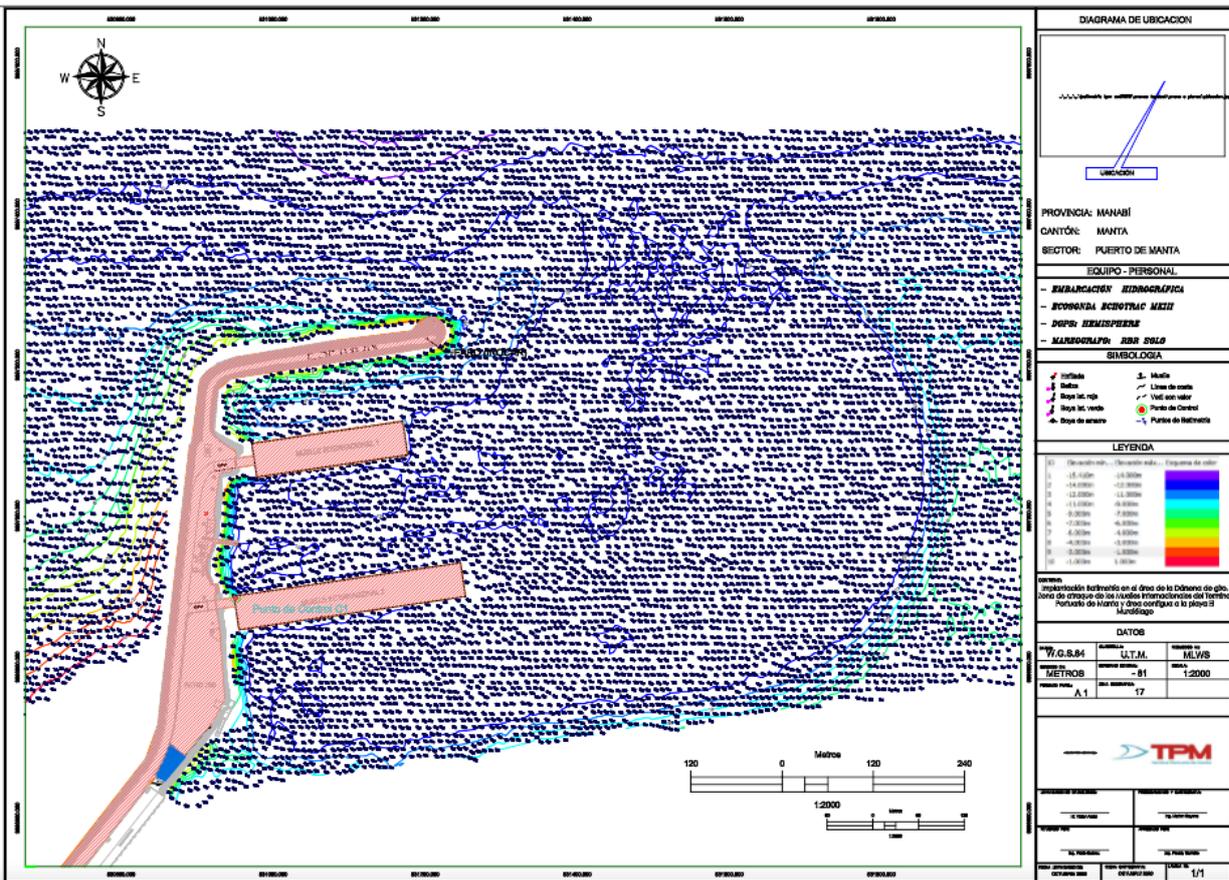
APÉNDICE E. Cartas Náuticas proporcionadas por TPM



Batimetría TPM 2006

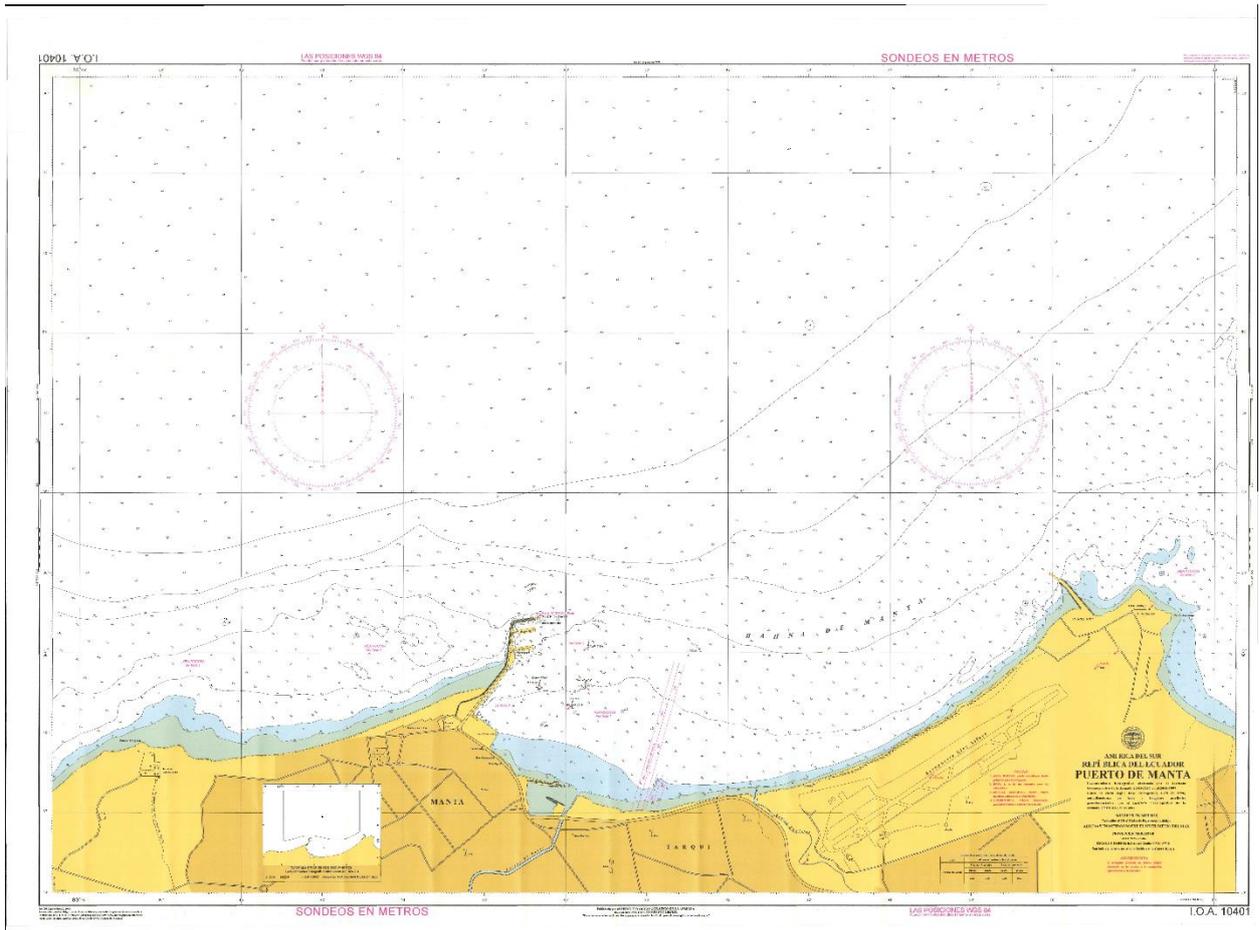


Batimetría TPM2010

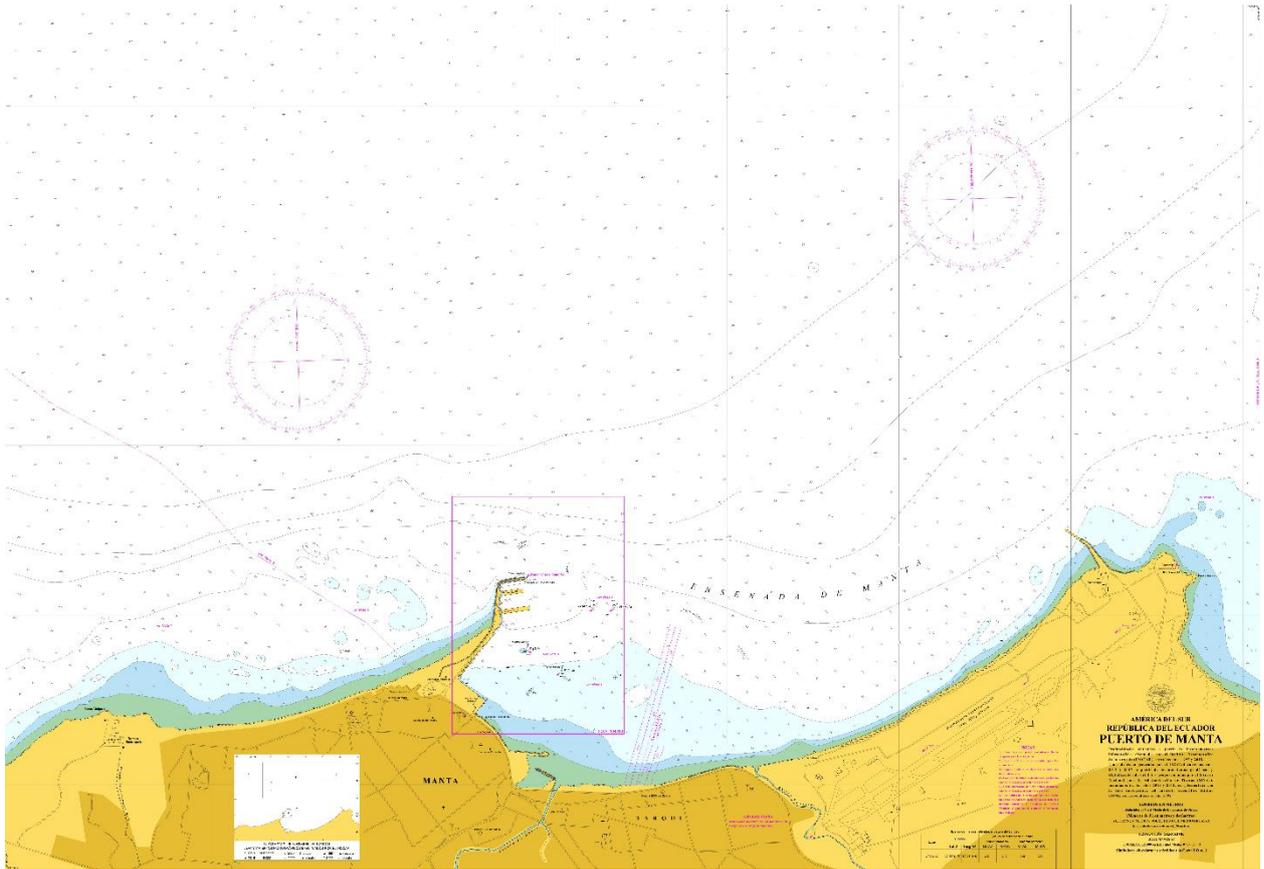


Batimetría TPM 2020

APÉNDICE F. Cartas Náuticas INOCAR



Carta Náutica IOA 10401 2008



Carta Náutica IOA 10401 2018