

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

“Estudio del proceso erosivo en la Playa Humboldt, Cantón General Villamil Playas, y
Desarrollo de soluciones conceptuales para su mitigación, (periodo 2006 -2023)”

INGE-2236

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Oceanográfico

Presentado por:

Fabian Alexander Benavides Urrunaga

Marcela Belén Córdova Córdova

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres que son el motor de mi vida y me han apoyado desde el comienzo de este arduo camino.

A mí por seguir adelante y nunca rendirme.

- Fabián Benavides Urrunaga

Dedico este trabajo a mis padres por ayudarme en todo lo que necesitaba.

A mis hermanos por apoyarme en cada paso y nunca dejarme sola.

A mis amigos y enamorado que siempre estuvieron para mí cuando más los necesité

¡Gracias por el apoyo incondicional!

- Marcela Córdova Córdova

Agradecimientos

A Dios damos gracias por permitirnos terminar este proyecto que parecía eterno.

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor M.Sc. Eduardo Cervantes por su apoyo incondicional y su guía en completar este trabajo.

Agradecemos a todo el cuerpo de profesores de la carrera que nos proporcionaron ayuda en el desarrollo de este proyecto. En especial al M. Sc. Carlos Martillo que nos brindó su apoyo y conocimiento para la realización en este proyecto.

Agradecemos a nuestros compañeros que nos ayudaron en la salida de campo de manera desinteresada.

Agradecemos a la Alcaldía del cantón Playas por formar parte de este proyecto y brindarnos la ayuda cuando más se lo necesitaba. En especial a la Ing. Karen Lindao y al Geól. Christian Lindao.

Declaración Expresa

Nosotros Fabian Alexander Benavides Urrunaga y Marcela Belen Cordova Cordova acordamos y reconocemos que:

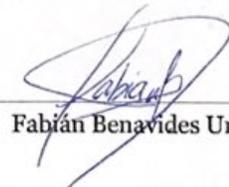
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

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

Guayaquil, 29 de Enero del 2023



Marcela Córdova Córdova



Fabian Benavides Urrunaga

Evaluadores

Jorge Espinoza A. M.Sc.

Profesor de Materia

Eduardo Cervantes M.Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

En la playa Humboldt del cantón General Villamil Playas, la amenaza de la erosión se ha convertido en un desafío crítico que afecta directamente a la comunidad local. El avance del mar hacia las costas compromete las actividades económicas fundamentales, generando repercusiones significativas en la vida de los habitantes. Ante esta problemática, se llevó a cabo un estudio del proceso erosivo en la mencionada playa mediante imágenes satelitales y el código CoastSat. Los resultados revelaron que la mayor tasa de erosión alcanzó los 3.5 metros por año, localizándose en la zona de mayor curvatura de la playa. Esta aceleración erosiva se atribuye a complejas interacciones marino-costeras, influidas por la geometría específica del lugar. Como respuesta a esta situación, se proponen soluciones conceptuales de Ingeniería Hard y Soft, como estructuras de protección paralelas y rellenos de playa. Sin embargo, la implementación exitosa de estas propuestas requiere un monitoreo continuo y detallado de la playa, respaldado por modelados computacionales que evalúen las posibles implicaciones de estas estructuras en la dinámica costera. Este enfoque integral es esencial para garantizar la sostenibilidad a largo plazo y preservar las actividades vitales para la comunidad local.

Palabras Clave: Erosión, CoastSat, Ingeniería Hard, Ingeniería Soft, Tasas de erosion, soluciones conceptuales

Abstract

In the Humboldt beach of the General Villamil Playas canton, the threat of erosion has become a critical challenge that directly affects the local community. The advance of the sea towards the coast compromises fundamental economic activities, generating significant repercussions in the lives of the inhabitants. In response to this problem, a study of the erosion process on the aforementioned beach was carried out using satellite images and the CoastSat code. The results revealed that the highest erosion rate reached 3.5 meters per year, located in the area of greatest curvature of the beach. This erosional acceleration is attributed to complex marine-coastal interactions, influenced by the site-specific geometry. In response to this situation, Hard and Soft Engineering conceptual solutions are proposed, such as parallel protection structures and beach fills. However, the successful implementation of these proposals requires continuous and detailed monitoring of the beach, supported by computational modeling to assess the potential implications of these structures on coastal dynamics. This comprehensive approach is essential to ensure long-term sustainability and preserve vital activities for the local community.

Keywords: Erosion, CoastSat, Hard Engineering, Soft Engineering, Erosion Rates, Conceptual Solutions

Índice General

Resumen	I
Abstract.....	II
Índice General.....	III
Abreviatura	VII
Simbología	VIII
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas.....	XI
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción de la Problemática.....	3
1.2 Justificación del Problema.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Marco Teórico	5
1.4.1 Área de estudio	5
1.4.2 Características Geomorfológicas	6
1.4.3 Oleaje	7
1.4.4 Marea	8
1.4.5 Vientos	8
1.4.6 Erosión.....	9

1.4.7	Soluciones ingenieriles.	11
1.4.8	Modelamiento de la línea de costa	12
1.4.9	Sistemas de Información Geográfica (SIG).	14
1.4.10	Transporte de sedimentos.	15
1.4.11	Transporte longshore.....	15
1.4.12	Transporte Onshore-offshore	16
1.4.13	Tipo de ola rompiente.....	16
1.4.14	Estado morfodinámico	17
	Capítulo 2.....	2
2.1	Metodología.....	19
2.2	Etapa 1: Recopilación de Información y definición de objetivos para la investigación.....	20
2.2.1	Conocimiento de una necesidad de la ciudadanía.....	20
2.2.2	Revisión de información secundaria.	20
2.2.3	Definición de problemática	20
2.3	Etapa 2: Primeros pasos para caracterizar la Playa	21
2.3.1	Obtención de data histórica de vientos y oleaje en aguas profundas	21
2.3.2	Proceso generado por método computacional	22
2.4	Etapa 3: Obtención de histórico de línea de costa	24
2.4.1	Uso del código de CoastSat.....	24
2.4.2	CoastSat: Obtención de imágenes satelitales	25
2.4.3	Corrección de georreferenciación.....	25
2.4.4	CoastSat: Obtención de línea de costa.....	25
2.4.5	Corrección de Mareas	26

2.5	Etapa 4: Retroceso de línea de costa.....	27
2.5.1	DSAS: Cuantificación de retroceso de línea de costa	27
2.6	Etapa 5: Validación de datos.....	28
2.6.1	Salida de campo.....	28
	Capítulo 3.....	32
3	Resultados y Análisis.....	33
3.1	Resultados de retroceso de línea de costa con DSAS	33
3.1.1	Tasas de erosión.....	35
3.1.2	Análisis de retroceso de línea de costa	38
3.2	Sectorización <i>del área de estudio</i>	39
3.3	Salida de campo:	44
3.3.1	Observaciones de Oleaje.....	46
3.3.2	Ortogonal y Línea de Playa.....	48
3.3.3	Corriente Litoral.....	49
3.3.4	Perfiles de Playa.....	50
3.3.5	Granulometría de las estaciones y obtención del D50	53
3.3.6	Clasificación del tipo de ola rompiente	56
3.3.7	Estado morfológico de la playa.....	57
3.3.8	Transporte de sedimentos.	58
3.3.9	Resumen de resultados encontrados en la caracterización litoral.	61
3.4	Análisis descriptivo de la playa	62
3.5	Propuesta de Soluciones Conceptuales.....	66
3.5.1	Primera Propuesta: Implementación de Rompeolas Sumergidos y Emergidos.....	67

3.5.2	Dimensionamiento conceptual.....	73
3.5.3	Propuesta 2: Sand Motors, geotubos y arrecifes artificiales.....	75
3.5.4	Dimensionamiento conceptual.....	77
3.6	Herramientas previas antes de ejecutar cualquier propuesta: Plan de Manejo de la Playa	80
3.7	Ventajas y Desventajas generales por cada estructura propuesta.	83
3.8	Análisis de Costos.....	84
3.8.1	Costos referenciales de la propuesta 1 Rompeolas emergidos y sumergido.	84
3.8.2	Costos Referenciales de la propuesta 2: Sand Motor, geotubos y arrecifes de coral.	87
	Capítulo 4.....	97
	Conclusiones y Recomendaciones	97
4.1	Conclusiones.....	97
4.2	Recomendaciones.....	98
	Bibliografía	100
	Anexo 6: Diseño del rompeolas.....	13

Abreviatura

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
INOCAR	Instituto Oceanográfico de la Armada
SBN	Soluciones Basadas en la Naturaleza
WLR	Weighted Linear Regression
LEO	Litoral Environment Observation
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
LRR	Linear Regression Rates

Simbología

Hs	Altura significativa de ola
Hmax	Altura máxima de ola
Ws	Velocidad de caída
T	Periodo
m	Metros
s	Segundos
SW	Suroeste
m/s	Metros sobre segundos
kg	Kilogramo
cm	Centímetro
mm	Milímetro

Índice de Figuras

Figura 1. 1 <i>Área de estudio</i>	6
Figura 1. 2 <i>Geomorfología desde la Playa Posada hasta la playa Humboldt</i>	7
Figura 2. 1 <i>Diagrama de Flujo de la Metodología</i>	19
Figura 2. 2 <i>Boya virtual usada para obtención de data de oleaje y viento</i>	22
Figura 2. 3 <i>Diagrama de Flujo simplificado para la obtención de resultados en CoastSat</i> ..	24
Figura 3. 1 <i>Líneas de costa del segundo análisis corregidas con la corrección de marea</i> ..	35
Figura 3. 2 <i>Ubicación de los transectos de forma gráfica en el área de estudio</i>	37
Figura 3. 3 <i>Tasas de erosión de los análisis 2004-2023 y 2006-2023, con el número de transecto ubicado en la zona de estudio</i>	37
Figura 3. 4 <i>Comparación de línea de costa desde el 2006-2023 por año</i>	39
Figura 3. 5 <i>Sectorización por uso de suelo</i>	41
Figura 3. 6 <i>Sectorización por tasa de erosión</i>	41
Figura 3. 7 <i>Mapa de sectorización final</i>	43
Figura 3. 8 <i>Ubicación de las estaciones en tierra para la salida de campo</i>	45
Figura 3. 9 <i>Promedio de altura de ola en rompiente vs tiempo</i>	47
Figura 3. 10 <i>Histograma de periodo observado in situ</i>	47
Figura 3. 11 <i>Perfiles de Cuadratura</i>	52
Figura 3. 12 <i>Perfiles en Sicigia</i>	52
Figura 3. 13 <i>Promedio del Diámetro promedio (D_{50}) de las muestras de arena</i>	55
Figura 3. 14 <i>Transporte de sedimentos de las estaciones de la salida de campo del 1 de julio del 2023</i>	60
Figura 3. 15 <i>Esquematización de la influencia de un espigón en una playa</i>	63
Figura 3. 16 <i>Variación de ángulo de oleaje con respecto a la línea de agua para cada estación de control</i>	65

Figura 3. 17 <i>Efectos de la morfología de la playa en rompeolas paralelas</i>	68
Figura 3. 18 <i>Diferencia entre rompeolas emergidos y sumergidos, corte transversal</i>	69
Figura 3. 19 <i>Ortofoto obtenida en febrero del 2009, en donde se muestra un sistema de rompeolas sumergidos en Sunny Isles, Estados Unidos produciendo salientes</i>	69
Figura 3. 20 <i>Deslizamiento del manto principal en la cabeza del espigón, evidenciando la caída de barandales y constituyendo una zona de peligro para los usuarios</i>	71
Figura 3. 21 <i>Imagen tomada desde el lado derecho del espigón</i>	71
Figura 3. 22 <i>Esquematización de la primera propuesta</i>	74
Figura 3. 23 <i>Ejemplo gráfico de la colocación de los geotubos en el frente de playa</i>	75
Figura 3. 24 <i>Mapa de implementación de las soluciones de Sands Motors, arrecifes de coral y geotubos en la zona de estudio</i>	76
Figura 3. 25 <i>Perfiles de avance de línea de costa</i>	78

Índice de Tablas

Tabla 3. 1 Líneas de costa de utilizadas en los dos análisis descritos, con las alturas de marea originales.....	34
Tabla 3. 2 Tasas de erosión de los análisis correspondientes a los dos grupos de años [m/año].....	36
Tabla 3. 3 Clasificación de tasa de erosión basada con base a LRR.....	42
Tabla 3. 4 Resultados de DSAS, correspondiente a la variable LRR, obtenidos del segundo análisis (2006-2023).....	42
Tabla 3. 5 Tabla de mareas de la estación Datos de Posorja para la salida de campo	44
Tabla 3. 6 Sectores y ubicación de las estaciones	45
Tabla 3. 7 Promedio, máximo y mínimo de altura de olas observadas en sicigia de cada estación	46
Tabla 3. 8 Periodo promedio, máximo y mínimo por cada estación.....	48
Tabla 3. 9 Ortogonal de la ola, dirección de línea de playa y ángulo Alpha de datos de salida de campo, 1 julio	49
Tabla 3. 10 Promedios, máximos y mínimos de la corriente litoral medidas in situ	49
Tabla 3. 11 Pendiente de cada estación para cuadratura y sicigia.....	51
Tabla 3. 12 Clasificación de la pendiente de playa	51
Tabla 3. 13 Diámetros medio, efectivo, D14, D84, desviación estándar y coeficiente de asimetría	54
Tabla 3. 14 Surf similarity con el uso del Parámetro de Iribarren.....	57
Tabla 3. 15 Clasificación de la playa con el número de Dean	58
Tabla 3. 16 Clasificación del número de Dean	58
Tabla 3. 17 Transporte de sedimento de CERC.....	59
Tabla 3. 18 Resumen de resultados obtenidos	61
Tabla 3. 19 Deseos y necesidades observadas por sector	67

Tabla 3. 20 Dimensiones de las estructuras de la propuesta de rompeolas emergidos y sumergido.....	73
Tabla 3. 21 <i>Parámetros necesarios para los cálculos de volumen</i>	77
Tabla 3. 22 Ventajas y desventajas de las soluciones.....	83
Tabla 3. 23 <i>Costos Referenciales Rompeolas 1</i>	85
Tabla 3. 24 <i>Costos Referenciales Rompeolas 2 y 3</i>	86
Tabla 3. 25 <i>Resumen de Costos Referenciales de la propuesta</i>	87
Tabla 3. 26 <i>Costos Referenciales del sand motor, geotubos y arrecifes artificiales</i>	88
Tabla 3. 27 <i>Resumen de costos referenciales de la propuesta 2</i>	89

Capítulo 1

1. Introducción

Una de las grandes preocupaciones en las zonas costeras es la erosión; tiene impactos que afectan a los ecosistemas, comunidades y actividades humanas que se desarrollan en la zona como el turismo, la pesca, el transporte marítimo, el desarrollo urbanístico, entre otros. Según el estudio publicado por la revista científica *Nature Climate Change*, la mitad de las playas de arena del mundo corren el riesgo de desaparecer a finales del siglo por la erosión costera (BBC News Mundo, 2020). Entre los principales impactos está la pérdida de playas, en lugares donde se desarrollan actividades recreativas y de turismo, afectando a la economía local asociada a estas áreas. La erosión costera tiene impactos negativos en los ecosistemas costeros, la reducción de estos hábitats puede ocasionar pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos, y degradación del medio ambiente. Estos hábitats como playas, dunas, humedales, manglares, entre otros, proporcionan protección costera actuando como barrera natural ante tormentas y eventos extremos. Cuando se produce la erosión costera y existe reducción o pérdida de los ecosistemas marino-costeros, las comunidades quedan expuestas a un mayor riesgo de tormentas y eventos extremos, causando graves problemas como inundaciones y daños a la infraestructura, resultando en costosas reparaciones y en casos extremos, desplazamientos de la comunidad.

La erosión de una playa se da de manera natural o inducida por las actividades antropogénicas presentes en el sitio o cerca de él. Entre las actividades inducidas por la acción humana que pueden provocar erosión podemos encontrar la construcción de estructuras costeras. Esta ocurre cuando la infraestructura construida afecta a los procesos naturales de la playa. La dinámica del sitio es afectada en el transporte de sedimentos, teniendo como consecuencia la pérdida de arena y la erosión de la línea de costa.

Las estructuras costeras como espigones, diques y rompeolas son construidas con el propósito de proteger la zona costera, proporcionar zona de abrigo, disminuir la acción del oleaje, entre otras, sin embargo, existen consecuencias no deseadas, como la erosión costera por la construcción de estas estructuras, que se pueden visualizar a corto, mediano o largo

plazo. Las estructuras pueden obstaculizar el flujo de sedimentos, resultando en la disminución de la cantidad de arena que llega a las playas; por ejemplo, la presencia de un espigón puede interrumpir la circulación del agua y por ende el flujo de sedimentos, causando un sitio de acumulación y de erosión al otro extremo.

En el cantón Playas, a la altura del sector Humboldt existe una estructura costera, un espigón en “L”, mejor conocido como el rompeolas de Humboldt. Esta es una estructura con historia y antigüedad que ha beneficiado a la comunidad a lo largo de los años de vida del espigón, debido a que, ha proporcionado zona de calma para realizar actividades de la pesca, recreativas y de turismo, cumpliendo la función de disminuir la energía de ola. Sin embargo, según lo mencionado por Sánchez (1978) la influencia de la estructura más el ángulo de oleaje, debido a la orientación de la playa a la derecha del espigón (47° con respecto al norte), puede generar una gran erosión en las zonas aledañas del mismo observándose un retroceso significativo de la línea de costa, en los últimos años.

En este documento se plantea conocer de forma cuantitativa el retroceso de línea de playa desde el año 2004 mediante imágenes satelitales obtenidas de plataformas de teledetección. Para comprender la dinámica de la playa se realizó una salida al campo siguiendo la metodología propuesta por CERC de recolección de datos del programa Observación del Ambiente Litoral (Litoral Environment Observation, LEO). El problema de erosión se va a abordar mencionando soluciones conceptuales basándose en ejemplos que se han aplicado en otros sitios y que mejor se adapten a la dinámica de esta playa de estudio.

1.1 Descripción de la Problemática

En los últimos años, se ha observado un creciente proceso de erosión en la playa de Humboldt. Esto ha disminuido la franja de arena, principal defensa contra las olas durante la época de aguaje, obligando a los pescadores a colocar sus embarcaciones en la vereda para protegerlas. También ha limitado las actividades económicas en la costa, como el alquiler de carpas y los restaurantes. El Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) municipal desconoce la magnitud del problema en el sector Humboldt, lo que dificulta la implementación de

soluciones efectivas para mejorar la calidad de vida de los residentes. Por lo tanto, se propone analizar la dinámica litoral de la playa y el proceso de erosión en esta área para cuantificar la tasa anual de retroceso de línea de costa mediante el uso de sensores remotos y plataformas satelitales. Para con ello poder, proponer soluciones conceptuales que mitiguen y controlen la erosión.

1.2 Justificación del Problema

La importancia de abordar esta problemática radica en varios aspectos. En primer lugar, la erosión costera afecta directamente a la comunidad local y a las actividades económicas que dependen del uso de la playa, como es la pesca y el turismo. La disminución de la franja de arena limita las oportunidades de desarrollo económico en el área a las personas que realizan actividades de alquiler de carpas y parasoles, a los dueños de restaurantes, debido a que hay menor cantidad de ingreso de turistas en la franja de arena.

Otro aspecto relevante es la reducción de la principal defensa contra las olas, afectando a los pescadores que necesitan proteger sus embarcaciones en época de tormenta o eventos extremos, por lo que, en aguajes deben colocar sus embarcaciones en partes más altas que no estén en contacto directo de las olas que llegan a la playa, por ejemplo: colocar en la vereda o en la calle principal, esto afecta al paisajismo y no es bien visto para la afluencia del turista.

En el año 2019, se realizó el reporte estadístico de “perdida de playa” dentro del sector del Área Nacional de recreación de playa en el sector Humboldt, por Orlin Quinde (Guardaparque del Área Nacional de Recreación Playas Villamil), en donde, se refleja una pérdida de franja costera dentro del periodo que va desde el 2004 al 2019. Generando un precedente para analizar de manera exhaustiva dicho sector que permita verificar, cuantificar el proceso de erosión existente y recomendar soluciones conceptuales para mitigar dicha problemática, y así, poder ayudar a las autoridades a implementar medidas adecuadas de solución que contribuyan al desarrollo sostenible de la zona y mejoren la calidad de vida de los residentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento erosivo en la zona denominada playa Humboldt y su zona adyacente del cantón Playas, como apoyo a la toma de decisiones para la mitigación de sus efectos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calcular el retroceso de línea de playa mediante sensores remotos, imágenes satélites y programas de información geográfica.
- Analizar de manera descriptiva la dinámica de la playa y el proceso erosivo.
- Proponer soluciones conceptuales a la problemática encontrada

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Área de estudio

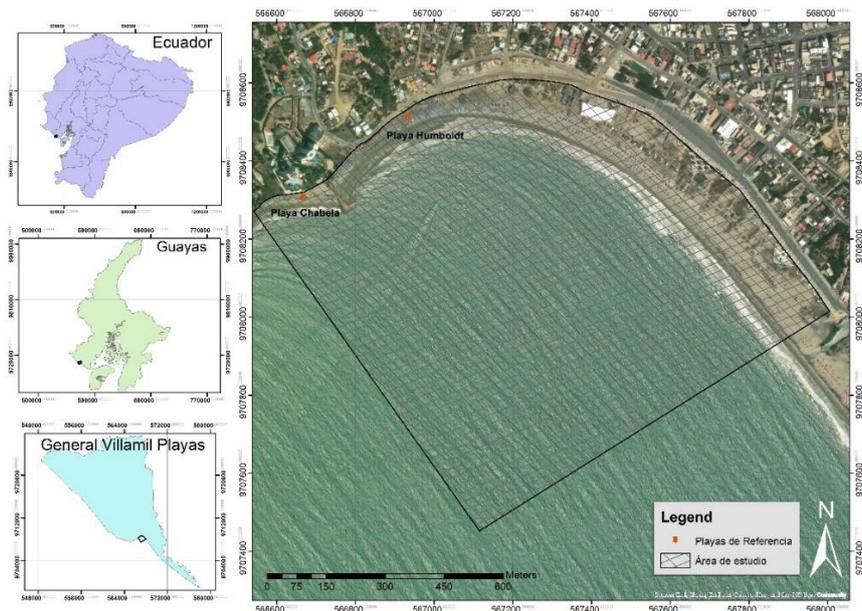
El cantón General Villamil Playas está ubicado al suroeste de la provincia de Guayas. Su cabecera cantonal es la ciudad de General Villamil, más conocido como “Playas”. Según datos del INEC del censo del 2010, General Villamil tenía una población de 41 935 habitantes con proyecciones al 2020 de 59 628 (INEC, 2022). La extensión del área del cantón es de 279,90 km² (Andrade & García, 2002). Sus playas son muy visitadas por habitantes de la provincia del Guayas y de otras partes del país, siendo su principal atractivo turístico su extensa playa de 14 km de arenas blancas va desde la ciudad de General Villamil hasta el poblado de Data de Posorja (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2015).

Para el presente proyecto, el área de estudio comprende las playas Chabela y Humboldt ubicadas a la derecha e izquierda, mirando al mar, respectivamente con referencia al espigón denominado “Humboldt”. Con una extensión de playa de aproximadamente 1,8 km de distancia, los sectores de interés son el área de acreción, del lado derecho del espigón, el área de erosión por la presencia del espigón y la zona adyacente que presenta una posible erosión natural. El lugar de estudio es uno de los puntos más concurridos por los turistas para desarrollar sus actividades de sol y playa, además de proporcionar espacios de desarrollo de

actividades económicas para los ciudadanos. En el sector de interés, también se puede encontrar la zona de botes y lanchas que son utilizados para desarrollar la actividad pesquera, las embarcaciones ocupan una parte de la limitada franja de arena existente en el sitio. A continuación, se presenta en la figura 1.1 una representación visual de la forma y longitud del área de estudio.

Figura 1. 1

Área de estudio



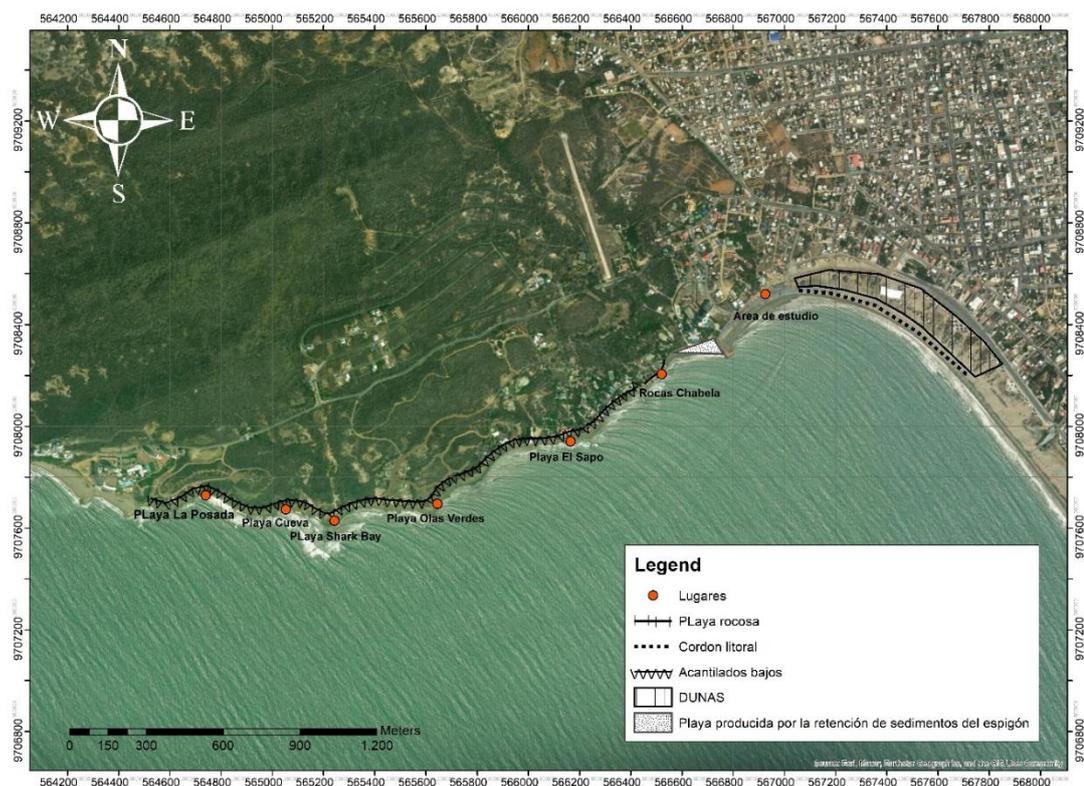
1.4.2 Características Geomorfológicas

El área de estudio presenta una composición geológica diversa. En el norte, se encuentran sedimentos correspondientes a la formación terciaria del Eoceno Superior. En esta zona, también se pueden hallar fragmentos del complejo Olistostrómico Santa Elena, que consisten en olistolitos de diferentes épocas, incluyendo el Eoceno y Cretácico. Por otro lado, en el sur del área de estudio, predominan los sedimentos de la formación cuaternaria, que por los levantamientos de la corteza terrestre desde el fondo ha generado la presencia de terrazas marinas o Tablazo (Baldock, 1982). Desde el punto de vista geomorfológico, en el norte del espigón, específicamente desde playa la Posada hasta Playa “El sapo” se observan acantilados bajos que generan una ligera ondulación en las costas planas (Ayón, 1988). Luego se observa presencia de playas rocosas desde la Playa el “Sapo” hasta las Rocas Chabela, llegando a la

playa producida por la retención de sedimentos dada por el espigón. Por otro lado, al sur del espigón, la geomorfología cambia, y se caracteriza por la presencia de cordones litorales. En esta zona Ayón (1988), menciona que “se puede encontrar una costa rectilínea y baja, acompañada de un pequeño campo de dunas”. Actualmente, en dicho sector se puede encontrar diferentes instalaciones costeras temporales, cabañas, utilizadas para fines turísticos. En la figura 1.2, se ilustra gráficamente esta configuración costera.

Figura 1. 2

Geomorfología desde la Playa Posada hasta la playa Humboldt



Nota: En la figura se presenta la geomorfología en las zonas adyacentes del área de estudio, con el propósito de una caracterización más completa desde el punto de vista geomorfológico.

1.4.3 Oleaje

La generación de olas en mar abierto se da por la acción del viento contra la superficie del agua transfiriendo parte de su energía, causando un movimiento de las partículas de agua sobre la superficie del océano (NOAA, 2023). Las olas conforman la mayor fuente de energía en la zona litoral y parte de su energía que llega a la costa es reflejada hacia el mar y otra parte

es transformada para generar corrientes costeras y el transporte de sedimentos paralelo y transversal de la costa. Las teorías de olas nos ayudan a determinar las propiedades de las olas; altura, dirección, periodo, velocidad, desde el momento que se genera la ola en mar abierto hasta llegar a aguas costeras (Guisado Pintado et al., 2010). En el paper titulado “*Caracterización oceanográfica de la costa central ecuatoriana entre la Punta del Morro y Jaramijó, Ecuador*”, se investigaron las condiciones de oleaje presentes en dicha área. Para ello, se generó una sectorización basada en las condiciones geomorfológicas del lugar. En el cual, nuestra área de estudio se encuentra dentro de la zona comprendida entre Chanduy y la punta del Morro. Durante el estudio, se registraron valores de altura de ola significativa (H_s) y altura máxima (H_{max}) de 0.9 m y 2.6 m respectivamente, en la profundidad de 14 m, con una dirección dominante proveniente del suroeste (SW) y un periodo de ola promedio (T) de 14s (Vera et al., 2009).

1.4.4 Marea

Ecuador posee un tipo de marea semidiurna (Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada, 2001), es decir, se presentan dos pleamares y dos bajares en un ciclo de 24 horas. Este ascenso y descenso del nivel del agua crea una denominada zona intermareal dentro el perfil de playa. Para conocer el rango de marea en un sector específico, desde el 2003 el Instituto Oceanográfico y Antártida de la Armada (INOCAR) ha colocado diferentes mareógrafos a lo largo de la costa ecuatoriana. Para nuestra área de estudio se ha seleccionado el mareógrafo “Data Posorja” por ser el más cercano a nuestra área de interés. En un análisis de la data histórica desde el 2003 hasta el 2023, en dicho sector se ha registrado una altura máxima en pleamar de 2.8 m y una altura mínima de -0.5 m (Instituto Oceanográfico y Antártida de la Armada, 2023), dando como un resultado un rango de marea máxima registrada de 3.3 m.

1.4.5 Vientos

Los vientos son flujos de aire a gran escala en la atmosfera que se mueven por las diferencias de presión atmosférica (Günter Dietmar, 2003). Los vientos se pueden desglosar

en dos componentes como son la magnitud (fuerza) y dirección desde donde sopla. La predominancia de los vientos frente a las costas de Ecuador son de caracterización vientos alisios (dirección este a oeste), debido a su ubicación en latitudes subtropicales. El centro de presión del Pacífico Sur genera flujos de vientos predominantes del sur con componente oeste (Portilla Diaz & Coello Garnica, 2022), que chocan frente a las costas ecuatorianas del centro y sur mayormente. En “General Villamil Playas” los vientos predominantes vienen del suroeste (SW) según los datos obtenidos por el sistema de WAVEWATCH III, el cual, son boyas virtuales que recolectan información de magnitud y dirección de: oleaje y vientos en aguas profundas. Debido a que queremos caracterizar la playa, es más conveniente usar valores registrados cerca de la zona costera.

1.4.6 Erosión

1.4.6.1 Causas de la erosión. La erosión de las playas es un problema ampliamente reconocido en la actualidad, caracterizado por la pérdida de sedimentos y el retroceso de la línea costera. Este fenómeno puede tener dos causas principales: procesos naturales y actividades humanas; la velocidad de este proceso puede variar en el espacio y en el tiempo dependiendo de la causa (Carranza-Edwards, 2010).

En los procesos naturales, la interacción del oleaje es uno de los principales impulsores de la erosión. Las olas que llegan a la costa impactan directamente provocando erosión y desgaste de los materiales. La acción del oleaje se disipa en las orillas, generando la remoción de sedimentos, y su dirección influye en el movimiento del sedimento suspendido. La acción de las corrientes transporta sedimentos a lo largo de la costa, depositándolo en algunas áreas y erosionando otras. La corriente litoral es la principal causa que impulsa al transporte de sedimentos a lo largo de la costa y el transporte perpendicular a la costa y la corriente de resaca transporta sedimentos hacia afuera de la costa, generando erosión.

Otras causas naturales son los eventos climatológicos, como las tormentas, huracanes, que dan una respuesta de erosión a corto plazo. Por otra parte, existen otros fenómenos naturales que pueden incidir en el perfil de playa, resultando en un proceso erosivo temporal.

Tal es el caso del fenómeno ENSO positivo (El Niño), en donde, en los eventos más extremos sucedidos en Ecuador se ha registrado un aumento del nivel del mar de hasta 0.5 metros aproximadamente (Corporación Andina de Fomento, 1998), generando una inesperada interacción de oleaje en la parte más alta del perfil de playa, moviendo los sedimentos, empujando el perfil y reduciendo su inclinación.

Por otro lado, las actividades antropogénicas también contribuyen a la erosión costera. Según Trista et al. (2012) las construcciones de estructuras costeras, como espigones o rompeolas, pueden alterar los patrones de corrientes litorales, lo que resulta en la erosión de las playas. Así como, el desvío de ríos, los proyectos de dragado con fines mineros, el deterioro de los ecosistemas de arrecifes y la construcción de infraestructuras sobre las dunas pueden obstruir la dinámica costera disminuyendo así la alimentación de sedimentos dentro del perfil.

1.4.6.2 Impactos de procesos erosivos. Los impactos de los procesos erosivos se pueden manifestar de diferentes formas, y se reflejan dentro de los sectores: económico, social y ambiental (Valdez Zertuche et al., 2015). Los impactos pueden ser de pequeña a gran escala y sus consecuencias se manifiestan en cortos o largos plazos. En los impactos socioeconómicos, el daño a infraestructura y bienes como edificios, carreteras, casas, entre otras es el más común. Representan grandes costos para su reparación o reconstrucción, afectando a las entidades encargadas del bien. La pérdida de los bienes puede impactar en la economía local y a los pobladores. La erosión reduce el tamaño de las playas perdiendo poco a poco el atractivo del destino turístico, disminuyendo la afluencia de turistas y afectando la economía local que depende del turismo. Si la erosión costera continua en un área, esto conlleva a imponer medidas de desplazamiento o migración para evitar perjuicios contra su vida.

Los impactos socioambientales abarcan aspectos, como, la pérdida de hábitats costeros, degradación de los recursos de las zonas costeras y alteración de ecosistemas (Rivera-Arriaga et al., 2020). La erosión costera puede resultar en la pérdida de dunas, playas, manglares y marismas, ecosistemas vitales en la conservación y protección de la biodiversidad y el

desarrollo sostenible de los servicios ecosistémicos que ofrece. La alteración de los hábitats conlleva a cambios de la morfología costera afectando al equilibrio de la playa, así como a los habitantes que dependen de la condición geomorfológica. Los recursos pesqueros también son afectados, debido a que la erosión puede alterar los hábitats marinos y la productividad de las áreas costeras.

1.4.6.3 Alternativas para el control de erosión. Una vez que se ha identificado un proceso erosivo dentro del área de estudio, Trista et al. (2012) menciona que para el control del proceso de recesión se debe trabajar en conjunto con tres ejes fundamentales que son: Legal, Científica e Ingeniería. Estos ejes se complementan para tomar las acciones y decisiones para su mitigación y control.

El aspecto científico, se refiere al estudio a profundidad de los procesos costeros y la identificación de las causas y la magnitud de la erosión en el área de estudio. El aspecto legal, es la aplicación de normas o diseños de planes de manejo integrado para regular, controlar y administrar los recursos costeros hacia un uso sostenible. Por último, el aspecto ingenieril, se refiere al diseño y ejecución de soluciones costeras para recuperar o mantener la playa (Tristá Barrera et al., 2012).

1.4.7 Soluciones ingenieriles.

Para la recuperación o mantenimiento de la playa, a lo largo de la historia, en el aspecto ingenieril se han enfrentado los problemas de erosión a través de tres tipos de soluciones: El primero, se trata de soluciones “estructurales” o “duras”, que hace referencia a la construcción de estructuras resistentes, que se clasifican según la posición en la que es construido respecto a la línea de costa (Chico Ramírez & Tapias Vargas, 2014). Según U.S Army Corp Engineers (2002) la más notables son: los espigones, rompeolas, malecones, revestimientos y diques. Sin embargo, estas medidas pueden repercutir negativamente en la dinámica natural de la playa, generando erosión de las zonas adyacentes y un impacto ambiental tanto al suelo como al entorno del área donde se lo construye.

La segunda, se trata de soluciones no estructurales o Suaves, según Ovalle (2012), son estructuras o mecanismos cuya forma y función son similares a las soluciones duras, sin embargo, los materiales son elementos prefabricados o provenientes de la zona, generando el menor impacto ambiental posible. Las soluciones suaves buscan implementar técnicas menos intrusivas para proteger las costas, las características de estas soluciones son que buscan trabajar en conjunto con la zona afectada y la constante adaptación a la dinámica de la playa (Silveira & Valla, 2023), como son los rellenos de playa, implementación de sand savers, regeneración de dunas, entre otros.

Por último, las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) aprovechan el entorno natural y de los servicios ecosistémicos con el propósito de proteger, restaurar y manejar sosteniblemente los recursos (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, 2023). Este concepto ha emergido como una alternativa o complemento para las soluciones ingenieriles tradicionales. Algunas SBN incluyen la restauración de manglares, implementación de proyectos de restauración, creación de humedales, entre otras. Cabe recalcar que estas soluciones no están regidas por lineamientos o procesos previamente establecidos, por lo que su aplicación es adaptiva al área de estudio.

1.4.8 Modelamiento de la línea de costa

1.4.8.1 Imágenes Satelitales de sensores remotos. Con la finalidad de recopilar imágenes satelitales para el análisis del retroceso de costa, se puede utilizar los satélites: Sentinel 2 y Landsat 7,8 y 9.

Sentinel-2. es un satélite europeo que ofrece imágenes multiespectrales de alta resolución y una amplia cobertura. Equipado con una cámara multiespectral, cuenta con 13 bandas espectrales, de las cuales 4 tienen una resolución espacial de 10 metros, 6 bandas tienen una resolución de 20 metros y 3 bandas tienen una resolución de 60 metros. Además, tiene una capacidad de visión de hasta 290 kilómetros de ancho. Este satélite se compone de una constelación de dos satélites idénticos que trabajan en conjunto, pero están separados por

180 grados, lo que permite una recolección óptima de datos (The European Space Agency, 2023).

Landsat 7, 8, 9. Lanzados en 1999, 2013 y 2016 respectivamente, desde California, ofrece 7 bandas con una resolución espacial de 30 metros y una banda pancromática con una resolución de 15 metros. También cuenta con un calibrador solar de apertura completa, un calibrador radiométrico y un canal infrarrojo. Desde el 2003 Landsat 7 ha experimentado problemas en la generación de imágenes debido a un fallo en el corrector de línea de escaneo (NASA, 2023).

1.4.8.2 Google Earth Engine. Es una plataforma desarrollada por Google a fines de 2010 que brinda a los usuarios acceso a imágenes de diversos satélites para llevar a cabo investigaciones y gestionar los recursos naturales (Google, 2010). Esta plataforma está conectada a varios programas satelitales y permite procesar la información sin utilizar la memoria interna de la computadora, integrando imágenes que cumplan con los requisitos del usuario. El proceso de Google Earth Engine consta de cuatro fases: la infraestructura de Google, la base de datos de satélites con acceso público a la información (como LandSat, Sentinel, Modis, entre otros), una interfaz de programa que incluye una serie de comandos y funciones preestablecidas utilizando el lenguaje de programación "Java" y un entorno (Code Editor) donde todos los elementos se unen y los usuarios pueden llamar a los datos, procesarlos y visualizarlos mediante scripts (Perilla & Mas, 2020).

1.4.8.3 GitHub. Es una plataforma de alojamiento y colaboración en repositorios remotos ampliamente utilizada en la actualidad. Permite a los usuarios registrar el desarrollo de proyectos de forma remota, facilitando la colaboración entre diferentes usuarios y brindando seguridad en la nube. GitHub funciona en conjunto con el sistema avanzado de control de versiones "Git", que es similar al "control de cambios" de Microsoft Word. Esto permite observar el progreso del proyecto, identificar al responsable de los cambios realizados y tener un registro detallado de las modificaciones efectuadas (Astigarraga & Cruz-Alonso, 2022).

1.4.8.4 Anaconda. Es un software de código abierto que proporciona un conjunto de herramientas para la investigación y la ciencia. Esta plataforma permite acceder a diversos entornos de desarrollo integrado (IDE), que son aplicaciones que facilitan la escritura, edición, visualización e inspección de datos en el desarrollo de código. Además, simplifica el proceso de mantener todas las bibliotecas actualizadas. En lugar de instalar Python y los diferentes IDE por separado, Anaconda permite realizar esta tarea con un solo clic, lo que brinda comodidad y eficiencia en el proceso de configuración (Rolon-Mérette et al., 2020).

1.4.8.5 CoastSat. Es un proyecto de código abierto desarrollado en lenguaje Python que se encuentra disponible en la plataforma GitHub. Este conjunto de código ha sido utilizado por diversos usuarios para analizar y determinar el retroceso de la línea de costa en diferentes playas arenosas alrededor del mundo. Además, gracias a la colaboración de la comunidad, ha sido probado y corregido para mejorar su funcionalidad y precisión (Vargas Romero, 2022).

1.4.8.6 Jupyter Notebook. Es una herramienta de código abierto en línea diseñada para el desarrollo y presentación de proyectos de ciencias de datos. Cada cuaderno contiene una colección de celdas y cada celda contiene texto en formato del lenguaje Markdown o un código ejecutable ya sea en el lenguaje Python o R. Cuando se ejecuta una celda de código, los resultados se presentan en el mismo documento inmediatamente debajo de la misma (Mendez et al., 2019). Esta herramienta se la puede encontrar fácilmente dentro de la interfase del software “Anaconda”.

1.4.9 *Sistemas de Información Geográfica (SIG).*

De acuerdo con Burrough et al. (1994) un SIG es un modelo informatizado de la realidad geográfica para aplicar información útil en datos y mapas. Es decir, un SIG es el conjunto de herramientas que permite analizar, administrar y visualizar a través de mapas o imágenes una serie de datos geográficos para usarlo según nuestras necesidades (Pucha-Cofrep et al., 2017).

1.4.9.1 ArcGis. Es un software privado que contiene las funciones de un SIG de escritorio, en donde, permite manejar información geográfica y visualizar a través de mapas o

imágenes. A la vez, cuenta con diferentes extensiones como Spatial Analyst, 3D Analyst o Digital Shoreline Analysis System (DSAS) el cual se mencionará más adelante (Pucha-Cofrep et al., 2017).

1.4.9.2 Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Es un sistema basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollado por el United States Geological Survey (USGS). Ofrece dos versiones: una como una extensión para ArcGIS y otra como un software en línea, brindando una experiencia rápida y eficiente. Esta herramienta tiene la capacidad de medir las variaciones en la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo, lo que permite analizar la evolución histórica de dicha línea. Además, DSAS se utiliza para diversos propósitos, como monitorear cambios en la línea de costa, estudiar el desarrollo y evolución de las áreas de anidación de gaviotas y analizar la erosión de acantilados (Thin & Hens, 2017). El software de DSAS calcula la tasa de cambio de la línea de costa utilizando datos históricos de su posición, los cuales se encuentran representados en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

1.4.10 Transporte de sedimentos.

El movimiento real de sedimento sigue un intrincado camino debido a las diferentes acciones y procesos simultáneos que existen en el agua. Este se puede clasificar dependiendo de la dirección y proximidad hacia la costa. El sedimento se mueve por la acción de corrientes costeras que pueden ser inducidas por la presencia de diferentes factores como oleaje, marea, vientos, entre otros. Así mismo, el transporte puede ser clasificado dependiendo de su dirección, transporte a lo largo de la costa, “transporte longshore”, y transporte perpendicular a la costa “Transporte onshore-offshore”.

1.4.11 Transporte longshore

El movimiento longitudinal de los sedimentos es importante en la determinación del comportamiento costero y las modificaciones morfodinámicas de las playas. Este transporte ocurre cuando las olas que se acercan a la costa lo hacen de manera oblicua. Tiene lugar entre la zona de rompiente y la línea de playa y se mueve en dirección de la componente de la energía

de oleaje paralela a la costa. Existen diferentes metodologías aplicadas para el cálculo del transporte a lo largo de la costa con la aplicación de fórmulas que contienen diferentes parámetros según sea el caso de estudio. Se han comparado las diferentes formulaciones en la costa ecuatoriana, según Vera (2007), recomienda seguir aplicando la formulación de CERC (2002), y que de manera paralela se debe aplicar otro método con el propósito de comparar resultados. Además, en estudios de los procesos erosivos, Vera (2000) ha aplicado las formulaciones de Galvin (1972), Komar (1978) y CERC (2002), concluyendo que por razones de análisis y estudios realizados en otras partes, Komar da mejor información del transporte de sedimentos. Por lo tanto, nos guiamos de estudios previos y se escogió como principal formulación la de CERC y se comparó resultados con Komar.

1.4.12 Transporte Onshore-offshore

El transporte offshore-onshore, se refiere a movimiento neto de sedimentos de forma perpendicular hacia o fuera de la costa. Esta influenciado por factores como la topografía del sitio, la pendiente de la playa, las corrientes marinas, las características de la ola y los vientos, siendo este proceso fundamental para la dinámica costera (US Army Corps of Engineers, 1984).

El transporte offshore-onshore, se refiere a movimiento neto de sedimentos de forma perpendicular hacia o fuera de la costa. Esta influenciado por factores como la topografía del sitio, la pendiente de la playa, las corrientes marinas, las características de la ola y los vientos, siendo este proceso fundamental para la dinámica costera (US Army Corps of Engineers, 1984).

1.4.13 Tipo de ola rompiente

La forma en que rompe la ola en la zona costera es distinta según las características de la playa. Existen cuatro tipos de rompiente: “plunging”, “surging”, “spilling” y “collapsing”(US Army Corps of Engineers, 2002)El tipo de ola rompiente puede ser determinado usando el parámetro de similitud de surf de Iribarren y Nogales (1949) y Battjes (1974). Según el tipo

de ola, se puede inferir de las características de la playa, como: el tipo de pendiente, los materiales sedimentarios del sitio, entre otros.

1.4.14 Estado morfodinámico

En la determinación del estado morfodinámico de la playa se utiliza algunos parámetros establecidos por algunos autores. Guza e Inman (1975) establecieron una formula con variables de frecuencia del oleaje, Dean (1977) incorpora una nueva formulación incluyendo las características del oleaje y sedimento (ver ecuación 1.2). Estos parámetros permiten diferenciar entre condiciones de zona de surf en reflectivas, intermedias y disipativas. Para el uso de este parámetro se debe calcular la velocidad de caída del grano de arena, la cual representa la velocidad en la que se asienta el sedimento una vez se haya puesto en suspensión en la columna de agua por la fuerza rompiente de la ola. En el cálculo se usa la formulación propuesta por Soulsby (1977) (ver ecuación 1.3), en la que integra un tamaño de grano adimensional, teniendo buenos resultados para la velocidad comparado con otras formulaciones como la ecuación (ley) de Stokes.

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \quad (1.2)$$

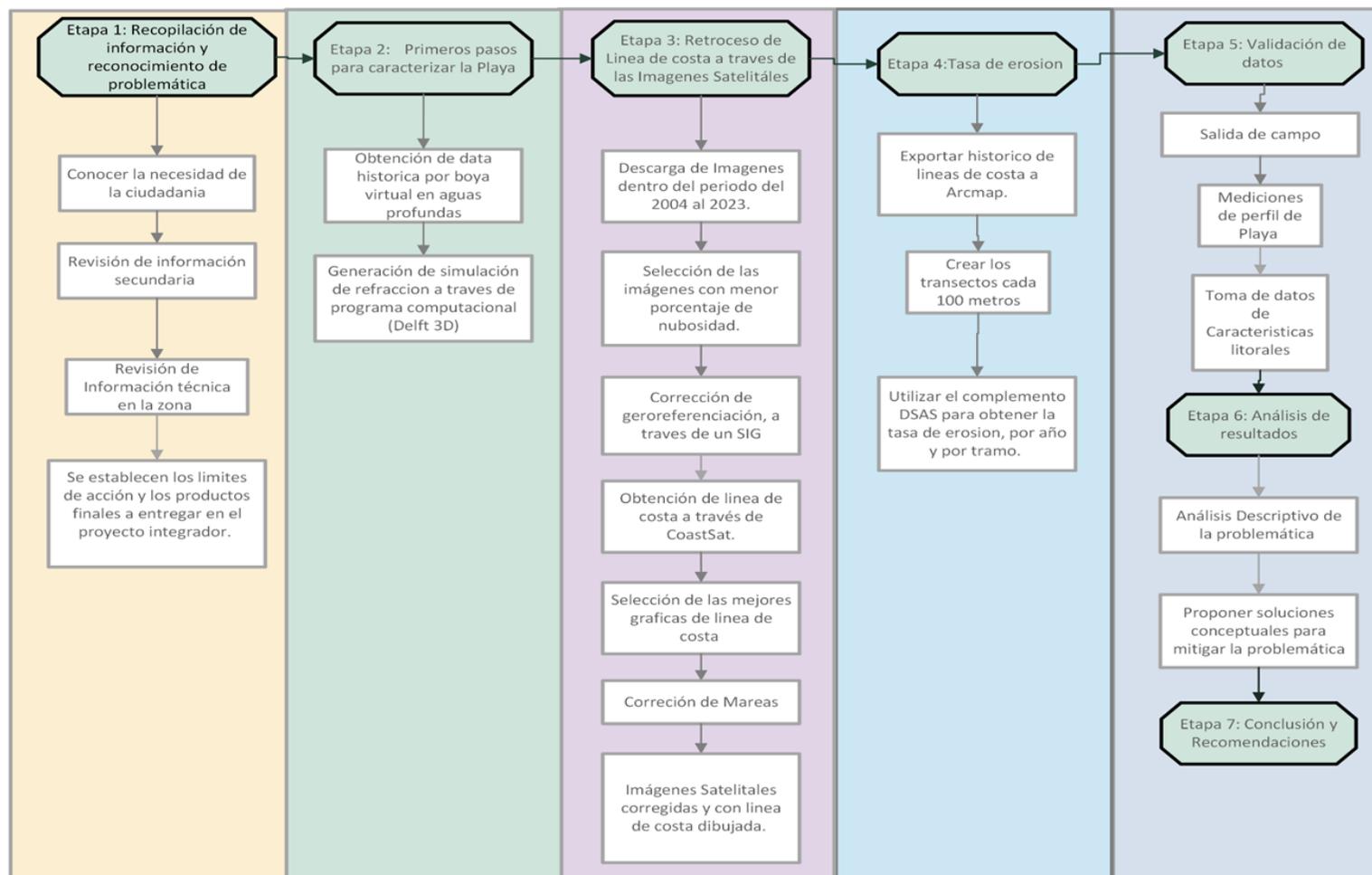
$$W_s = \frac{v}{d} [10.36^2 + 0.49 * D^3]^{\frac{1}{2}} - 10.36 \quad (1.3)$$

Capítulo 2

2.1 Metodología

Figura 2. 1

Diagrama de Flujo de la Metodología



2.2 Etapa 1: Recopilación de Información y definición de objetivos para la investigación.

2.2.1 *Conocimiento de una necesidad de la ciudadanía*

En primer lugar, se identificó una necesidad de la ciudadanía a través de la información proporcionada por el exalcalde del Gobierno Autónomo Descentralizado de Playas, Danny Mite. Él informó a la academia sobre las consecuencias que los ciudadanos que habitan en el sector Humboldt están experimentando debido a la posible pérdida de arena en su playa. Ante esta situación, se requirió la ayuda de la academia para llevar a cabo un proyecto que pudiera abordar este problema.

2.2.2 *Revisión de información secundaria.*

Con el fin de comprender a fondo el entorno del área de estudio, se llevó a cabo una investigación secundaria sobre las variables costeras presentes en sectores cercanos que fueran representativos del área de estudio. También se buscó información técnica y estudios realizados en el sector Humboldt específicamente, pero no se pudo obtener información confiable en términos técnicos sobre el monitoreo de las playas en el área de estudio. A pesar de esto, se obtuvo un marco de referencia sobre el posible comportamiento costero en el área de estudio.

Además, se revisó diferentes conceptos, mecanismos de identificación y mitigación utilizados en todo el mundo para abordar la erosión costera. Esto se hizo con el objetivo de identificar la magnitud del problema en el área de estudio y definir la problemática que se abordará en el proyecto integrador.

2.2.3 *Definición de problemática*

Una vez que se conoció la necesidad de la población, se llevó a cabo una investigación secundaria sobre casos de erosión en diferentes partes del mundo y se obtuvo información técnica disponible sobre el sector Humboldt. Con base en esto, se procedió a definir la

problemática y los objetivos que se pretenden alcanzar. Sin embargo, debido a la falta de información técnica y monitoreo de la playa, no es posible proponer soluciones específicas para el sector Humboldt, ya que no se cuenta con un historial de cambios en las playas a lo largo del tiempo. Por lo tanto, como primer paso, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del retroceso de la línea costera para comprender las causas del problema. Como resultado final, se proporcionó recomendaciones de posibles soluciones conceptuales que pueden utilizarse para mitigar los efectos en dicho sector. Es importante destacar que se requerirán estudios previos adicionales para verificar la viabilidad de las soluciones conceptuales propuestas en el área afectada.

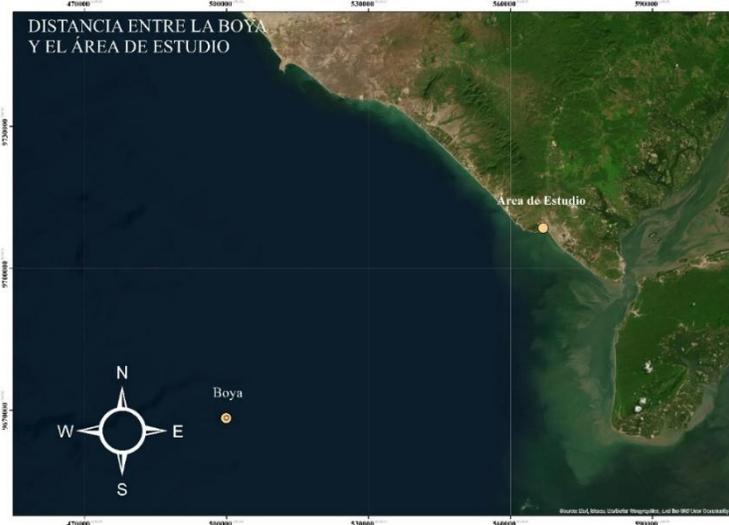
2.3 Etapa 2: Primeros pasos para caracterizar la Playa

2.3.1 *Obtención de data histórica de vientos y oleaje en aguas profundas*

Se recopiló información histórica sobre la magnitud y dirección de los vientos, así como la altura significativa, el período y la dirección del oleaje en aguas profundas. Estos datos se obtuvieron mediante el uso del modelo WAVEWATCH III de la boya más cercana al área de estudio, ubicada en las coordenadas 3°S, 81° W (Figura 2). Los datos se descargaron utilizando una rutina de MATLAB que se encuentra en el anexo 1 y abarcan el período de 1997 a 2019.

Figura 2. 2

Boya virtual usada para obtención de data de oleaje y viento



Nota: En la figura se muestra la distancia entre la boya virtual y el área de estudio.

Es importante destacar que la altura significativa medida desde la boya no se puede utilizar directamente en el análisis, ya que estos datos no corresponden a la zona costera. Es decir, la altura significativa encontrada no es igual a la altura de las olas rompientes que llegan a las costas. Por lo tanto, es necesario realizar el proceso de shoaling y refracción para llevar ese valor de altura de las olas en aguas profundas a aguas someras. Este proceso se puede realizar tanto de forma manual como computacional. A continuación, se presenta la metodología utilizando modelos computacionales de refracción.

2.3.2 Proceso generado por método computacional

Delft 3D es un motor de simulación hidrodinámica utilizado para simular el flujo impulsado por las mareas y el viento, así como otros fenómenos hidrodinámicos en aplicaciones costeras, estuarinas, fluviales, rurales y urbanas (Delft3D, 2023). A continuación, se describe el proceso para llevar a cabo la simulación de refracción.

Para generar un modelo computacional en Delft, primero se debe creó un nuevo proyecto en el que se especificó el tipo de simulación que se realizó. En el caso de una simulación de refracción, se eligió la opción "Waves Model". El programa mostró diferentes opciones en la barra lateral derecha de la pantalla. A continuación, se estableció y configuró cada uno de los parámetros requeridos por el programa. Uno de los archivos principales que se solicitó es la ubicación de la cuadrícula, la cual fue de acuerdo con la batimetría del área de estudio y la profundidad aceptable para referirse a aguas profundas, ya que los datos históricos se encuentran en aguas profundas.

Posteriormente, se procedió a introducir los datos o "Time frame". En esta opción, se ingresó los datos históricos de las mareas y se estableció el viento como una variable no constante. A continuación, se definió los límites o "Boundaries". Para ello, fue necesario conocer la dirección de las olas que llegan a la costa y su variación anual. En Ecuador las olas inciden por dos centros de alta presión, al norte (35°N -140°W) y al sur (30°S -50°W), el cual genera dos frentes de olas provenientes en dirección noroeste durante los meses de enero a mayo y en dirección suroeste durando los meses de junio a (Chuez Cedeño & Ramírez Ruiz, 2021). Por lo tanto, se estableció tres límites en la cuadrícula: inferior, superior e izquierdo. En cada límite, se colocó los datos recopilados del oleaje y los vientos pertinentes a la dirección de las olas. Esto permitió al programa comprender el sentido de las olas que llegan a la costa y sus variaciones de dirección a lo largo del año, lo que resultó en una simulación más realista. Finalmente, se estableció los parámetros físicos específicos del área de estudio y se ejecutó el programa. Es importante destacar que este proceso computacional es teórico y, aunque analiza diferentes variables, es necesario validar los datos obtenidos mediante otras fuentes confiables.

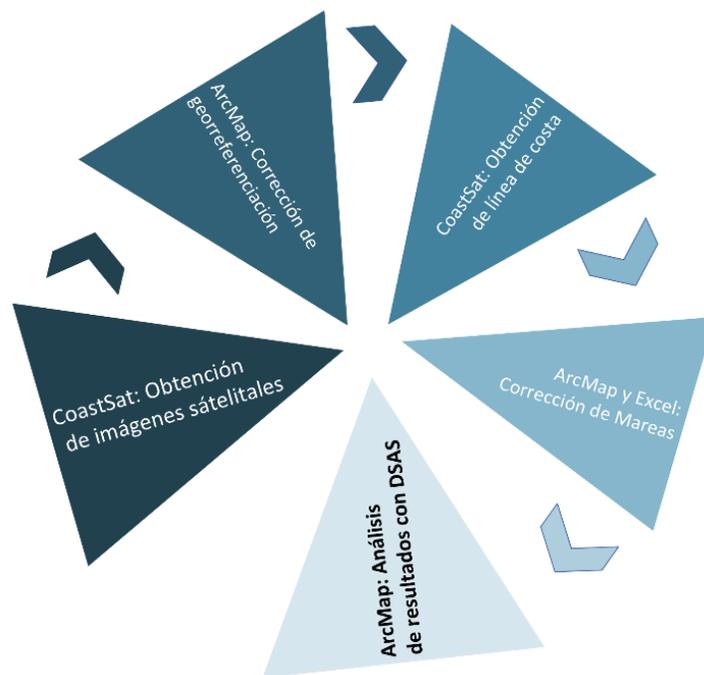
2.4 Etapa 3: Obtención de histórico de línea de costa

2.4.1 Uso del código de CoastSat

CoastSat es una herramienta de código abierto desarrollada por Killian Vos, Ph.D., que se utiliza para analizar y monitorear los cambios costeros utilizando imágenes satelitales y de drones. Esta herramienta ha sido diseñada para facilitar el análisis de la línea de costa y otros aspectos relacionados con la dinámica costera, permitiendo a los investigadores y profesionales obtener información precisa y detallada sobre los cambios que ocurren en estas áreas. La obtención de resultados a través de CoastSat implicó varias etapas clave, tal y como se muestra en la figura 2.2:

Figura 2. 3

Diagrama de Flujo simplificado para la obtención de resultados en CoastSat



Nota: En la figura, se detallan las etapas clave que se siguieron para obtener los resultados del retroceso de línea de costa

2.4.2 CoastSat: Obtención de imágenes satelitales

La obtención de imágenes satelitales en CoastSat se realizó a través de un proceso detallado. En primer lugar, se delimitó el área de interés mediante la creación de un polígono que encierra la zona costera a analizar. Luego, se seleccionó la fuente de imágenes adecuada, como Sentinel, Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 o Landsat 9. Estas plataformas satelitales ofrecen imágenes de alta resolución y cobertura global. A continuación, se configuraron los parámetros específicos, como la corrección atmosférica y topográfica, según el satélite seleccionado. Una vez configurados, se procedió a descargar las imágenes utilizando servicios como Google Earth Engine. Se priorizó la selección de imágenes con baja presencia de nubes para garantizar una calidad óptima. Finalmente, las imágenes se guardaron en una ubicación accesible para su posterior procesamiento y análisis en CoastSat (Vos & Baart, 2019).

2.4.3 Corrección de georreferenciación.

Como el resultado final es la comparación de las fotos satelitales anuales. Fue necesario realizar una serie de correcciones para garantizar la precisión de los resultados. La corrección de georreferenciación es esencial para alinear correctamente las imágenes en un mismo sistema de coordenadas geográficas. Esto permitió comparar de manera precisa la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo, asegurando que las imágenes se superpongan correctamente (Vos & Baart, 2019).

2.4.4 CoastSat: Obtención de línea de costa

Una vez corregidas las imágenes se procedió a importar cada imagen al código, en donde, se aplicó algoritmos de detección entre las bandas multispectrales se identificó la zona de mar y la zona terrestre y se graficó un grupo de puntos en la intercepción de ambas zonas, obteniendo así la línea de agua correspondiente la foto. Cabe recalcar que los resultados pueden variar, dependiendo del porcentaje de nubes presente en la zona. Puede

ser que un pequeño porcentaje distorsione la imagen y la línea de costa no pueda ser identificada de manera congruente. Al final, se calificó las fotos y se seleccionaron las fotos que tienen una línea de costa congruente.

2.4.5 Corrección de Mareas

Cada imagen satelital se capturó en una hora específica, y la altura de marea en esa hora es diferente para cada imagen. En el proceso de comparación de línea de costa se escogió imágenes con un mismo nivel de marea o casi igual para su estudio; sin embargo, para poder usar un mayor número de imágenes se procedió a realizar la corrección por marea. Para ello, se realizaron cálculos para llevar la línea de agua a un rango de marea dentro de la resolución del píxel (10 m Sentinel y 15 m Landsat). Para mitigar el error dado por el avance de la marea en el perfil se estableció una pendiente de perfil de playa, el ancho del píxel de la imagen satelital y el cálculo la altura de marea a la hora que fue tomada la imagen satelital.

Primero, la altura de marea de la imagen satelital se obtuvo conociendo la fecha y hora de la fotografía, y la bajamar y pleamar del mismo día, se calculó la altura de marea de la imagen satelital.

Segundo, en una playa curva se estableció la pendiente por sectores mediante mediciones de perfil in situ a través de la metodología “Andrade” en época húmeda, en el mes de abril, y en época seca, junio, con ello se obtuvo una pendiente promedio por cada sector (m).

Tercero, se estableció una altura de marea referencial (H), este valor de altura es la media de todas las alturas de marea de las imágenes satelitales utilizadas.

Cuarto, con el dato de pendiente “m” y distancia “a” (ancho del píxel) 10 o 15 m, se realizó el cálculo geométrico asemejando a un triángulo rectángulo para obtener el rango de

marea “h” por sector, se seleccionó el mínimo rango de marea comparando todos los sectores.

Quinto, se discriminó imágenes satelitales con una altura de marea que se encuentren dentro del intervalo de marea aceptable $[H - h/2:H + h/2]$.

Sexto, las líneas de costa fuera del intervalo fueron arrastradas mediante la corrección de marea, en la cual, se calculó la distancia horizontal “X” con la pendiente “m” y la altura de marea de la imagen, luego, se determinó la distancia “X2” correspondiente al valor de altura del intervalo aceptable de marea “H”. Se resta las distancias obtenidas $X_2 - X$.

Séptimo, se arrastró la línea de costa tantos metros como se determinó en la diferencia de desplazamientos, hasta la distancia “X2”.

2.5 Etapa 4: Retroceso de línea de costa

2.5.1 DSAS: Cuantificación de retroceso de línea de costa

En la cuarta etapa del proyecto, se llevó a cabo la cuantificación del retroceso de la línea de costa utilizando el complemento DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Según Himmelstoss et al. (2018), DSAS es una herramienta de ArcMap que permite analizar y medir los cambios en la línea de costa a lo largo del tiempo utilizando imágenes satelitales. Esta herramienta resulta especialmente útil para evaluar la erosión o acumulación de sedimentos en las áreas costeras, y puede contribuir a la gestión de riesgos en estas zonas, según el Woods Hole Coastal and Marine Science Center (2022).

En el contexto de este proyecto, se utilizó DSAS para obtener la tasa anual de erosión e identificar las zonas con mayor riesgo de erosión, basándose en el histórico de fotos recopiladas y previamente corregidas. Una vez obtenidas las líneas de costa corregidas con ayuda de CoastSat, se procedió a generar archivos de línea (.shp) por cada línea de costa

utilizada, con el programa ArcMap. Los archivos generados fueron unidos a un solo archivo shape (.shp), y además se creó otro archivo de línea que contiene a una línea base que este alejado del grupo de líneas de costa y tomando como referencia la forma de la playa. Con esto se tuvo dos archivos, uno que contenía las líneas de costas de diferentes años y el otro archivo con la línea base. En ArcMap se creó una geodatabase personal para trabajar los archivos en un espacio aparte de otros datos, y en él se importaron los archivos creados anteriormente. Se activó el complemento de DSAS y con la herramienta *Shoreline Attribute Automator* se añadió el campo de fechas y de incertidumbre al archivo de las líneas de costa y se añadió el campo ID para la línea base, en el campo de incertidumbre se escribió la resolución del ancho del pixel del satélite del cual se extrajo la línea de costa, en el campo de fecha se lo escribió con el formato DD/MM/AAAA. Con la herramienta *Default Parameters* se definió el archivo correspondiente a las líneas de costa y el archivo de línea de base, en este se discrimino de que lado era tierra y agua, para su posterior análisis. Luego, con la herramienta *Cast Transects* se crearon los transectos, definiendo hasta que distancia (250 m) de la línea base incluirán las líneas de costa, y cada cuanto metro se definirán los transectos (100 m). Por último, se realizó el cálculo de las tasas de erosión con el indicador de WLR, correspondiente a la media ponderada del desplazamiento por año.

2.6 Etapa 5: Validación de datos

2.6.1 Salida de campo.

A fin de obtener datos que permitan la caracterización de la zona de interés se realizó una salida de campo, en el cual, se establecieron 6 estaciones de medición de características litorales mediante el Sistema de Observaciones Litorales Ambientales (LEO). Las coordenadas y ubicación de las estaciones se pueden encontrar en el Capítulo 3.

2.6.1.1 Características Litorales. Durante la etapa de validación de datos, se recopilaban diversas características litorales a intervalos de 30 minutos, desde las 10:00 h hasta las 15:30 h. Los datos recopilados se dividieron de la siguiente manera:

2.6.1.2 Corriente Litoral. Para determinar la dirección y velocidad de la corriente litoral, se empleó el método lagrangiano. Este enfoque consiste en analizar el movimiento de una partícula en el medio, en este caso, se utilizó un derivador en la zona de surf, que consistió en una botella de plástico llena con aproximadamente un tercio de agua de mar. En donde, se obtenía la dirección, la distancia que recorre el derivador con respecto a un punto de referencia y el tiempo que le tomaba al derivador llegar a la orilla. Calculando la corriente litoral, a través de la definición común de velocidad de la relación entre espacio y tiempo.

2.6.1.3 Ancho de zona de surf. Se midió el ancho de la zona de surf desde la línea de agua hasta la distancia de la ola rompiente más lejana.

2.6.1.4 Vientos. Se utilizó un anemómetro para obtener la velocidad del viento en dos zonas específicas: antes y fuera de la influencia del espigón (Estación 1 y 7, respectivamente). La dirección del viento se determinó utilizando una brújula para identificar su procedencia.

2.6.1.5 Olas.

Altura: Se estimó la altura de las olas a lo largo de 10 eventos.

Periodo: Debido a que las olas son muy variables, para determinar un periodo promedio en el momento, se debe obtener el tiempo que se demora en llegar 11 olas tipo swell a la rompiente, luego se lo divide para 10.

Tipo: Se identificaron tres tipos de olas reconocidos a nivel mundial, y el observador determinó el tipo de ola predominante durante las 10 olas rompientes.

Ortogonal: Se midió el ángulo de incidencia de la ola con respecto al norte utilizando una brújula.

2.6.1.6 Perfil de Playas. Se realizaron mediciones del perfil de playa utilizando dos métodos: el método de Andrade y el método de Emery. Se tomaron mediciones en 17 posiciones distintas de las playas, específicamente a 50 metros de distancia a cada lado de la estación determinada.

Método Emery: Se trata de un método para obtener la inclinación del perfil de playa, en el cual se utilizan dos reglas milimétricas. Este método consiste en colocar las reglas a una distancia de 1.5 metros, en donde el observador debe alinear la primera regla con el borde de la segunda regla y el horizonte, con ello se obtiene el diferencial de altura para la distancia acordada (Emery, K. O., 1961). Para nuestra salida de campo, se utilizó este método, pero a una distancia de 1 metro. Debido a que, este método se basa en la capacidad visual del observador.

Método Andrade: Se trata de una modificación del método Emery, en el cual las dos reglas milimetradas están conectadas por una manguera llena de agua. El diferencial de nivel de agua marcado en la manguera representa la altura en el punto correspondiente. Dado que este método no depende de la capacidad visual, se pueden realizar mediciones cada tres metros.

Es importante destacar que cada método está sujeto a la incertidumbre de la regla utilizada. Sin embargo, el método de Andrade se considera más preciso, ya que no depende de los sentidos humanos, sino del nivel del agua.

2.6.1.7 Tipo de sedimento y análisis granulométrico. Para cada estación, se tomaron muestras de sedimentos en la zona de berma, zona intermareal y línea de agua (Alta, media y baja respectivamente). Para cada muestra se estimó una cantidad mínima de 1 kg de material, como se tuvieron 6 estaciones, se obtuvo un total de 18 muestras de arena para realizar el respectivo análisis granulométrico. para reconocer cual el diámetro medio de la arena de la playa.

Capítulo 3

3 Resultados y Análisis

3.1 Resultados de retroceso de línea de costa con DSAS

Los datos obtenidos corresponden al periodo de estudio del 2004-2023, una línea de costa por año, a excepción de los años 2010, 2011 y 2013, inicialmente con un total de 17 líneas de costa, con la corrección de marea propuesta en este estudio. En la corrección de marea se trasladó las líneas de costa con alturas de marea fuera del intervalo de marea aceptable a la altura de marea referencial. Cabe mencionar que hubo líneas de costa muy alejadas de la altura de marea referencial (1.95 m), lo que implica una corrección de marea aún mayor. Las líneas de costa con altura de marea entre [2.05-1.85] se encuentran dentro del intervalo aceptable, las otras líneas requieren la corrección de marea (ver apartado 2.4.5). Esta corrección se realiza con la pendiente de playa obtenida en salidas de campo realizadas en mayo y junio del año 2023. Corregir con la misma pendiente supone que todos los años la playa posee la misma pendiente, lo que no es correcto asumir, dado que puede variar, según la dinámica de la playa del año. Para mitigar este error, se eligieron las líneas de costa cuya altura de marea se encontraban dentro del intervalo aceptado ([2.05cm - 1.85cm]) y líneas de costa con altura de marea cercanos al valor referencial en ± 20 cm.

El primer análisis en DSAS se realizó con las 17 líneas de costa corregidas, con alturas de marea originales muy alejadas a la altura referencial (Ver tabla 3.1). Sin embargo, se realizó un segundo análisis con 11 líneas de costas (Ver tabla 3.1, valores señalados con asterisco (*)) con alturas de mareas dentro del intervalo y cercanos a la altura referencial, para realizar una mínima corrección de marea y evitar un error mayor al recorrer la línea de costa al datum de 1.95 m. Tal y como se muestra en la figura 3.1.

Tabla 3. 1

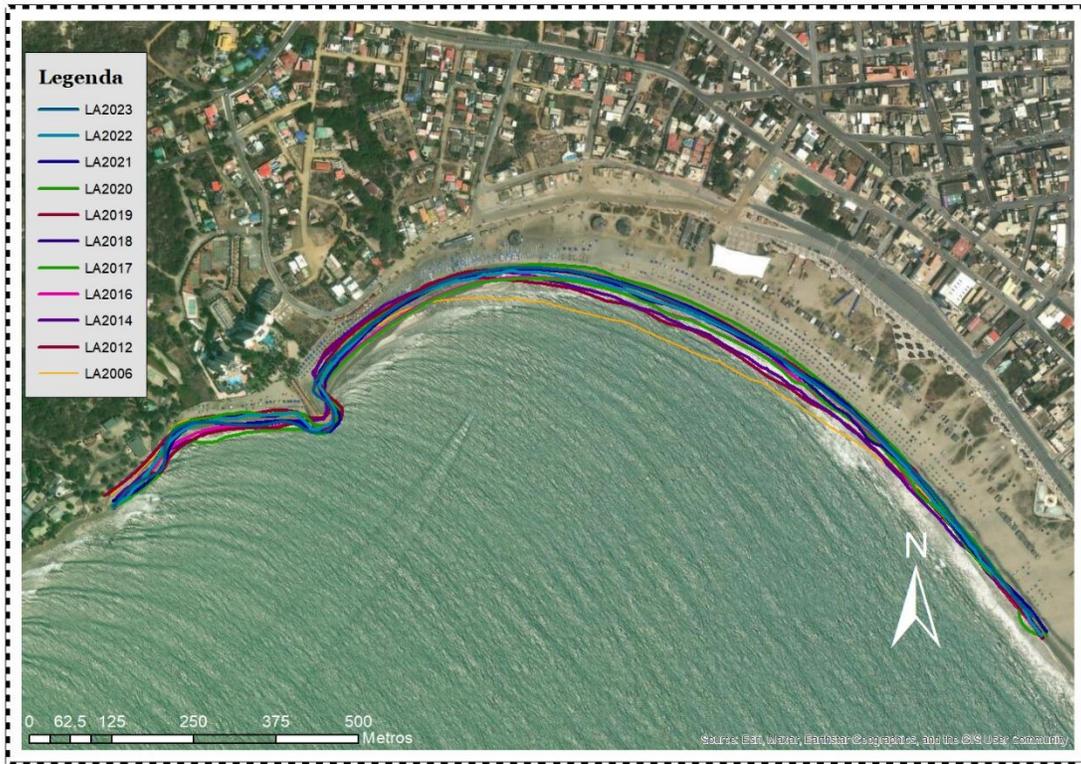
Líneas de costa de utilizadas en los dos análisis descritos, con las alturas de marea originales.

	Fecha y hora	Altura de Marea
PRIMER ANALISIS	2021-5-4-15:53*	2.13
	2020-6-13-15:53*	2.07
	2023-5-29-15:53*	2.01
	2019-9-7-15:53*	1.96
	2017-12-11-15:53*	1.95
	2022-05-09-15:53*	1.93
	2018-07-9-15:52*	1.92
	2016-12-21-15:52*	1.89
	2012-03-29-15:27*	1.72
	2014-11-14-15:31*	1.70
	2006-12-26-15:23*	1.67
	2015-2-10-15:33	1.50
	2011-4-28-15:26	1.46
	2009-7-11-15:23	1.21
	2005-02-06-15:22	0.98
	2007-02-28-15:23	0.97
	2004-04-08-15:22	0.80
	2008-11-29-15:22	0.38
	2023-02-08-15:33	0.6
	2004-04-08-15:22	0.80

Nota: ()* Corresponde al segundo análisis que comprende 11 líneas de costa con alturas de marea cercano a la altura referencial, dentro del análisis se encuentran los años 2006, 2012, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 y

Figura 3. 1

Líneas de costa del segundo análisis corregidas con la corrección de marea



3.1.1 Tasas de erosión

Con los dos grupos de años que se presentaron en la tabla 3.1, se procede a realizar el análisis de retroceso de línea de playa en DSAS, dando valores de media ponderada del desplazamiento por año (WLR) de los dos grupos (Ver tabla 3.2). Para dicho análisis se colocaron 17 transectos cada 100 metros a lo largo del área de estudio (Ver figura 3.2); en donde, los primeros transectos (transecto 1 al 3) se colocaron antes del espigón, del transecto 4 al 6 fueron ubicados dentro del área de sombra del mismo y del transecto 7 al 17 se ubicaron fuera de la influencia del espigón. Se puede observar en la figura 3.3 que, en ambos análisis la variación de la línea de playa sigue la misma tendencia en todos los transectos del área de estudio. En los transectos 8, 9, 10, 11 y 12 se pueden observar las mayores magnitudes de tasa de erosión en los dos análisis, sin embargo, las magnitudes son diferentes en alrededor de una unidad. Esto resulta por suponer la estabilidad del perfil de playa a lo largo de los

años, el cual, afectó en la corrección de mareas de los años cuya altura de marea era muy lejano al intervalo aceptado de altura de marea. El transecto 3 ubicado en zona de sedimentación antes del espigón, posee una tasa de acreción mínima (0.4 / 0.6 m/año). A partir del transecto 14 la tasa de erosión comienza a decrecer correspondiente a la zona recta de la playa de estudio, hasta alcanzar el valor de (-0.5 / - 0.2 m/año) en el transecto 17.

Haciendo énfasis en lo mencionado en la sección 3.1, se trabajó con los resultados obtenidos en el segundo análisis (2006-2023) donde se aplicó una mínima corrección de marea para los años analizados (Ver tabla 3.1). Hay que destacar que los resultados en ambos análisis tienen la misma tendencia de erosión en la zona de estudio, y no se rechazan los resultados del 2004-2023, sin embargo, para disminuir el error de la metodología de corrección de marea aplicada a este estudio, se escogieron años con líneas de costa cercanos al valor referencial de altura de marea.

Tabla 3. 2

Tasas de erosión de los análisis correspondientes a los dos grupos de años [m/año].

Transecto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Análisis 1 [m/año]	0.4	0.1	0.6	-0.6	-0.4	-1.3	-2.9	-4.1	-4.7	-4.8	-4.7	-4.3	-3.6	-2.7	-1.6	-0.9	-0.5
Análisis 2 [m/año]	1.1	-0.2	0.4	0.4	-0.1	-0.8	-1.8	-2.8	-3.4	-3.5	-3.5	-3.4	-3.0	-1.9	-1.3	-0.4	-0.2

Nota: El análisis 1 corresponde del 2004-2023 con 17 líneas de costa. El análisis 2 corresponde del 2006 al 2023 con 11 líneas de costa.

Figura 3. 2

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

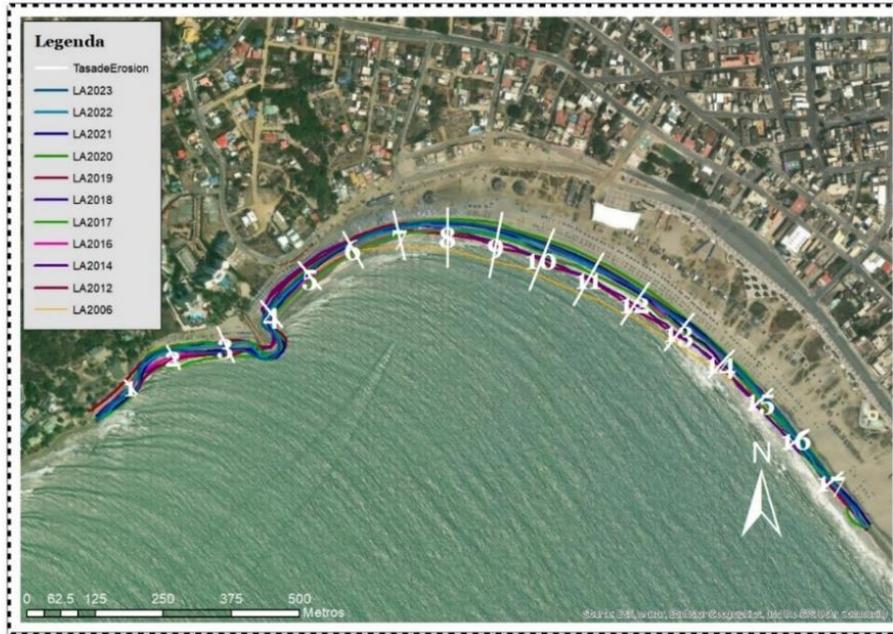
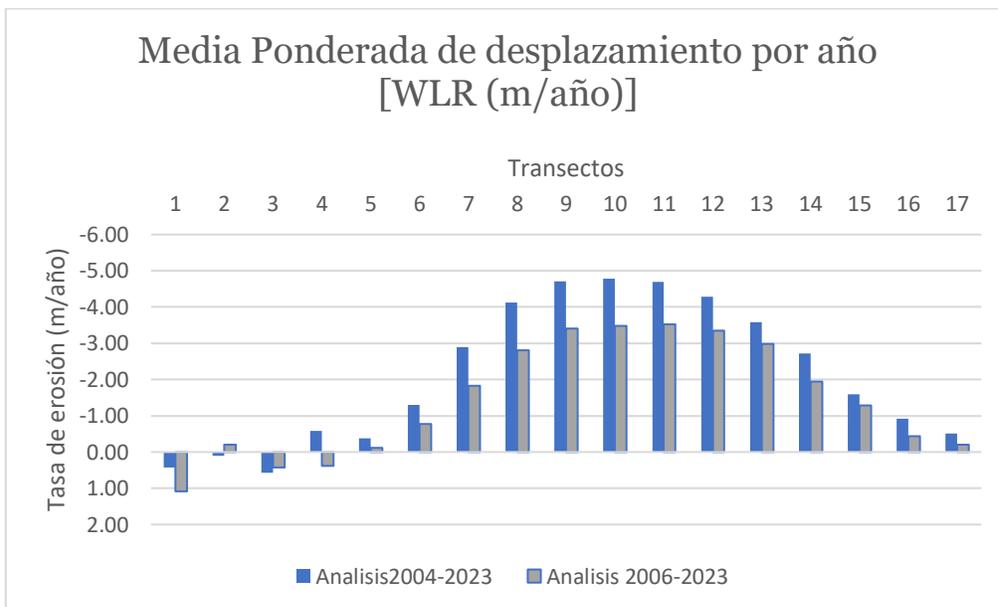


Figura 3. 3

Tasas de erosión de los análisis 2004-2023 y 2006-2023, con el número de transecto ubicado en la zona de estudio



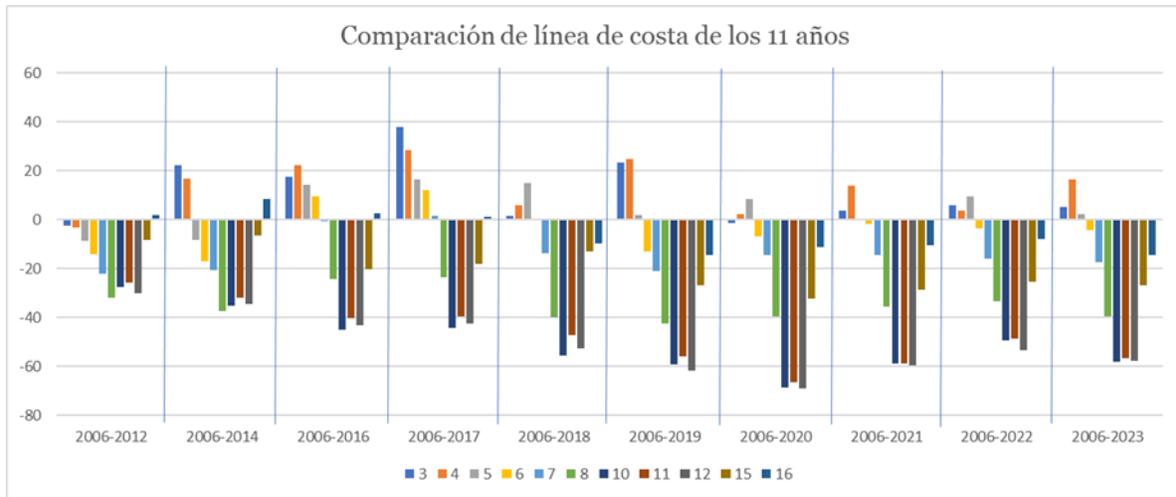
3.1.2 Análisis de retroceso de línea de costa

Se realizó el análisis de retroceso por línea de costa de los 11 años mencionados en el estudio 2006-2023. En la figura 3.4 podemos observar el retroceso o acreción de cada línea de costa de los diferentes años, tomando como referencia la línea de costa del año 2006. Las barras corresponden al número de transecto de la zona de estudio (Ver figura 3.2). Se tomaron en cuenta el transecto 3, antes del espigón, los transectos 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 15 y 16, después del espigón. Podemos observar que el transecto 3, a pesar de que hay acreción y erosión en distintos años, a lo largo de los años se ha mantenido estable, cuando ocurre pérdida de arena se contrarresta con sedimentación constante ocasionada por la presencia del espigón. En los transectos 4, 5 y 6, después del espigón, del 2006 al 2014 existe erosión, sin embargo, en los años 2016 y 2017 la tendencia cambia y se acrecionan. Para los siguientes años se vuelven a erosionar hasta llegar a los años 2020-2023 que se alcanza casi un equilibrio.

En los transectos 7 a 16 existe una clara tendencia únicamente a la erosión, con diferentes magnitudes de retroceso, siendo los transectos 10, 11 y 12 los de mayor magnitud. Los transectos 10-12, desde el 2006, se han erosionado constantemente hasta el 2020 que alcanza un punto de estabilidad hasta el 2023. Los dos últimos transectos 15 y 16, que comprenden la zona fuera de la curvatura de playa, poseen retrocesos menores de erosión. Se concluye que los mayores retrocesos de línea de costa, erosión, se hayan en la zona de curvatura de la playa, los transectos cercanos al espigón (4-6) poseen una dinámica de erosión con periodos cortos de acreción y, por último, los transectos finales cuyas tasas de erosión decrecen.

Figura 3. 4

Comparación de línea de costa desde el 2006-2023 por año



3.2 Sectorización del área de estudio

En el apartado previo, se pudo constatar una disparidad en las tasas de erosión en distintos tramos de la playa. Se lograron identificar sectores, caracterizados por tasas de erosión moderadas; otras regiones mostraron las tasas de erosión más pronunciadas, mientras que, en el extremo final de la playa, se registró una disminución en estas tasas. Cada una de estas porciones del litoral tiene peculiaridades específicas en cuanto al uso del suelo, el cual, se encuentra ligado a las actividades desarrolladas en cada área. Con base en estas observaciones, se procedió a efectuar sectorizaciones que representarán de mejor manera estas diferencias.

La primera sectorización se centró en la categorización del uso del suelo (como se exhibe en la Figura 3.5), destacando las zonas destinadas al turismo y las áreas reservadas para la actividad pesquera a lo largo de la playa. Además, en función de los resultados obtenidos del Análisis de Sedimentación y Erosión Dinámica (DSAS) (Ver tabla 3.2, análisis 2), se llevó a cabo una segunda sectorización basada en las tasas de erosión. Esta subdivisión posibilitó la identificación de las áreas más susceptibles a la erosión (tal como se muestra en

la Figura 3.6). Para llevar a cabo este proceso, en el área después del espigón, se determinó en qué transecto se manifestaba una variabilidad significativa en comparación con el siguiente transecto para identificar las zonas (ver Figura 3.3). Posteriormente, se procedió a la categorización de las zonas según la clasificación de tasa de erosión basado en los resultados de DSAS basada en la variable LRR¹, propuesta por (Nassar et al., 2019) (Ver tabla 3.3). Para ello, se utilizaron los resultados obtenidos de DSAS del segundo análisis (2006-2023) de la variable LRR (Ver tabla 3.4). Como se había obtenido los límites de la zona, se procede a sacar un promedio por zona para clasificarla (Ver tabla 3.4). En base a este análisis, la clasificación por tasa de erosión en el área de estudio solo correspondería a tres categorías; las cuales se muestran a continuación:

- **Acreción Moderada:** Se refiere a la zona que tiene tasa de erosión positivas, de 0 a 1 metro por año.
- **Erosión Moderada:** Se refiere a la zona que tiene tasa de erosión negativa, de 0 a -1 metro por año.
- **Erosión Muy Alta:** Comprende valores superiores a -2 metros por año

¹ LRR, “Linear regression rates ”

Figura 3. 5

Sectorización por uso de suelo

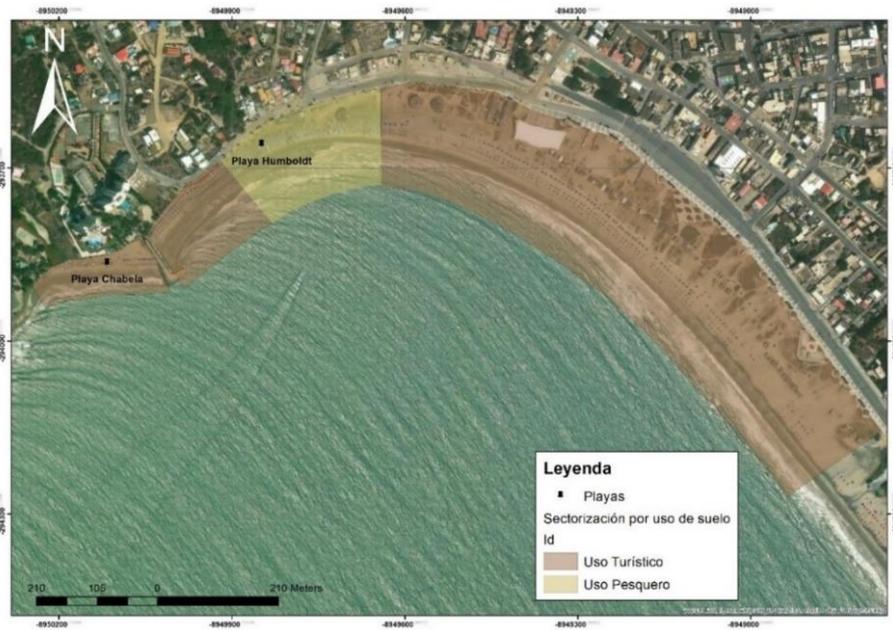


Figura 3. 6

Sectorización por tasa de erosión

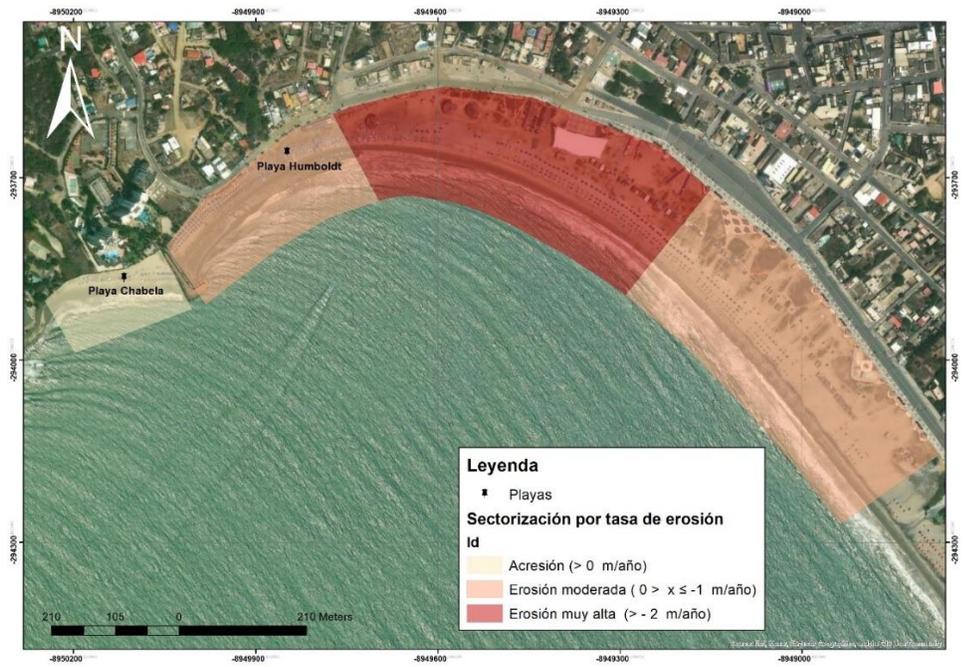


Tabla 3. 3*Clasificación de tasa de erosión basada con base a LRR*

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

Nota: Clasificación basada en la tasa de erosión obtenidas por DSAS con base a la variable “Linear regression rates” (LRR), propuesta por: (Nassar y otros, 2018).

Tabla 3. 4

Resultados de DSAS, correspondiente a la variable LRR, obtenidos del segundo análisis (2006-2023)

Transecto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Análisis 2 [m/año]	1,17	0.25	0.78	0.68	0.12	-0.59	-1.9	-2.94	-0.366	-0.361	-0.371	-3.52	-3.01	-1.94	-1.13	-0.39	-0.07
Sector	Sector 1			Sector 2				Sector 3						Sector 4			
Promedio por zonas	0.73			-0.42				-3.41						-0.88			

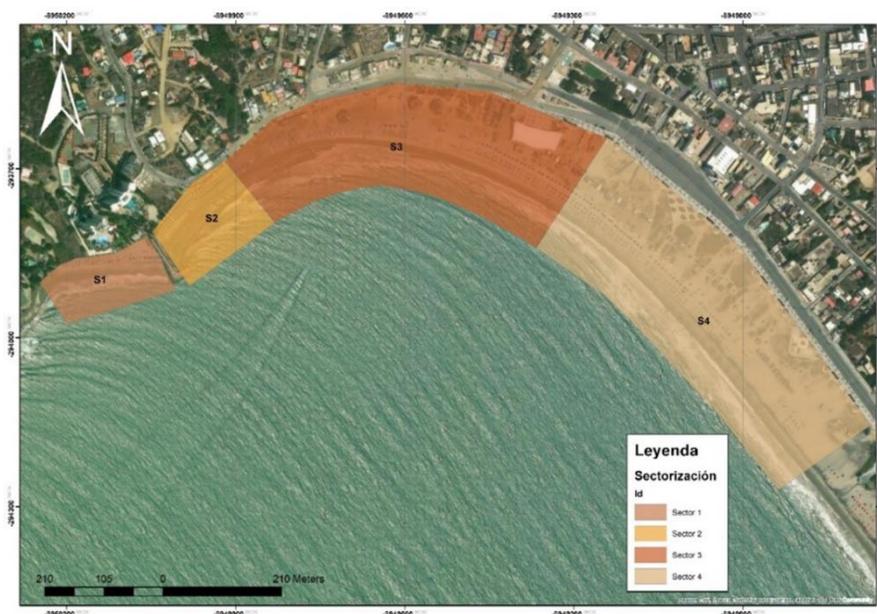
No obstante, con el fin de lograr una comprensión más coherente y útil para las propuestas de soluciones, se fusionaron las dos sectorizaciones realizadas previamente. En este contexto, el área de estudio se dividió en cuatro sectores, como se ilustra en la figura 3.7. El primer sector (S1) se ubica al lado derecho del espigón, donde se da un proceso de sedimentación debido a la presencia de dicho espigón. Este fenómeno de acumulación de sedimentos ocurre durante la pleamar, ya que, durante la bajamar, el espigón no retiene

dichos sedimentos. En el segundo sector(S2), la existencia del espigón provoca un efecto de erosión, abarcando el área directamente influenciada por este elemento, aunque con tasas de erosión más moderadas. Aquí, se pueden hallar pequeñas “islas” que son utilizados para realizar y vender alimentos, así como puestos de sombrillas y carpas. El tercer sector (S3) representa una zona de transición, que incluye un espacio para varadero de embarcaciones y una oferta de actividades turísticas. Precisamente en esta región es donde se observan las tasas más acentuadas de erosión. Por último, el cuarto sector(S4) que se encuentra fuera de la influencia del espigón, lo cual, refleja tasas de erosión decrecientes. Esta sección está predominantemente destinada a actividades recreativas de playa, con una presencia mayor de carpas y sombrillas.

En conjunto, esta nueva división en cuatro sectores proporciona una visión más completa y detallada de cómo se distribuyen los procesos de sedimentación y erosión en la playa, sirviendo como base para considerar enfoques y soluciones más adecuados en cada área.

Figura 3. 7

Mapa de sectorización final



3.3 Salida de campo:

Se llevó a cabo una salida de campo el 1 de julio de 2023 en el sector Humboldt del cantón General Villamil Playas, en condiciones cercanas a la sicigia (Tabla 3.5). Se establecieron 6 estaciones en tierra a lo largo del área de estudio. Es importante mencionar que, se utilizó una configuración singular debido a que se trata de una playa curva. En este sentido, se definieron los cuatro sectores (Figura 3.7). En los sectores 1 y 2, se estableció una estación de control. De manera adicional en el sector 2 se incorporó una estación de perfil (EP). Mientras que en el sector 3 y 4, al encontrarse dentro de una curva, se establecieron dos estaciones por tramo, asegurando que ambas estaciones tuvieran la misma orientación de la playa para obtener así un tramo recto entre ellas y mantener la consistencia de la metodología utilizada.

Tabla 3. 5

Tabla de mareas de la estación Datos de Posorja para la salida de campo

01/07/2023 Sábado		02/07/2023 Domingo		03/07/2023 Lunes	
Hora (hh:mm)	Altura (metros)	Hora (hh:mm)	Altura (metros)	Hora (hh:mm)	Altura (metros)
02:29	2.17 P	03:21	2.30 P	04:10	2.41 P
08:19	0.77 B	09:12	0.68 B	10:03	0.59 B
14:25	2.27 P	15:17	2.33 P	16:07	2.39 P
20:46	0.38 B	21:34	0.28 B	22:21	0.19 B

Nota: Datos tomados del Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador (2023).

Tabla 3. 6

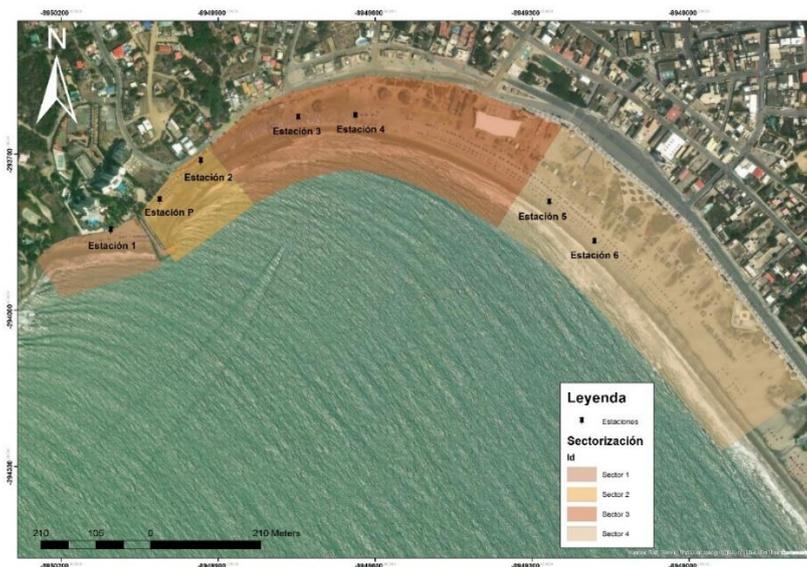
Sectores y ubicación de las estaciones

Sectores	Estación	Norte [m]	Este [m]
S1	E1	9708322	566678
S2	E2	9708457	566856
	EP	9708322	566678
S3	E3	9708537	567036
	E4	9708540	567145
S4	E5	9708428	567442
	E6	9708375	567515

Nota: La Tabla proporciona la ubicación en sistema de coordenadas de UTM de cada estación, así como el sector al que pertenecen.

Figura 3. 8

Ubicación de las estaciones en tierra para la salida de campo



Nota: La figura muestra la ubicación en tierra de las estaciones de control utilizadas durante la salida de campo

Los resultados de las observaciones de campo fueron las siguientes:

3.3.1 Observaciones de Oleaje.

En las observaciones *in situ* de la salida de campo del 1 julio 2023 en fase de sicigia muestra una altura de ola rompiente promedio es de 0.54 [m] aproximadamente (Tabla 3.7). El rango de altura de ola rompiente se encuentra dentro del intervalo de 0.1 a 1.5 [m], observándose la mayor altura en la estación 6, la más alejada a el espigón, y la menor altura en la estación 4 de 0.1 [m]. La dirección predominante del oleaje es desde el suroeste, que concuerda con los resultados obtenidos por Sánchez (1978) acerca de la dirección de oleaje predominante en las costas ecuatoriana.

Tabla 3.7

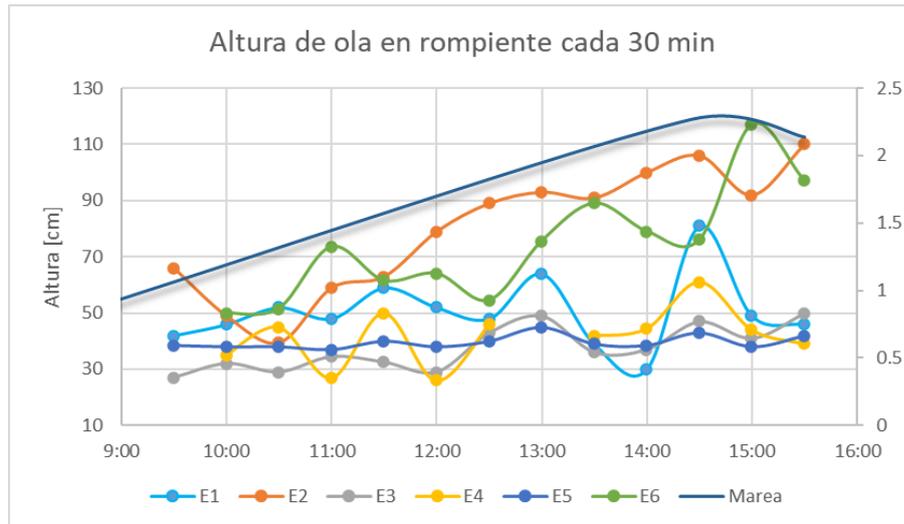
Promedio, máximo y mínimo de altura de olas observadas en sicigia de cada estación

Oleaje observado (Hb [cm])			
Estaciones	Promedio	Max	Min
E1	50.5	120	20
E2	79.7	130	20
E3	36.5	80	10
E4	41.8	70	20
E5	39.6	50	25
E6	74	150	30
	53.7	150.0	10.0

En la fecha 1 julio a las 8:13 am presentaba la marea baja, se observa que a inicios de la toma de datos (9:30 am), la altura de rompiente va aumentando conforme el estado de la marea va cambiando a pleamar. En la figura 3.9, la estación 1, 2 y 6 tiene mayores alturas de ola en las últimas mediciones.

Figura 3. 9

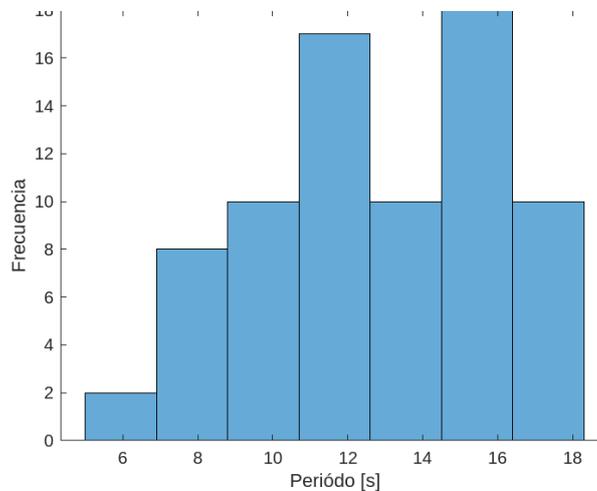
Promedio de altura de ola en rompiente vs tiempo



En los datos recolectados de oleaje el periodo predominante se encuentra dentro del intervalo de 12 a 16 s (ver figura 3.10), que concuerda con el periodo observado por Vera et al. (2009) cerca de las costas de Playas, en donde caracterizo desde Chanduy hasta Playas un periodo promedio de 14 segundos.

Figura 3. 10

Histograma de periodo observado in situ



Nota: En la figura se muestra el histograma de frecuencia del periodo obtenido en la salida de campo del 1 de julio del 2023.

Tabla 3. 8*Periodo promedio, máximo y mínimo por cada estación*

Periodo T [s]			
Estaciones	Promedio	Max	Min
E1	15.2	16.8	13.2
E2	10.2	11.8	5.4
E3	10.4	13.5	6.5
E4	10.1	11.7	7.6
E5	15.8	17.8	13.8
E6	13.7	17.7	8.7
Promedio	12.6	17.8	5.4

3.3.2 Ortogonal y Línea de Playa.

La playa en estudio es cóncava con presencia de un espigón, lo que ocasiona la difracción del oleaje. En las estaciones se presentan una variada dirección de la línea de agua y ortogonal. En la estación 3-4 y 5-6, la línea de playa es ligeramente diferente entre sí, dado que se trata de analizar un tramo recto entre las dos estaciones. El ángulo que se forma entre el frente de tren de olas y la dirección de la línea de playa se denomina ángulo alfa, y este valor oscila entre 12 a 30 grados en los resultados obtenidos. En el capítulo 1, se determinó la dirección del oleaje predominante de 200-225° proveniente del suroeste en aguas profundas, el cual es similar a los resultados obtenidos en campo. Sin embargo, la ortogonal medida de la estación 2 de la tabla 3.9, es de 180°, esta estación es un ejemplo de difracción por la presencia del espigón.

Tabla 3. 9

Ortogonal de la ola, dirección de línea de playa y ángulo Alpha de datos de salida de campo, 1 julio

Dirección LA - Ortogonal - Alpha (α)			
Estación	Línea Playa	Ortogonal	Alfa
E1	275	188	3
E2	245	180	25
E3	265	205	30
E4	270	200	20
E5	300	222	12
E6	300	224	14
Promedio	276	208	20

Nota: Alpha (α) se refiere al ángulo entre el tren del oleaje y la línea de costa.

3.3.3 Corriente Litoral.

En la tabla 3.10, se exponen los resultados de la velocidad de la corriente litoral durante la fase de sicigia. Se evidencia que la dirección predominante de la corriente, desde la estación 2 (E2) hasta la estación 6 (E6), es hacia la izquierda con respecto al espigón. No obstante, en la estación 1, se registra un cambio en la dirección hacia la derecha, a pesar de haber presentado una dirección opuesta durante la bajamar y haber cambiado de dirección durante el flujo. El rango de velocidades está entre 0.03 – 1.20 m/s obteniendo un promedio de velocidad de corriente de 0.5 m/s. Se observa que, las menores velocidades obtenidas están en la estación 1, lo cual es congruente ya que por la presencia del espigón la velocidad de corriente se desacelera. Luego, se observa un aumento de la velocidad de corriente (Estación 2, 3 y 4), pero esta disminuye sustancialmente cuando el ángulo de oleaje disminuye (véase estaciones 5 y 6, tabla 3.9 y 3.10). Siguiendo la misma tendencia en los resultados de la tesis de Sánchez (1978).

Tabla 3. 10

Promedios, máximos y mínimos de la corriente litoral medidas in situ

Corriente Litoral				
Vi [m/s]	Promedio	Max	Min	Dirección
E1	0.28	0.42	0.16	D
E2	0.85	1.20	0.47	I
E3	0.62	0.82	0.15	I
E4	0.72	1.07	0.33	I
E5	0.27	0.66	0.03	I
E6	0.20	0.43	0.08	I
Total	0.50	1.20	0.03	I

3.3.4 Perfiles de Playa

En la obtención de perfil de playa podemos ver en la tabla 3.11 los valores obtenidos en dos salidas de campo, una el 22 de junio y la otra el 1 julio de 2023, correspondientes a la fase de cuadratura y sicigia, respectivamente, para las 6 estaciones donde se recopilieron datos. En la estación 1, ubicada a lado derecho del espigón, se evidencia una mayor pendiente en comparación con las estaciones situadas en el lado opuesto. Si se enfoca en el lado izquierdo del espigón, mirando al mar, se puede denotar que las estaciones comienzan con una pendiente menor y se van empinando conforme se avanza de una estación a la otra. Hay que recalcar que las estaciones 3-4, y 5-6 son tramos con estaciones cercanas entre sí, por lo que su pendiente debe tener variaciones pequeñas. El United States Army Training and Doctrine Command (1993), clasificó la pendiente de la playa desde empinada a plana (ver tabla 3.12). Basándonos en esta clasificación, la estación 1 presenta una pendiente empinada, las estaciones 5 y 6 son clasificadas como moderadas a empinadas, la estación 2 y la estación de control de perfil (Ep) son clasificadas como suaves y las estaciones 3 y 4 son moderadas.

Tabla 3. 11*Pendiente de cada estación para cuadratura y sicigia*

Estaciones	Cuadratura 22 junio		Sicigia 1 julio		Promedio	
	Pendientes					
E1	0.049	1/21	0.11	1/10	0.079	1:13
Ep	0.020	1/51	---	---	0.020	1:50
E2	0.024	1/41	0.018	1/55	0.021	1:50
E3	0.051	1/20	0.033	1/30	0.042	1:24
E4	0.053	1/19	0.064	1/16	0.058	1:17
E5	0.058	1/17	0.068	1/15	0.063	1:16
E6	0.061	1/16	0.066	1/15	0.064	1:16

Tabla 3. 12

Clasificación de la pendiente de playa

Clasificación	Rango
Empinada	> 1:15
Moderada	1:30 < m < 1:15
Suave	1:60 < m < 1:30
Muy suave	1:120 < m < 1:60
Plana	< 1:120

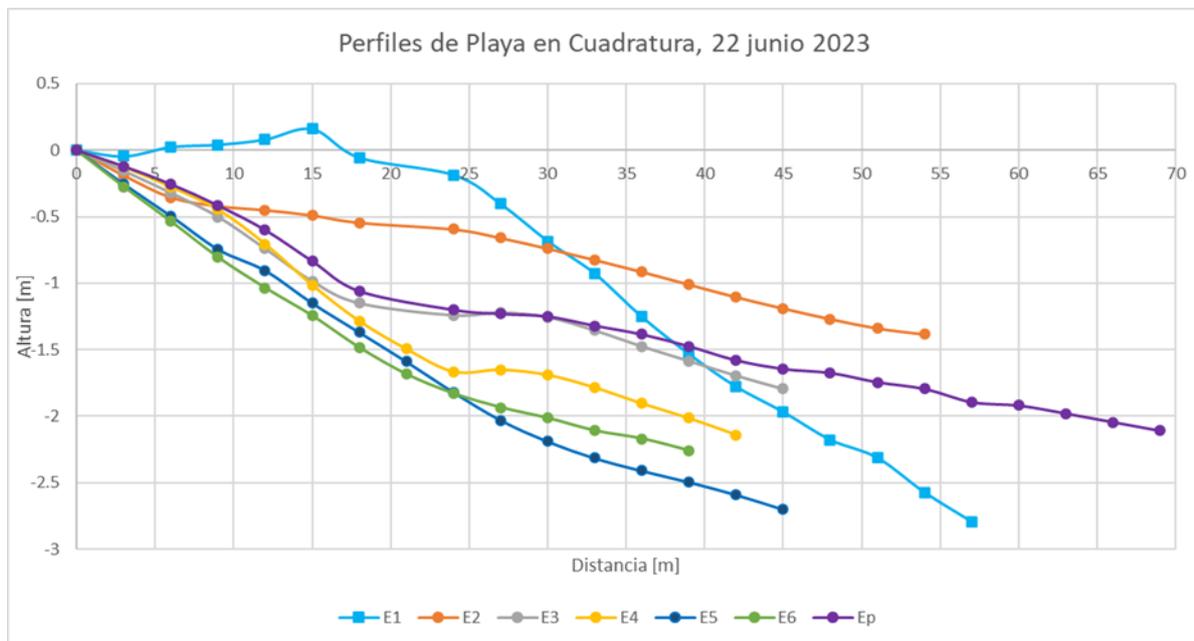
Nota: Datos sacados del United States Army Training and Doctrine Command (1993).

En las figuras 3.11 y 3.12 se observan los gráficos de perfiles de cada estación en las 2 salidas de campo. Se observa que la estación 1 en las figuras, tiene una pendiente empinada.

Las estaciones presentan resultados similares. La pendiente de playa de la estación 2 y la de control de perfil, clasificadas como suaves, tienen una pendiente más suave en los primeros metros.

Figura 3. 11

Perfiles de Cuadratura



Nota: La figura se muestra los perfiles en fase de cuadratura tomadas el día 22 de junio del 2023, en cada estación de control y la estación P definida en la tabla 3.4.

Figura 3. 12

Perfiles en Sicigia



Nota: La figura se muestra los perfiles en fase de sicigia tomada el día 1 de julio del 2023, en cada estación de control.

3.3.5 Granulometría de las estaciones y obtención del D₅₀

El 1 de julio del 2023 con marea viva, se recolectaron tres muestras de arena (alta, media y baja) por cada estación, con la finalidad de determinar el tipo de sedimento, el diámetro promedio (D_{50}), el diámetro de sedimento con 84% (D_{84}) y 16% (D_{16}) de pasante acumulado, desviación estándar y coeficiente de asimetría. Se usó la clasificación de granos de (Wentworth, 1922) para clasificar al tipo de sedimento de cada estación, además, se determinó diámetro promedio (D_{50}) para toda la zona de estudio dando como resultado una clasificación del sedimento en una arena entre fina y media. En el estudio de Sánchez (1978), menciona que los valores negativos de los coeficientes de asimetría tienden hacia los finos, y los valores positivos de asimetría tienden hacia los gruesos. En la estación 1 hay un ambiente de deposición de sedimentos, por lo que los sedimentos poseen asimetrías positivas. En las siguientes estaciones desde la E2 a la E6, los valores de asimetría son cambiantes, para las muestras altas y medias existen tendencias hacia los gruesos y en las muestras de baja marea tendencias hacia los finos.

A continuación, se presenta las ecuaciones utilizadas y los resultados obtenidos en la tabla 3.13.

$$\sigma = \frac{(\emptyset 84 - \emptyset 16)}{4} + \frac{\emptyset 95 - \emptyset 5}{6.6} \quad (3.1)$$

Desviación Estándar

$$ki = \frac{\emptyset 16 + \emptyset 84 - 2\emptyset 50}{2(\emptyset 84 - \emptyset 16)} + \frac{\emptyset 5 + \emptyset 95 - 2\emptyset 50}{2(\emptyset 95 - \emptyset 5)} \quad (3.2)$$

Coefficiente de Asimetría

Tabla 3. 13

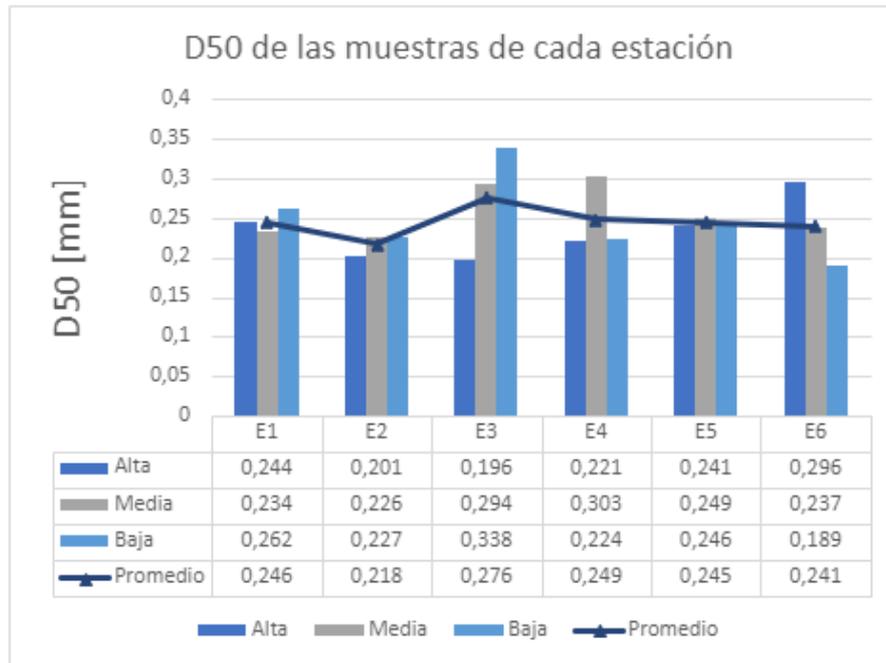
Diámetros medio, efectivo, D14, D84, desviación estándar y coeficiente de asimetría

Ubicación	Estación	D50 [mm]	D84 [mm]	D16 [mm]	Coefficiente Asimetría	Desviación Estándar
Alta	E1A	0.244	0.385	0.180	0.18	0.52
Media	E1M	0.234	0.357	0.174	0.13	0.49
Baja	E1B	0.262	0.402	0.189	0.19	0.58
	E1	0.246	0.382	0.181		
Alta	E2A	0.201	0.247	0.153	-0.04	0.42
Media	E2M	0.226	0.349	0.164	0.10	0.52
Baja	E2B	0.227	0.354	0.166	0.12	0.52
	E2	0.218	0.316	0.161		
Alta	E3A	0.196	0.241	0.152	-0.09	0.38
Media	E3M	0.294	0.397	0.185	-0.26	0.50
Baja	E3B	0.338	0.602	0.187	0.07	0.85

	E3	0.276	0.414	0.175		
Alta	E4A	0.221	0.338	1.565	0.01	0.56
Media	E4M	0.303	0.403	0.196	-0.20	0.52
Baja	E4B	0.224	0.335	0.168	0.14	0.48
	E4	0.249	0.359	0.643		
Alta	E5A	0.241	0.379	0.163	-0.02	0.58
Media	E5M	0.249	0.390	0.179	0.08	0.51
Baja	E5B	0.246	0.412	0.165	0.26	0.69
	E5	0.245	0.394	0.169		
Alta	E6A	0.296	0.400	0.181	-0.31	0.55
Media	E6M	0.237	0.376	0.168	0.08	0.54
Baja	E6B	0.189	0.293	0.146	0.26	0.53
	E6	0.241	0.356	0.165		

Figura 3. 13

Promedio del Diámetro promedio (D_{50}) de las muestras de arena



Nota: Diámetro promedio (D50) para las muestras Alta, Media y Baja recolectada en cada estación de control el día 1 de julio del 2023.

3.3.6 Clasificación del tipo de ola rompiente

En los datos tomados por observación *in situ* en la salida de campo, se registraron dos tipos de ola predominante: *spilling* y *plunging*. Estos registros visuales pueden diferir según la persona que lo observe, por esto se procede a determinar el tipo de ola rompiente mediante el parámetro de Iribarren o número de Iribarren, utilizando como variables la altura de ola rompiente, pendiente y longitud de la onda del oleaje en aguas profundas. Como se muestra en la ecuación 3.3.

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad (3.3)$$

Donde:

$\tan \beta$: pendiente de la playa

H_b : Altura de ola rompiente

L_0 : Longitud de la onda en aguas profundas

La clasificación del número de Iribarren se puede expresar para alturas de olas en aguas profundas y en la zona rompiente, en este caso se usa la altura de ola rompiente

observada en la salida de campo. En la estación 1 con mayor pendiente se observó olas tipo plunging y spilling, sin embargo, el parámetro nos dio como resultado olas tipo plunging a collapsing. En las demás estaciones se observaron presencias de dos tipos de olas: plunging y spilling; con el parámetro de Iribarren obtuvimos el tipo de ola Plunging (Tabla 3.14).

Tabla 3. 14

Surf similarity con el uso del Parámetro de Iribarren

Estación	Pendiente	Hb	Lo	E Iribarren	Tipo de Ola
E1	0.0794	0.51	351	2.09	Plunging/ Collapsing
E2	0.0212	0.80	351	0.44	Spilling/Plunging
E3	0.0421	0.37	351	1.31	Plunging
E4	0.0585	0.42	351	1.69	Plunging
E5	0.0631	0.40	351	1.88	Plunging
E6	0.0637	0.74	351	1.39	Plunging

3.3.7 Estado morfológico de la playa

Con el uso de Número de Dean podemos determinar el estado morfológico de la playa, que nos permite determinar las condiciones de la playa. Para ello, se debe determinar la velocidad de caída del sedimento (W_s) o velocidad de asentamiento que depende del diámetro promedio (D_{50}), para el cálculo de esta ecuación se usó la propuesta por Soulsby (1977) (ver ecuación 1.2). A partir de este cálculo se determina el número de Dean (ecuación 3.4) y se procede a clasificar en forma cualitativa si la playa es: Reflectivas, intermedias y disipativas.

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \quad (3.4)$$

Donde:

H_b : Altura de ola rompiente

Ws: Velocidad de caída del sedimento

T: Periodo de ola

En la clasificación del número de Dean (ver tabla 3.16) podemos determinar el estado morfológico con los datos de cada estación, en la estación E1, E3 y E5 su estado es reflectivo, las estaciones E4 y E6, son clasificados como intermedias, pero debido a su bajo valor del número de Dean podrían entrar a la clasificación de intermedias-reflectivas. La estación 2 es intermedia con tendencia a ser disipativa.

Tabla 3. 15

Clasificación de la playa con el número de Dean

Estación	D50 [mm]	T [s]	Ws [m/s]	Hb [m]	Número de Dean	Clasificación
E1	0.246	15.2	0.031	0.51	0.9	Reflectiva
E2	0.218	10.2	0.029	0.80	2.4	Intermedia
E3	0.276	10.4	0.030	0.37	0.8	Reflectiva
E4	0.249	10.1	0.031	0.42	1.1	Intermedia
E5	0.245	15.8	0.030	0.40	0.7	Reflectiva
E6	0.241	14.9	0.030	0.74	1.3	Intermedia

Tabla 3. 16

Clasificación del número de Dean

Clasificación	Dean
Reflectiva	$\Omega < 1$
Intermedia	$1 < \Omega < 6$
Disipativa	$\Omega > 6$

Nota: Clasificación tomada de Dean 1970.

3.3.8 Transporte de sedimentos.

Se estimo el transporte de sedimento a lo largo de la costa, conocido como transporte litoral o “longshore” o transporte litoral, utilizando los datos recopilados durante la salida de

campo. Se empleó la formulación propuesta por CERC (Ecuación 3.5), ya que Vera et al. (2009) señala que es un método eficaz. Para estos cálculos, se utilizó un valor de $K=0.39$, el cual fue propuesto por el Shore Protection Manual (1984) para casos en los que se emplea la ola significativa.

$$Q_s = \frac{K}{(\rho_s - \rho)g*(1-n)} * \left[1.57pg \left(\frac{H_b^3}{T} \right) \text{Sin}\alpha \right]; \text{CERC} \quad (3.5)$$

Variables

K ; factor usado con altura rompiente H_b , $K=0.39$

H_b ; Altura de ola rompiente

n ; porosidad del sedimento = 0.4

$\rho_s = \text{densidad del sedimento } 2650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

ρ ; densidad del agua de mar 1030 [kg/m³]

Los resultados presentados corresponden a una fase de sicigia o marea viva, es decir, cuando se presenten las mayores mareas altas pudiendo presentar un incremento en las alturas de olas (INOCAR, 2023). En la tabla 3.17 se puede apreciar un patrón interesante en relación con el transporte litoral en diferentes estaciones. Se observa un valor mínimo de transporte en la estación 1, lo cual es congruente por la presencia del espigón, ya que este tipo de estructuras tienden a disminuir el transporte de sedimentos a lo largo de la costa. Posteriormente, después del espigón, se produce un aumento en la magnitud del transporte litoral. Esto puede ser resultado por la reconfiguración del flujo de corriente y oleaje después de la presencia del espigón. Sin embargo, en la estación 5, se observa una disminución en la magnitud de transporte litoral. Esto podría ser resultado de la reconfiguración del oleaje a lo largo de la costa por la forma de la playa. El rango del transporte litoral estimado mediante la formulación de CERC se encuentra entre 26 y 1206.06 m³/día.

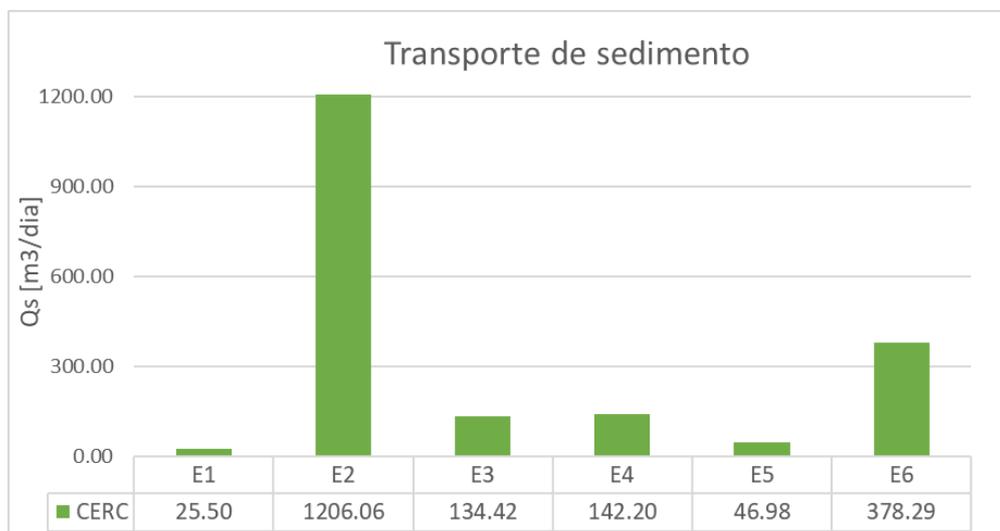
Tabla 3. 17

Transporte de sedimento de CERC

Estación	m	Velocidad de corriente [m/s]	Línea de Playa °	Angulo °	Hb [m]	T [s]	Qs CERC [m ³ /día]
E1	0.0794	0.28	275	3	0.51	15.2	25,5
E2	0.0212	0.85	245	25	0.80	10.2	1206.06
E3	0.0421	0.62	265	30	0.37	10.4	134.42
E4	0.0585	0.72	270	20	0.42	10.1	142.2
E5	0.0631	0.27	300	12	0.40	15.8	46.98
E6	0.0637	0.20	300	14	0.74	14.9	378.29

Figura 3. 14

Transporte de sedimentos de las estaciones de la salida de campo del 1 de julio del 2023



Nota: En el eje de las ordenadas se presenta los valores de Transporte obtenidos a través de la Formulación de CERC y en el eje de las abscisas: la estación y su valor correspondiente.

3.3.9 Resumen de resultados encontrados en la caracterización litoral.

A continuación, se muestra la tabla 3.18, que agrupa todos los resultados obtenidos durante la salida de campo realizada el 1 de julio del 2023. Esta tabla será de gran utilidad para realizar el análisis detallado de la playa y sus características.

Tabla 3. 18

Resumen de resultados obtenidos

Estación	m	Velocidad de corriente	Dirección de corriente	Línea de Playa	Angulo	Hb [m]	Periodo [s]	D50 [mm]	Qs CERC [m3/61ía]	Tipo de Ola	Estado morfológico
E1	0.079	0.28	D	275	3	0.51	15.2	0.246	25,59	Plunging/ Collapsing	Reflectiva
E2	0.021	0.85	I	245	25	0.80	10.2	0.218	1166,09	Spilling/ Plunging	Intermedia
E3	0.042	0.62	I	265	30	0.37	10.4	0.276	142,11	Plunging	Reflectiva
E4	0.058	0.72	I	270	20	0.42	10.1	0.249	171,29	Plunging	Intermedia
E5	0.063	0.27	I	300	12	0.40	15.8	0.245	45,86	Plunging	Reflectiva
E6	0.064	0.20	I	300	14	0.74	14.9	0.241	374,30	Plunging	Intermedia

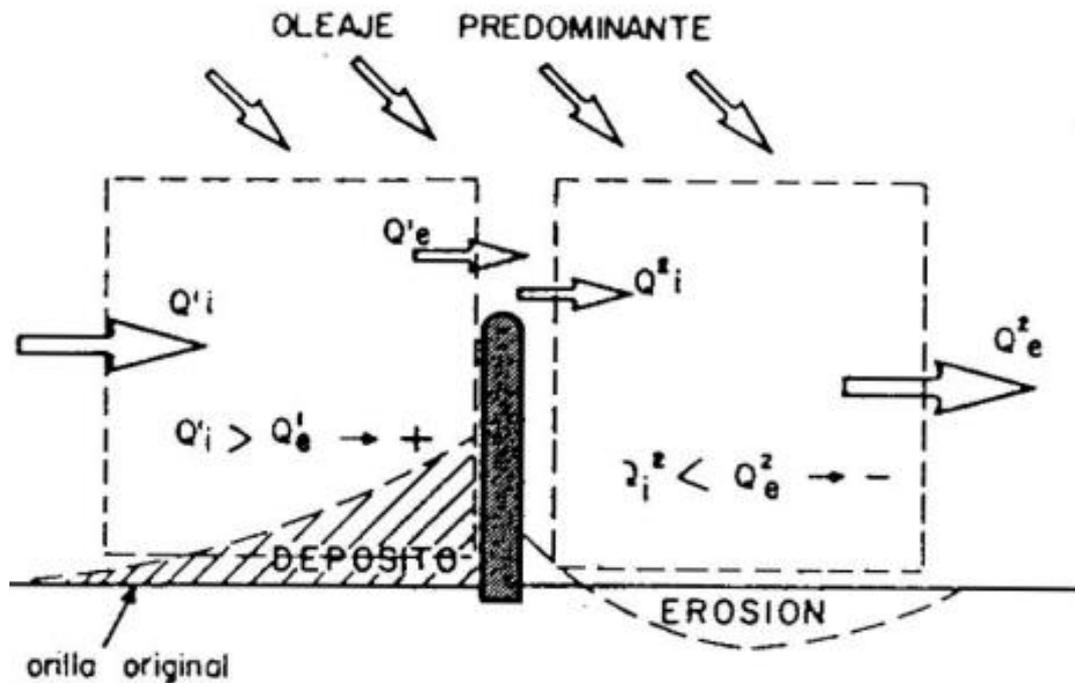
3.4 Análisis descriptivo de la playa

De acuerdo con la definición propuesta por Manley (1998), las obras marítimas de protección costera se refieren a estructuras diseñadas para resguardar áreas específicas de la costa de los efectos destructivos de los fenómenos oceanográficos. Estas obras pueden clasificarse en dos tipos: la primera categoría incluye estructuras que protegen contra el oleaje incidente, como los rompeolas, mientras que la segunda engloba estructuras que atrapan material, como los espigones. Estos últimos tienen como función principal retener sedimentos en el lado donde incide el oleaje, creando una acumulación forzada y, en consecuencia, formando una nueva playa. Sin embargo, una de las principales consecuencias de esta acción es la obstrucción del transporte litoral de la playa, ya que disminuye el movimiento de agua y sedimentos a lo largo de la costa (Sánchez-Arcilla Conejo & Jiménez, 1994).

En la dinámica costera, existe un movimiento de transporte paralelo conocido como "Transporte Longshore", que tiene la capacidad de mover sedimentos en paralelo a la costa. Al construirse un espigón, este transporte paralelo se encuentra con una barrera transversal, lo que provoca el depósito forzado de sedimentos en un lado del espigón. Mientras tanto, el oleaje predominante continúa actuando sobre la costa, generando una corriente litoral y, por ende, un transporte de sedimentos (Q) en el otro lado del espigón. Debido a que no hay una alimentación sedimentaria constante en ese lado por la barrera antropogénica impuesta, el oleaje tiende a llevarse los sedimentos de la playa, dando lugar a un proceso de erosión, tal y como se ilustra en la figura 3.15.

Figura 3. 15

Esquematación de la influencia de un espigón en una playa



Nota: Tomada de “Ingeniería de Playas (I): Conceptos de Morfología Costera”, por J. Jiménez y A. Sánchez, 1994, *Ingeniería del Agua*, 1, p.99.
https://www.researchgate.net/publication/39431152_Ingenieria_de_playas_I_conceptos_de_morfologia_costera

En General Villamil Playas, en el año de 1960 aproximadamente se construyó un espigón en la playa Humboldt, con el objetivo de crear una playa para los hoteles turísticos que se encuentran detrás de este. El espigón generó un área de sedimentación en el sector 1 (Ver figura 3.7), el cual, provocó inicialmente una erosión desde la base del espigón hacia la izquierda de la playa, mirando al mar. Sin embargo, al realizar una comparación entre las líneas de costa de los años 2004 y 2023, específicamente para el sector 1, se observa que el proceso de retención de sedimentos causado por el espigón no ha experimentado un incremento significativo, es decir, se puede afirmar que el espigón ha llegado a su máxima capacidad de retención, de tal manera que se genera bypass de sedimentos, en otras palabras, el paso de sedimento de un lado del espigón hacia el otro; el año exacto en que comenzó el

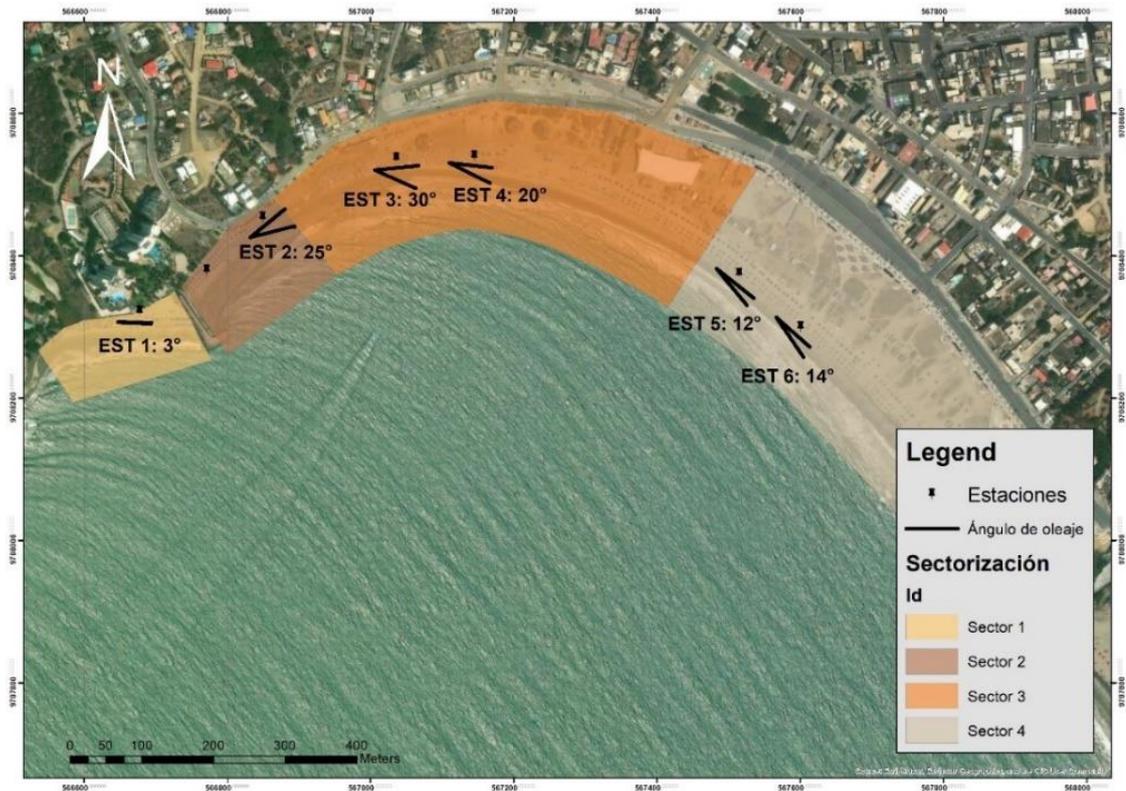
Bypass no se conoce certeza. Esto hizo menguar la erosión teórica dada aguas abajo del espigón en el sector 2, explicando así que los transectos continuos al espigón (ver transecto 4 y 5 en la Figura 3.2), las tasas de erosión calculadas mediante el análisis DSAS (consultar tabla 3.2, análisis 2) son mínimas y, de hecho, difieren considerablemente de las tasas teóricas esperadas para dichos transectos. Esto se da porque, existe un aporte sedimentario del sector 1 al sector 2, menguando la tasa de erosión en dicho sector. Sin embargo, la erosión sigue presente, aumentando la tasa de erosión en los transectos siguientes (Transecto 6 y 7), pero no tiene una magnitud considerablemente grande, ya que, se mantiene una alimentación sedimentaria dada por el Bypass del Espigón.

Dentro del sector 3, se aprecia un incremento progresivo y significativo en la tasa de erosión, mostrando las tasas más elevadas de pérdida costera (véase figura 3.3 y tabla 3.2). De acuerdo con los resultados obtenidos en campo, la dirección de transporte litoral es mayoritariamente hacia la izquierda, mirando al mar. Del mismo modo, el cálculo de transporte litoral (Q) en la estación 3 es menor que el transporte litoral (Q) en la estación 4, lo que explica este proceso de recesión de sedimentos. Asimismo, la forma de la playa también es un elemento importante en el retroceso de costa, debido a que, el sector 3 se encuentra en la zona de mayor curvatura, generando una variación constante del ángulo del tren de oleaje con respecto a la línea de agua (ángulo Alpha²) y por ende un impacto mayor del transporte litoral. En la figura 3.16, se puede observar la gran variación del ángulo de oleaje (estación 3 y 4).

² Ángulo Alpha: Se refiere al ángulo entre el tren de oleaje y la línea de costa.

Figura 3. 16

Variación de ángulo de oleaje con respecto a la línea de agua para cada estación de control



El ángulo Alpha juega un papel muy importante en el desarrollo de la corriente litoral y en el cálculo del transporte litoral, influye en la magnitud de la corriente litoral y el transporte. En la figura 3.16, se observa que existe un mayor ángulo alpha dentro del sector 3, asimismo, se denota que la velocidad de corriente tanto las estaciones 2, 3 y 4 pertenecientes a los sectores 2 y 3 (Ver Figura 3.16) se incrementan (ver tabla 3.18). Esto puede ser resultado de la interacción del oleaje con la morfología de la playa, como, el área de estudio se trata de una playa curva y el sector 3 representa la zona de mayor curvatura. El tren de oleaje al intentar alinearse con la playa y no lograrlo por la forma de la playa, arriba con un ángulo Alpha grande, lo cual produce fuertes corrientes litorales hacia la izquierda. Si bien el ángulo disminuye en la parte final del sector 3, esta zona está fuera de la zona de sombra que proporciona el espigón tipo “L”, por lo que la altura de ola es mayor, generando mayor turbulencia entre la rompiente de ola más lejana y la línea de playa, levantando más sedimento y ayudando al transporte de sedimentos por la presencia de la corriente litoral. La formulación

del transporte de sedimentos, es más sensible a la altura de ola rompiente que al ángulo Alpha, por lo que explicaría porque esta zona está en mayor erosión (sector 3). El ángulo, velocidad de corriente es mayor en el sector 3, junto con la altura de rompiente influyen en la erosión de este sector.

Dentro del sector 4, zona final de la curvatura, se observa disminución del proceso erosivo. Esto se da porque el ángulo del tren de olas decrece, es decir, se observa una menor magnitud de ángulo en estas estaciones con respecto a las anteriores ubicadas después del espigón. A la vez, el ángulo disminuye y no existe variaciones notables entre la estación 5 y 6 (Tabla 3.18). Generado así menor magnitud de corriente litoral (Tabla 3.18, Estación 5) y por ende un menor proceso de movimiento sedimentario. Sin embargo, en la estación 6 se observa un aumento de transporte litoral, esto se pudo deberse a la influencia del oleaje dado en dicha zona y la proporción directa de la fórmula de transporte litoral con la altura de ola rompiente. Cabe recalcar que, los datos obtenidos de transporte corresponden a la salida de campo de un día, por lo que, es recomendable realizar mayor monitoreo de playa para conocer los datos en un lapso mayor de tiempo y corregir errores. De manera adicional, se denota que dentro del sector 4, cuando el tren de ola es paralelo a la línea de costa, la tasa de erosión disminuye sustancialmente (véase transecto 17, tabla 3.2).

3.5 Propuesta de Soluciones Conceptuales.

En base a lo expuesto y al análisis descriptivo de la problemática por la dinámica costera presente en la playa de Humboldt del cantón General Villamil Playas. Se realizaron diferentes propuestas de soluciones respetando los deseos de las personas que habitan y viven de la playa. En la figura 3.5, se realizó la sectorización por uso de suelo, en donde se observó dos usos predominantes: Actividad turística y pesquera.

En la sección 3.1.3, se encuentra una sectorización dada por la influencia del espigón, el uso de playa y la tasa de erosión calculada por medio del complemento DSAS. En esta sectorización se pueden distinguir 4 sectores (véase figura 3.7). Cabe recalcar que, las propuestas de solución se enfocaran en los sectores que presentan pérdida de sedimentos; y

se deberán considerar siguientes restricciones generales observadas durante los recorridos realizados en el área de estudio:

- Por el uso de playa, no se puede cortar de forma perpendicular la playa para no interferir con el libre tránsito de los turistas a lo largo de toda la playa.
- No se puede interrumpir las actividades de los distintos sectores.
- A la vez, se deberá considerar los deseos y necesidades identificados por los autores por medio de entrevistas y recorridos dentro del área de estudio (Tabla 3.19).

Tabla 3. 19

Deseos y necesidades observadas por sector

Deseos/ Necesidades	Sector 2	Sector 3	Sector 4
Protección del oleaje			
Preservar la playa / Mitigar la erosión			
Generar playa			
No cortar la playa perpendicularmente			
No obstruir el paso de embarcaciones o cortar la playa de forma paralela.			

Con todas estas premisas, se proponen dos tipos de soluciones conceptuales usando ingeniería “Suave” e ingeniería “Dura” (véase los conceptos en el capítulo 1).

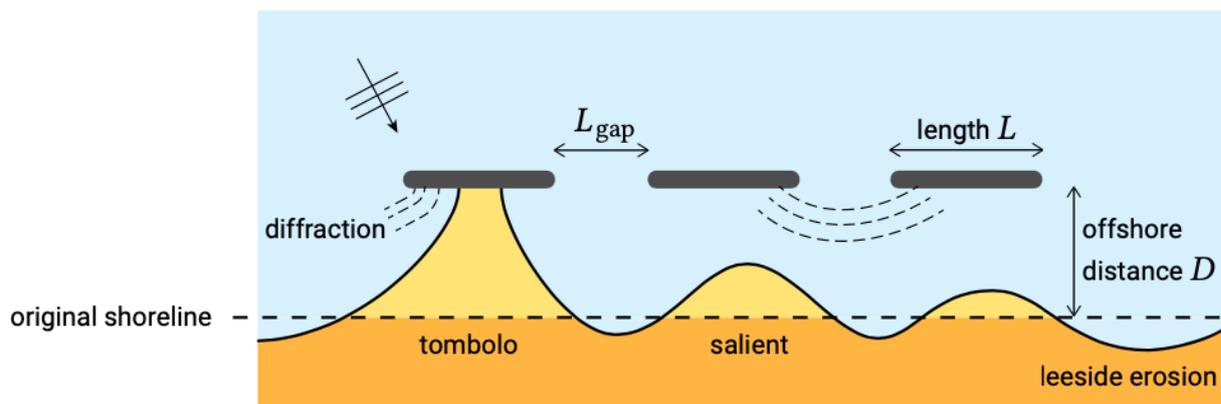
3.5.1 Primera Propuesta: Implementación de Rompeolas Sumergidos y Emergidos.

Los rompeolas paralelos a la costa o escolleras tienen como función principal proporcionar defensa y abrigo al reducir el flujo energético del oleaje, creando así una zona tranquila en el interior de la estructura. Existen tres tipos de rompeolas: los emergidos, los sumergidos y los semisumergidos (Sciarrone et al., 2012). Los rompeolas emergidos

constituyen una barrera que genera una marcada disminución de la acción del oleaje. Esta disminución en la energía del oleaje y la capacidad de transporte litoral puede provocar una sedimentación, formando áreas de playa, o incluso dar lugar a tómbolos, dependiendo de la proximidad del rompeolas a la costa y dimensiones de la estructura. Esta forma de protección produce principalmente fenómenos como la difracción, reflexión y disipación de la energía del oleaje al romper sobre el talud de la estructura (Sciarrone et al., 2012).

Figura 3. 17

Efectos de la morfología de la playa en rompeolas paralelas



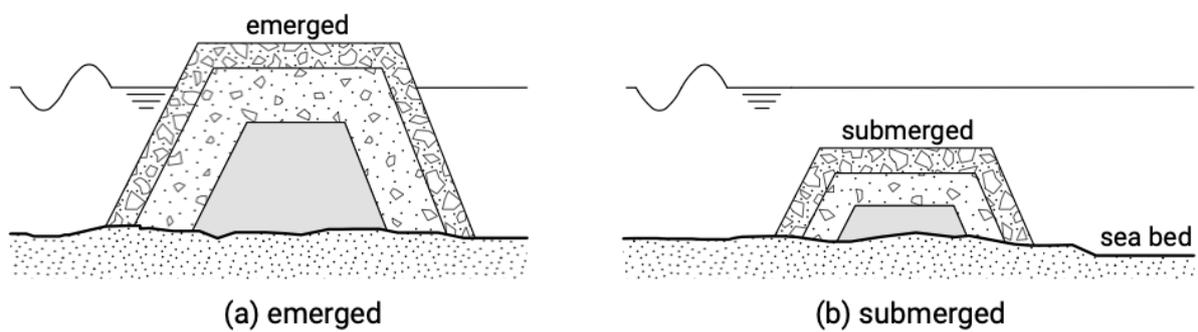
Nota: Tomada de Coastal Dynamics (p 489), por J. Bosboom y M. J. F. Stive, 2023, The Netherlands: Delft University of Technology

Por otro lado, los rompeolas sumergidos son estructuras que permanecen sumergidas de manera constante y su objetivo principal es reducir la acción del oleaje, manteniendo un equilibrio dinámico en la línea de costa. A diferencia de los rompeolas emergidos el cual generan una marcada disminución de la acción del oleaje, la disipación de energía de los rompeolas sumergidos depende de la distancia entre el manto principal de la estructura y el nivel de mar. El cual, según el diseño propuesto, se transmite únicamente una parte del oleaje, lo que obliga a las olas a romper al encontrarse con la estructura. Al disipar parcialmente la energía del oleaje, se crean condiciones hidráulicas propicias para la sedimentación de arena y, en consecuencia, para la regeneración de las playas. No obstante, su eficacia se ve

disminuida en condiciones extremas de oleaje y debido al aumento del nivel del mar (Sciarrone et al., 2012).

Figura 3. 18

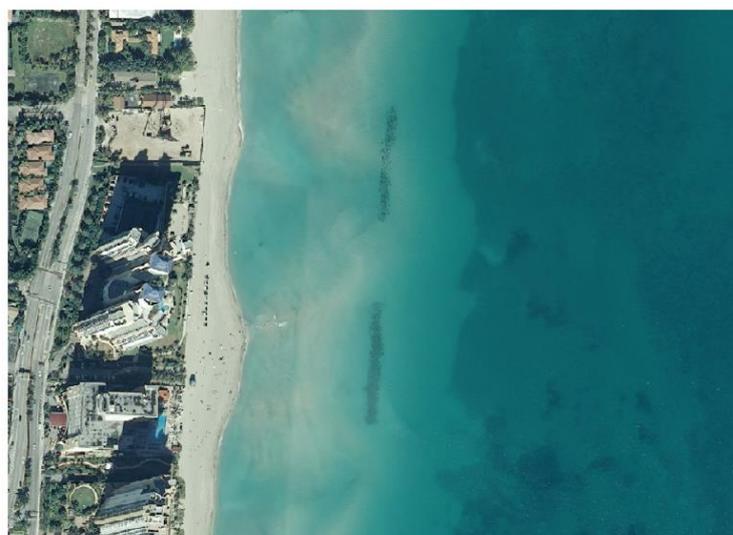
Diferencia entre rompeolas emergidos y sumergidos, corte transversal



Nota: Tomada de Coastal Dynamics (p 487), por J. Bosboom y M. J. F. Stive, 2023, The Netherlands: Delft University of Technology

Figura 3. 19

Ortofoto obtenida en febrero del 2009, en donde se muestra un sistema de rompeolas sumergidos en Sunny Isles, Estados Unidos produciendo salientes



Nota: Tomada de Coastal Dynamics (p 488), por J. Bosboom y M. J. F. Stive, 2023, The Netherlands: Delft University of Technology

Los Rompeolas tipo semisumergidas son estructuras versátiles que, dependiendo de las condiciones de la marea (pleamar y bajamar), pueden encontrarse sumergidas o emergidas. Estas estructuras desempeñan la función combinada de los dos tipos de rompeolas explicados anteriormente.

De acuerdo con las necesidades (tabla 3.19), se propone una estructuración de rompeolas sumergidos y emergidos dependiendo del sector.

Sector 2

Considerando la necesidad de crear una extensión de playa con un nivel de energía de oleaje reducido (véase la tabla 3.17), se propone lo siguiente:

En primer lugar, se sugiere la construcción de un rompeolas emergido, que permitirá estabilizar la línea de costa y disipar la energía del oleaje. Dependiendo de su proximidad a la costa, este rompeolas podría también generar salientes o tómbolos, contribuyendo así a la formación de áreas de playa.

En segundo lugar, se recomienda la demolición de la cabeza del espigón, es decir, la sección horizontal de la forma "L" (Véase figura 3.20 y 3.21). Esta medida se debe al estado que se encuentra dicho sector actualmente y por la futura implementación del rompeolas paralelo a la costa.

Figura 3. 20

Deslizamiento del manto principal en la cabeza del espigón, evidenciando la caída de barandales y constituyendo una zona de peligro para los usuarios



Figura 3. 21

Imagen tomada desde el lado derecho del espigón



Nota: Imagen tomada desde el lado derecho del espigón, mirando al mar, donde se aprecia el deslizamiento de piedras en la cabecera del mismo, así como el movimiento de los barandales y la disposición aleatoria de piedras para mitigar el embate del oleaje en dicha área.

Con estas acciones, se espera lograr una solución integral que favorezca la expansión de la playa, reduzca la energía del oleaje y contribuya a la estabilidad de la línea costera

Sector 3

De acuerdo con la información de la tabla 3.19, se identifica la necesidad de controlar la erosión, proteger el área del oleaje y evitar cualquier intervención que afecte la continuidad de la playa, ya sea de manera paralela o perpendicular a la costa. Por tanto, se propone lo siguiente:

La implementación de dos rompeolas emergidos situado fuera de la zona rompiente, paralela al tren del oleaje incidente. De esta forma, los rompeolas podrán reducir la energía del oleaje de forma inmediata, lo que a su vez reducirá la acción del oleaje y el ángulo en la línea de costa protegiéndola de fuertes corrientes litorales que inducen a una erosión severa en el sector.

Al optar por dos rompeolas emergidos fuera de la zona rompiente, se logra una solución que cumple con los objetivos de controlar la erosión y proteger el área del oleaje. Al establecer un paso la navegación de 50 metros, entre el rompeolas 1 y 2, no se estaría obstruyendo el paso de las embarcaciones a la zona de varadero. Esta propuesta respeta las necesidades específicas del sector y busca mantener el equilibrio y la integridad de la playa, al mismo tiempo que asegura una protección contra la erosión y el oleaje.

Sector 4

Por último, según las necesidades observadas, el cual en dicho sector se requiere estabilizar la línea de costa y reducir el impacto del oleaje. Así como, no afectar a la continuidad de la playa de manera perpendicular. Se propone:

La construcción de un rompeolas sumergido, el cual reducirá el flujo energético del oleaje y estabilizará la línea de costa para no tener más pérdidas de sedimentos en dicho sector.

3.5.2 Dimensionamiento conceptual.

Conforme a la propuesta planteada, se lleva a cabo una fase inicial de dimensionamiento con el propósito de determinar las dimensiones, orientación y respuesta de las estructuras en relación con la línea costera. La explicación previa de la propuesta se encuentra dividida en diversas secciones, cada una de las cuales exhibe particularidades distintas (consultar Tabla 3.19). Siguiendo la disposición de la sección 3.5.1 de las estructuras a lo largo del litoral, para su dimensionamiento se debe reconocer los siguientes parámetros: la longitud de las estructuras (L), distancia entre las estructuras y la línea de costa (X) y separación entre las propias estructuras (Lg).

En el Dimensionamiento de las estructuras se debe considerar las respuestas de la playa que se desea, esto depende del sector al que nos queremos enfocar. En el sector 2, se desea generar playa, por lo tanto, se desea crear playa por medio de acreción, y esto es posible por la formación de tómbolos y de salientes. Como el sector 2 es de uso turístico y se encuentra confinado en un lado por la presencia del espigón, se requerirá la formación de saliente para poder tener playa frente a la estructura (dentro de la zona de rompiente). Además, hay que considerar que la formación de tómbolo se realizará si la estructura se encuentra dentro de la zona de surf (Gourlay, 1981), por lo que se considera ubicarla dentro de la zona de rompiente. En el sector 3, se propone dos rompeolas emergidos fuera de la zona de rompiente, y el sector 4 la construcción de un rompeolas sumergido en la zona de rompiente o antes de la zona de rompiente.

Para llevar a cabo el prediseño de las estructuras, se recurre a la relación propuesta por Dally y Pope (1984), usada en el estudio del diseño de una estructura de protección costera en Libertador Bolívar – Santa Elena por Cansing & Mena (2018), utilizando el criterio de formación de saliente, $L/X = 0.5 - 0.67$. En la sección 3 hay que considerar la separación de los dos rompeolas, la separación (Lg) será de 50 m.

Tabla 3. 20

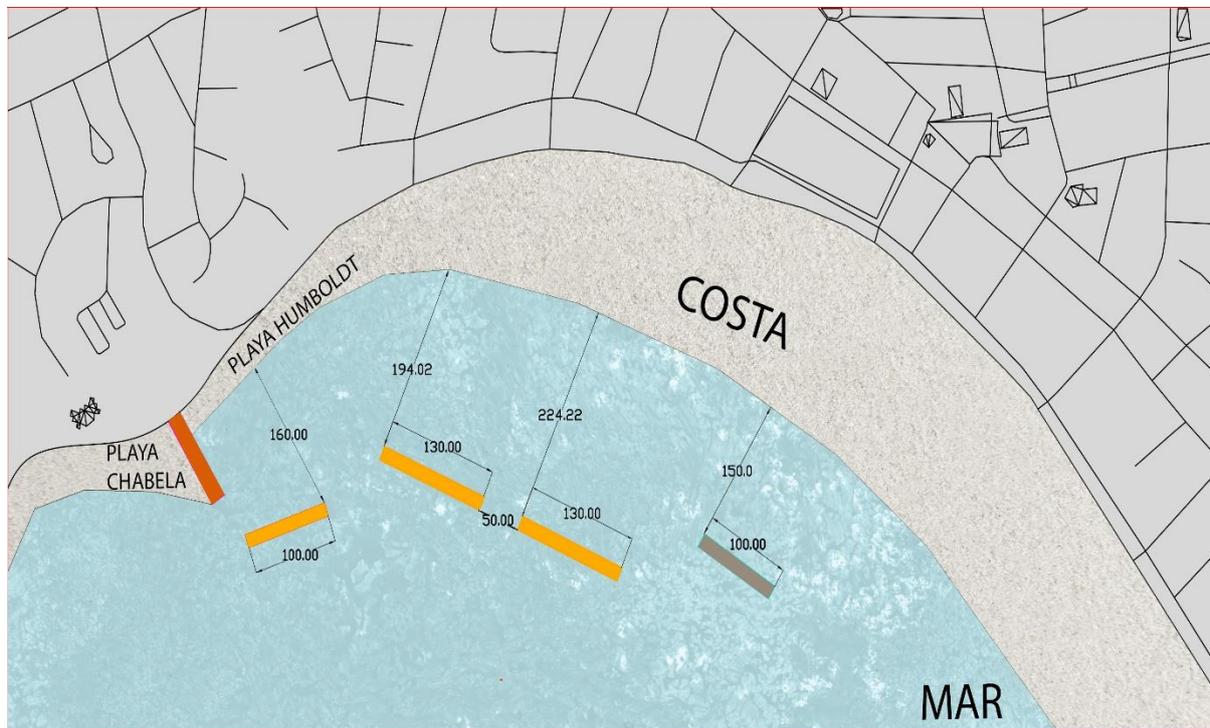
Dimensiones de las estructuras de la propuesta de rompeolas emergidos y sumergido

Sectores	Parámetros	Criterio para formar saliente $L/X = 0.5 - 0.67$
Sector 2	$X_1 = 160$	$L = 80 - 107.5$ m $L_1 = 100$ m
Sector 3	$X_2 = 194$ $X_3 = 224$ $L_g = 50$ m	$L_2 = 97$ m – 130 m $L_3 = 112 - 150$ m $L_2 = 130$ m y $L_3 = 130$ m
Sector 4	$X_4 = 150$	$L_4 = 75 - 100.7$ m $L_4 = 100$ m

La propuesta tendrá una estructura similar a la mostrada a continuación:

Figura 3. 22

Esquematación de la primera propuesta



Rompeola Emergido
 Rompeola Sumergido

3.5.3 Propuesta 2: Sand Motors, geotubos y arrecifes artificiales.

Sand Motors es una innovadora solución propuesta por ingenieros costeros holandeses para abordar la erosión de playas en áreas específicas. Este enfoque implica el dragado de arena y su depósito en la zona erosionada en una sola operación. Luego, se confía en la acción natural del viento y el oleaje para distribuir gradualmente la arena a lo largo de la costa. A diferencia de la regeneración de playas tradicional, donde se realiza la reposición gradual de arena, con Sand Motors se coloca todo el volumen de arena en un punto específico, permitiendo que los procesos naturales de transporte sedimentario la dispersen con el tiempo (Galindo Vergel & Salgado Meléndez, 2020).

Este método se basa en la capacidad de la naturaleza para redistribuir la arena, aprovechando la dinámica natural del viento y el oleaje para lograr un proceso de distribución más sostenible y efectivo. Al adoptar Sand Motors, se busca una estrategia de control de la erosión más respetuosa con el medio ambiente y menos costosa (Sierra-Howard, 2015).

Se sugiere la adopción de dos estrategias para abordar los desafíos presentes en cada sector. En el sector 2, se propone la implementación de un Sand Motors en el lado izquierdo del espigón, mirando al mar. Este proceso consiste en rellenar la forma en L del espigón con sedimentos arenosos. Una vez concluido el proceso de Sand Motors, se sugiere complementar el proyecto mediante la implementación de geotubos en la parte final de la zona intermareal del sector 2. Los geotubos (Véase Figura 3.23) son contenedores hechos de geotextil, el cual son llenados en un 85 a 95% con un material de dragado, en este caso arena.

Al implementar geotubo en la parte final de la zona intermareal se podrá reducir el transporte offshore de sedimentos hacia el mar y, en consecuencia, evitar la pérdida excesiva de sedimentos hacia el mar. Con ello, se logrará permitir únicamente el transporte paralelo a lo largo de la costa, lo que facilitará una distribución efectiva de sedimentos a lo largo de la costa.

Figura 3. 23

Ejemplo gráfico de la colocación de los geotubos en el frente de playa



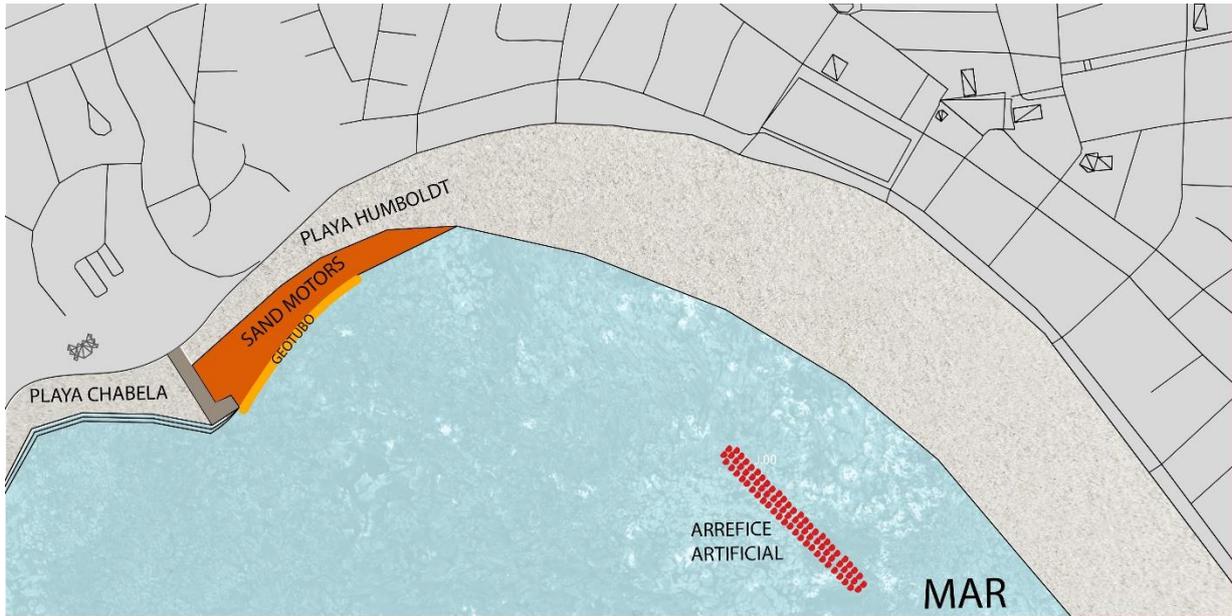
Nota: En la figura se muestra la función estabilizadora de un geotubo para la playa. Tomada de “Construcción Marítima y Obra General” por Constructora Pech. 2020. <https://constructorapech.com.mx/2020/07/30/geotubos-contralaerosion/>

Dado que la dirección predominante del transporte litoral es hacia la izquierda, la aplicación de esta solución aseguraría un movimiento continuo de transporte de sedimentos, beneficiando tanto los sectores 2 como 3. Cabe recalcar que, el sector 2 será beneficiado de forma inmediata con una gran área de playa, pero esta área se desplazará con el tiempo a lo largo de toda la costa.

En cuanto al sector 4, se propone la introducción de arrecifes artificiales. Estas estructuras, construidas con concreto de alta resistencia y con perforaciones, operarían de manera similar a un rompeolas sumergido, disipando la energía del oleaje. Sin embargo, debido a su origen y forma, estos arrecifes artificiales también pueden favorecer la creación de un ambiente biodiverso, dependiendo de las condiciones ambientales presentes en la zona. Al implementar estas estrategias, se busca abordar de manera eficiente los desafíos específicos de cada sector, garantizando una gestión integral y sostenible de la costa, al tiempo que se promueve la conservación del ecosistema marino y su biodiversidad. A continuación, se presenta el esquema de la propuesta 2:

Figura 3. 24

Mapa de implementación de las soluciones de Sands Motors, arrecifes de coral y geotubos en la zona de estudio



Nota: En el sector 1 se observa la arena de playa trasladada por la solución de Sands Motors, y en el sector 4, presencia de arrecifes artificiales.

3.5.4 Dimensionamiento conceptual.

En este apartado se realizará un prediseño conceptual de la propuesta 2. Primero se realiza una estimación de volumen de sedimento necesario para generar un ancho de playa de 47 metros aproximadamente. Para ello es necesario conocer diferentes parámetros como: el oleaje, altura significativa y periodo, profundidad de cierre o altura de la berma de la playa y el diámetro de sedimento nativo como el diámetro de sedimento aceptado para la aportación en el sector. En el sector dos se han obtenidos los siguientes valores obtenidos en expediciones en campo (Tabla 3.21).

Tabla 3. 21

Parámetros necesarios para los cálculos de volumen

Variable	Cantidad
Altura de ola significativa (H _s)	0.8 m
Altura de ola significativa (T 100 de retorno) (H _{s100})	=3*H _s =2.4 m
Periodo	10.2 s

Ancho de playa esperada	47 m
Altura de berma (B)	1.5 m
Diámetro nativo	0.218 mm
Diámetro de aportación	0.327 mm
Distancia de relleno	37 m

Se procede a calcular la profundidad de cierre, siguiendo la ecuación de Birkemeier (Ec 3.1) mostrada a continuación.

$$d_c = 2.28 * H_s - 68.5 \left(\frac{H_{s100}^2}{g * T^2} \right) \quad (3.1)$$

$$d_c = 2.28 * 2.4 - 68.5 \left(\frac{2.4^2}{9.81 * 10.2^2} \right)$$

$$d_c = 5.08 \text{ m}$$

Para ello se procede a realizar un cálculo del volumen requerido aproximado para la alimentación artificial de la playa Humboldt a través de la ecuación propuesta por Coastal Engineering Manual (Ec 3.2). Cabe recalcar que, en la ecuación 3.2 se multiplica por el ancho del área a dragar; pero, al ser un relleno irregular se procedió a calcular la distancia de avance de línea de costa cada 50 metros (Figura 3.25).

$$V = Y(B + dc) * D \quad (3.2)$$

Siendo:

V: Volumen requerido a dragar

B: Altura de berma

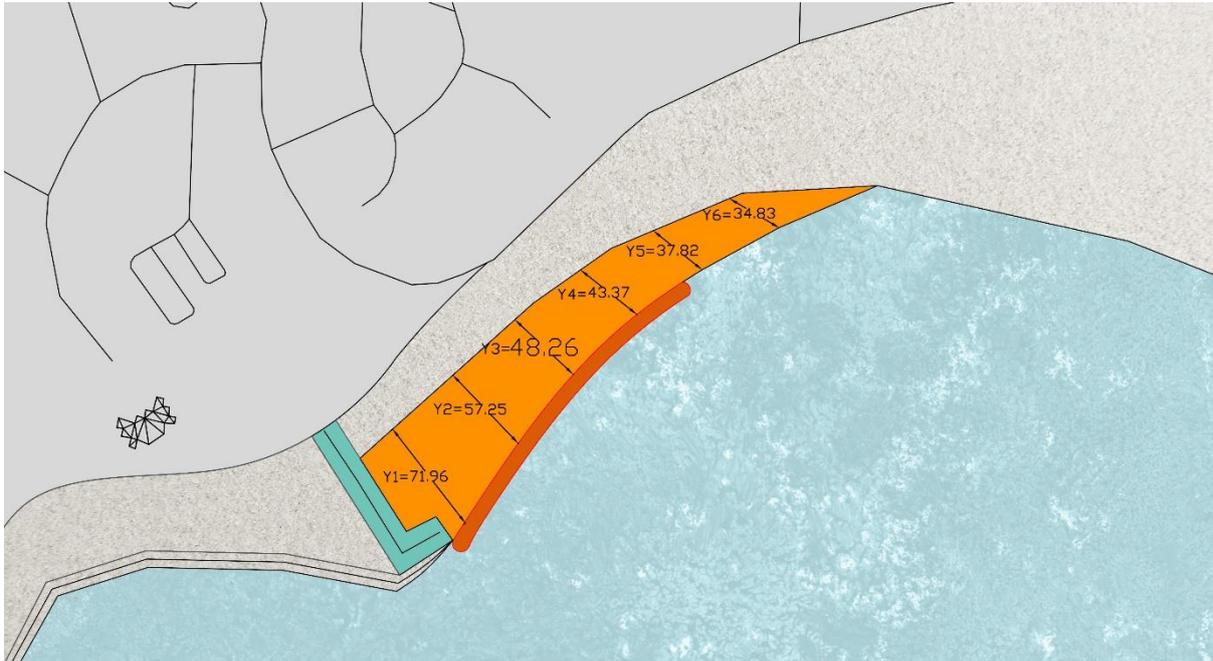
dc: Profundidad de cierre

D: Ancho del área a dragar

Y: Distancia de playa que va a ser rellenada

Figura 3. 25

Perfiles de avance de línea de costa



Se procede a calcular el avance de la línea de costa para cada perfil asignado en la figura (3.25):

Para Y1=71.96 m

$$V = 71.96 * (1.5 + 5.08) * 50$$

$$V = 23675 \text{ m}^3$$

Para Y2=57.25 m

$$V = 57.25 * (1.5 + 5.08) * 37$$

$$V = 18835 \text{ m}^3$$

Para Y3=48.26 m

$$V = 48.26 * (1.5 + 5.08) * 50$$

$$V = 15877 \text{ m}^3$$

Para $Y_4=43.37\text{m}$

$$V = 43.37 * (1.5 + 5.08) * 50$$

$$V = 14269 \text{ m}^3$$

Para $Y_5=37.82\text{m}$

$$V = 37.82 * (1.5 + 5.08) * 50$$

$$V = 12443 \text{ m}^3$$

Para $Y_6=34.83\text{m}$

$$V = 34.83 * (1.5 + 5.08) * 50$$

$$V = 11450 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el volumen requerido para colocar en el Sand Motors a es igual a $96\,549 \text{ m}^3$.

3.6 Herramientas previas antes de ejecutar cualquier propuesta: Plan de Manejo de la Playa

El desarrollo de un Plan de Manejo para la zona de estudio emerge como una vía esencial para afrontar los retos planteados por el proceso erosivo de la playa y la necesidad de protección costera. La urgencia de una gestión eficaz y competente se torna vital para contrarrestar la pérdida de terreno y establecer la sostenibilidad deseada por la comunidad. Este enfoque estratégico se orienta a la salvaguarda integral de la playa y su ecosistema, así como al desarrollo sostenible de la comunidad que depende de ella. Además, busca garantizar la seguridad de los habitantes locales y preservar en la medida de lo posible la infraestructura cercana.

En la búsqueda de estas metas, se conciben estrategias de gestión y protección específicas que se adapten a las necesidades puntuales de la playa. Se debe establecer la necesidades de cada sector, como previamente se ha planteado en propuestas anteriores. Particularmente, el sector 2 surge como motivo de especial preocupación al carecer de zona

supramareal o supralitoral durante las mareas altas. Esto no solo limita las actividades de sol y playa, sino que, en condiciones de oleaje intenso o eventos extremos, el agua alcanza las infraestructuras situadas en esta área, imposibilitando las actividades recreativas.

Es importante destacar que esta propuesta constituye un panorama general de un Plan de Manejo Costero, abarcando su estructura y las estrategias concebibles para lograr los objetivos delineados. En este proceso, la colaboración activa entre las autoridades locales, la comunidad, el sector privado, manejadores costeros y científicos se erige como un pilar fundamental para la concepción y ejecución del plan. El ciclo del Plan comprende diversas etapas, incluyendo una fase de evaluación inicial que busca retroalimentación con el propósito de adaptarse y optimizar el Plan de Manejo Costero. Según el Manual para Evaluar los Progresos en la Gestión Costera, un plan de manejo consta de las siguientes etapas:

Etapa 1: Identificación y evaluación de asuntos claves

- Identificar y evaluar los principales asuntos en el aspecto ambiental, social e institucional y sus implicaciones.
- Identificación de actores claves y sus intereses; es decir, reconocer cuales son los actores en el sector público, privado y público en general.
- Seleccionar los asuntos claves, en donde, se van a enfocar los objetivos del plan de manejo.
- Definir los objetivos del plan de manejo.
- Evaluar la factibilidad del plan de manejo, como el liderazgo gubernamental y no gubernamental sobre los asuntos claves seleccionados.

Etapa 2: Preparación del plan de manejo

- Realizar proyectos científicos enfocadas a los objetivos establecidos en el plan de manejo.
- Realizar capacitaciones que promuevan un programa de educación pública que implique a los actores claves con mayor interés.

- Elaborar plan de gestión y un marco legal para su debida aplicación.
- Elaborar las primeras estrategias de aplicación del plan de manejo, como un plan piloto.

Etapa 3: Adopción formal y financiamiento

- Obtener la aprobación de las autoridades gubernamentales para el proceso de adopción formal y formulación de políticas.
- Obtener el financiamiento necesario para la aplicación del programa.

Etapa 4: Implementación

- Modificar las estrategias del plan de manejo, según su grado de aceptación al público de interés.
- Fortalecer los marcos institucionales y promover el cumplimiento de las políticas.
- Llevar a cabo mecanismos para la coordinación institucional para fortalecer la capacidad técnica y administrativa.
- Generar actividades para mantener la participación de los principales actores interesados.
- De ser necesario llevar a cabo el diseño de obras de ingenieriles o el mantenimiento de la infraestructura física.
- Supervisar los primeros resultados como las tendencias en el ámbito: social y del ecosistema.

Etapa 5: Evaluación

- Evaluar que implicaciones ha generado el programa en los problemas abordados.
- Realizar las evaluaciones externas para generar las respectivas retroalimentaciones y los cambios pertinentes en las estrategias aplicadas en el plan de manejo de gestión costera.

El plan de manejo propuesto abarca diferentes etapas para su diseño, implementación y evaluación con el fin, de abordar los problemas costeros, ejecutando soluciones efectivas y dirigidas al área de estudio de interés. Protegiendo la seguridad de los usuarios frente a los efectos derivados de la pérdida de terreno en la totalidad del área de estudio.

En la preparación del plan, se fijan metas para salvaguardar la seguridad de las habitantes, estableciendo alternativas estructurales como no estructurales. Las no estructurales, surgen como alternativa de la construcción de estructuras en las costas que demandan de grandes cantidades de dinero, posibles impactos ambientales, y largos tiempos de implementación y de respuesta. Estas medidas comprenden la elaboración de planes de evacuación, plantación de vegetación, regeneración de playa, estabilización de dunas, etc.

3.7 Ventajas y Desventajas generales por cada estructura propuesta.

De manera adicional se presentan las ventajas y desventajas de forma general al colocar cada una de las estructuras:

Tabla 3. 22

Ventajas y desventajas de las soluciones

Estructura	Ventajas	Desventajas
Rompeolas	Controlan la erosión	Constituyen un peligro para la navegación (Beltran Mayorga & Rodríguez Paneque, 2012).
	Estabilizan la línea de playa	Pueden existir una disminución de la calidad del agua cuando la circulación entre las estructuras y la playa se ve obstaculizada (Beltran Mayorga & Rodríguez Paneque, 2012).
	Reduce significativamente la energía de oleaje	Según la proximidad entre la estructura y la playa puede dar lugar a la formación de tómbolos, los cuales impactan la
	En el caso de los rompeolas paralelos, no interrumpen la playa.	

		configuración de la línea costera y pueden ocasionar erosión en áreas cercanas (Rodríguez Paneque & Beltrán Mayorga , 2012).
Sand Motors	La distribución a lo largo de la costa puede tardar mucho tiempo debido a que está directamente influenciada por la acción del oleaje y los vientos (Sierra-Howard, 2015).	Puede modificar la estructura de la costa (Sierra-Howard, 2015).
	Genera un menor impacto ambiental	Es necesario una reposición sedimentaria de forma periódica.
Arrecifes Artificiales	Fomenta la biodiversidad marina y se puede construir de varios materiales de construcción (Sierra-Howard, 2015).	El proceso de instalación puede requerir de buzos para su correcta colocación e implica un gran tiempo de construcción (Sierra-Howard, 2015).
Plan de Manejo Costero	Integran diversos actores para el entendimiento de la problemática.	Requieren de tiempo para su implementación

3.8 Análisis de Costos

3.8.1 Costos referenciales de la propuesta 1 Rompeolas emergidos y sumergido.

En la determinación de costos de la propuesta de rompeolas se analizó información bibliográfica de los costos de proyectos en la zona costera y consulta con profesionales en el campo con experiencia en construcciones. En el proceso de construcción de los rompeolas es necesario adquirir maquinaria y equipos, ya sean alquilados o comprados para el proyecto. Cabe mencionar que las dimensiones obtenidas deben ser revisadas, además, es necesario obtener datos actuales de la batimetría del sitio, realizar dimensionamientos detalladas de las estructuras; altura, cota de coronación, grosor de las capas, pendiente interna y externa de la estructura; obtener la densidad mínima necesaria de las rocas para cada capa, entre otras.

En el método de construcción se planea construir un espigón hacia el rompeolas del sector 4, este espigón servirá como centro de acopio de materiales para su traslado con el uso de barcaza en la construcción de los demás rompeolas. El espigón será retirado luego de la construcción de los 4 rompeolas.

Se han considerado el alquiler de una barcaza para el transporte de material al agua, y que ayude en proceso de construcción. Estos valores se encuentran bajo la denominación “Transporte de material al agua” en la tabla 3.27.

La construcción de cada rompeolas se estima de un mes, además del rompeolas se construye un espigón que será de conexión de tierra a mar para colocar los materiales a la barcaza, este espigón conectará con el rompeolas 4 (sector 4), el cual se construirá de último, para luego proceder a retirar el espigón. El costo del espigón se estimó, tomando como referencia los costos obtenidos en este estudio en la construcción de un rompeola, se estima un valor de \$800 000. Los precios unitarios de los materiales del rompeolas son precios referenciales del estudio del diseño de una estructura costera para playa Bruja, Libertador Bolívar por (Cansing Andrade & Mena Naranjo, 2018). El cálculo del volumen y el diseño se pueden observar en el Anexo 6.

Tabla 3. 23

Costos Referenciales Rompeolas 1

Costos Referenciales Rompeolas 1					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Precio Total
				Unitario	
Geotextil NT 3000	m2	4851	\$	3.71	\$ 17,997.21
Material para replantillo y núcleo	m3	4370	\$	24.45	\$ 106,846.50
Material para reposicion 30 %	m3	1311	\$	24.45	\$ 32,053.95
Transporte material para replantillo y núcleo (90 km)	m3*km	511290	\$	0.21	\$ 107,370.90
Material Capa Intermedia	m3	2600	\$	16.60	\$ 43,160.00
Material para reposicion 20 %	m3	520	\$	16.60	\$ 8,632.00

Transporte material para capa intermedia	m3*km	280800	\$	0.25	\$ 70,200.00
Material Capa Externa	m3	5600	\$	45.90	\$ 257,040.00
Material para reposicion 15 %	m3	840	\$	45.90	\$ 38,556.00
Transporte material para capa externa	m3*km	579600	\$	0.36	\$ 208,656.00
Sub Total					\$ 890,512.56

Nota: Adaptado de (Cansing Andrade & Mena Naranjo, 2018).

Tabla 3. 24

Costos Referenciales Rompeolas 2 y 3

Costos Referenciales Rompeolas 2 y 3					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	
Geotextil NT 3000	m2	6310	\$	3.71	\$ 23,410.10
Material para replantillo y núcleo	m3	5681	\$	24.45	\$ 138,900.45
Material para reposicion 30 %	m3	1704.3	\$	24.45	\$ 41,670.14
Transporte material para replantillo y núcleo (90 km)	m3*km	664677	\$	0.21	\$ 139,582.17
Material Capa Intermedia	m3	3380	\$	16.60	\$ 56,108.00
Material para reposicion 20 %	m3	676	\$	16.60	\$ 11,221.60
Transporte material para capa intermedia	m3*km	365040	\$	0.25	\$ 91,260.00
Material Capa Externa	m3	7280	\$	45.90	\$ 334,152.00
Material para reposicion 15 %	m3	1092	\$	45.90	\$ 50,122.80
Transporte material para capa externa	m3*km	753480	\$	0.36	\$ 271,252.80
Sub Total					\$ 1,157,680.06

Nota: Adaptado de (Cansing Andrade & Mena Naranjo, 2018).

Se presenta un resumen de los costos generales de la propuesta de los rompeolas, en un cronograma valorado de la duración de la implementación de la solución. Se considera que, para el cuarto rompeola el gasto aproximado es la mitad del gasto dado por el primer

rompeolas del sector 2, ya que tienen las mismas longitudes pero al ser sumergido disminuye la altura, ya que, no se considera parámetros como: Run up, rango de mareas y predicciones de índices de aumento del nivel del mar ocasionado por la variabilidad climática o fenómenos naturales (El Niño) . Adicionalmente se establece como, gastos indirectos el 15 % del costo del proyecto, considerando costos de logística, administración, y gastos de materiales extras. Con todo lo expuesto se considera un costo referencial total del proyecto de \$ 5' 463, 798.

Tabla 3. 25

Resumen de Costos Referenciales de la propuesta

	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	
Espigón	800,000					\$ 800,000
Rompeolas 1		890,513				\$ 890,513
Rompeolas 2			1'157,680			\$ 1,157,680
Rompeolas 3				1'157,680		\$ 1,157,680
Rompeolas 4					445,256	\$ 445,256
Transporte material al agua	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	\$ 300,000
Subtotal	860,000	950,513	1'217,680	1'217,680	505,256	\$ 4,751,129
Costos Indirectos 15%	129,000	142,577	182,652	182,652	75,788	\$ 712,669
Total						\$ 5'463,798

3.8.2 Costos Referenciales de la propuesta 2: Sand Motor, geotubos y arrecifes de coral.

La Propuesta 2 se centra en la colaboración con la naturaleza, específicamente en el uso del Sand Motor y la creación de arrecifes artificiales. La implementación de esta propuesta requiere una serie de pasos importantes, comenzando con un estudio exhaustivo de dragado. Este estudio abarca diversos aspectos, como el análisis de sedimentos, la identificación de las zonas de dragado y depósito, la determinación de los volúmenes a ser dragados, entre otros elementos críticos. Además del estudio de dragado, es esencial llevar a cabo investigaciones detalladas para diseñar los arrecifes y realizar la batimetría de la zona.

Cuando se trata de evaluar los costos asociados con el Sand Motor, se considera el costo del dragado, que depende en gran medida del volumen que debe ser rellenado. Para calcular estos costos, se toman como referencia estudios previos de trabajos de dragado realizados en el canal de acceso a diversos terminales portuarios en el río Guayas. La evaluación de los costos de contratación de un dragado se basa en varios factores, como el volumen de material a ser dragado, la maquinaria y equipos requeridos, así como la selección de la draga adecuada, entre otros aspectos relevantes. Por otro lado, es importante destacar que los geotubos utilizados se llenan con arena local, y los arrecifes artificiales se prefabrican en la instalación más cercana disponible.

Esta propuesta, al basarse en estudios detallados y en la colaboración con la naturaleza, busca garantizar la eficacia y la sostenibilidad de las medidas costeras propuestas.

Tabla 3. 26

Costos Referenciales del sand motor, geotubos y arrecifes artificiales

	Unidad	Cantidad	Precio Unitario		Precio Total
Sand Motor					
Arena a dragar	m3	96549	\$	4	\$ 386,196
Geotubos					
Arena para geotubos	m3	16500	\$	4	\$ 66,000
Geotextil N3000	m2	7854	\$	4	\$ 29,138
Arrecifes artificiales prefabricados					
Arrecifes artificiales prefabricados		90	\$	1,400	\$ 126,000
Subtotal					\$ 607,334

Nota: El precio de los arrecifes prefabricados se tomaron de (Nebot Gómez, 2015) con el diseño propuesto. De manera adicional, el precio unitario por dragado de metro cubico de arena fueron obtenidos a través de entrevistas realizadas al personal del Servicio de Dragas de la Armada (SERDRA) en expediciones de campo, en el año 2022.

Se presenta un resumen de costos en un cronograma valorado del tiempo de implementación de la propuesta, además, se incluye costos indirectos del 20% de gastos adicionales de logística, administración, etc. El costo total de la propuesta es de \$ 721 601.

Tabla 3. 27

Resumen de costos referenciales de la propuesta 2

	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	
Trabajos					
Previos	\$ 38,620				\$ 38,620
Dragado Sand					
Motor		\$ 128,732	\$ 128,732	\$ 128,732	\$ 386,196
Geotubos		\$ 44,569	\$ 44,569		\$ 95,138
Arrecifes					
artificiales			\$ 63,000	\$ 63,000	\$ 126,000
Subtotal	\$ 38,620	\$ 160,428	\$ 223,428	\$ 178,859	\$ 607,334
Costos					
indirectos 15%	\$ 5,793	\$ 24,064	\$ 33,514	\$ 26,829	\$ 90,200
Total					\$ 697,534

El costo total sin la aplicación de los arrecifes artificiales es aproximadamente 697,534 dólares americanos.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Los datos obtenidos del análisis del cambio de la línea de costa desde el 2006 al 2023 muestran que el lado sedimentario del área de estudio, lado derecho del espigón mirando al mar, causada por la presencia del espigón, se encuentra a su máxima capacidad de retención de sedimentos, ocasionando un bypass de sedimentos hacia el lado izquierdo.
- La utilización de imágenes satelitales de todos los años contemplados en el estudio ha posibilitado una mejora en la precisión de los resultados del retroceso de la línea de costa mediante la herramienta DSAS
- La curvatura de la playa desempeña un rol de suma relevancia en la dinámica de los procesos oceánicos, manifestando variados valores en el ángulo del tren de olas rompiente en cada punto de la costa.
- Los resultados DSAS mostraron tasas de acreción del lado derecho del espigón con tasas máximas de 0.43 m/año, en donde se presenta la sedimentación ocasionada por la presencia del espigón, y del lado izquierdo del espigón se presenta tasas de erosión que van de valores menores en el sector 2, y aumentan a medida que se sigue recorriendo hasta alcanzar valores máximos de -3.53 m/año en el sector 3, y a partir de este punto la erosión decrece hasta llegar a valores de -0.21 m/año.
- La evolución de la línea de costa del 2006 al 2023 obtenidas por las imágenes satelitales, las correcciones de marea y el procesamiento en DSAS, presenta desplazamientos de retroceso de hasta 70 m en los 18 años estudiados.
- La metodología empleada para la corrección de la marea, cuyo propósito radica en atenuar los errores espaciales que puedan derivarse del avance de la línea de agua debido al incremento del nivel del mar causado por las mareas, debe ser cuidadosamente aplicada ya que no se puede suponer que la pendiente es uniforme en

todos los años. Por lo que, se recomienda generar un histórico de perfiles para poder utilizar de forma correcta esta metodología.

- Los datos recolectados de la salida de campo del 1 de julio a la zona de estudio son datos instantáneos correspondientes a las condiciones oceanográficas de la playa de ese día. Si bien nos dan idea de la caracterización litoral de la zona, no representan todo el comportamiento de los últimos 20 años.
- Las soluciones conceptuales son efectivas para mitigar erosión y generar playa, según cual sea el caso de su aplicación. Sin embargo, estas estructuras son efectivas en playas abiertas y rectas, donde la línea de playa en su mayor parte es recta. La playa de estudio contempla morfología diferente, con una configuración de playa curva, semicircular o cóncava, además, ya se encuentra con la presencia de una estructura de espigón tipo “L”, por lo que la implementación de otra estructura cambiaría la dinámica de la playa. No se puede saber con certeza la interacción de las estructuras con la dinámica de la playa.
- La propuesta de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) que involucra el uso de sand motors, geotubos y arrecifes artificiales se destaca como una intervención respetuosa con el entorno natural y sostenible para abordar la erosión costera, especialmente en playas con limitada presencia de dunas o berma.

4.2 Recomendaciones

- Para obtener una estimación más precisa de la corrección por marea, se sugiere llevar a cabo la recolección periódica de perfiles de playa. Al utilizar perfiles históricos, se podrá contar con información valiosa para realizar un análisis más detallado y mejorar la estimación de la altura de marea. Esta práctica permitirá obtener datos más confiables y precisos, lo que contribuirá significativamente en el análisis de retroceso de línea de costa anual.
- Con el fin de obtener un conocimiento sobre la dinámica de la playa, es altamente recomendable llevar a cabo mediciones periódicas de caracterización litoral. Estas

mediciones permitirán mejorar el análisis y comprender de manera más precisa los cambios que ocurren en la costa a lo largo del tiempo.

- Las propuestas de solución planteadas son mecanismos efectivos para mitigar la erosión dentro de la playa Humboldt del cantón General Villamil Playas. Sin embargo, se recomienda antes de implementar una de ellas generar modelados computacionales para conocer cuáles serían sus implicaciones en la morfología de la playa.
- Antes de seleccionar cualquier propuesta ingenieril, subrayamos la importancia crucial de llevar a cabo un meticuloso levantamiento batimétrico del área en consideración. Este paso resulta de vital importancia para adquirir un conocimiento preciso de la topografía submarina, lo cual es esencial para tomar decisiones fundamentadas y garantizar la factibilidad de la propuesta.
- En el caso de considerar la implementación de la propuesta dos, el cual consiste en la implementación de un sand motor, geotubos y arrecifes artificiales. Se recomienda adicionalmente llevar a cabo la recolección de muestras de arena en las zonas de interés. Esto será clave para identificar las ubicaciones con sedimentos idóneos para el dragado necesario.
- Para generar un plan de manejo costero es importante tomar en cuenta la participación de la ciudadanía y de los principales usuarios, si se lleva a cabo el plan de manejo hay que asegurarse que las voces de los ciudadanos sean escuchadas y que se los involucre durante el proceso de planificación y de implementación.

Bibliografía

- Andrade, M. R., & García, S. (2002). *Diagnóstico de la realidad turística del cantón Playas*.
Escuela Superior Politécnica del Litoral.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4632>
- Astigarraga, J., & Cruz-Alonso, V. (2022). ¡Se puede entender cómo funcionan Git y GitHub!
Ecosistemas, 31(1). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2332>
- Ayón, H. (1988). *Grandes rasgos geomorfológicos de la costa ecuatoriana*.
- Baldock, J. (1982). *Boletín de la explicación del Mapa Geológico de la República del Ecuador*.
División de Investigación geológico-Minera.
- Baños, G., & Murillo Zambrano, J. (2017). *Diseño de sistema de espigones con geotubos para la protección del malecón de Crucita* [Trabajo de grado, Universidad de Especialidades Espíritu Santo UEES]. <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1940>
- Beltran Mayorga, H., & Rodríguez Paneque, R. (2012). *Estudio de los procesos de erosión-sedimentación playa EL ESPINO, República de El Salvador*.
<https://doi.org/10.1000/2012>
- Burrough, P. A., Goodchild, M. F., McDonnell, R. A., Switzer, P., & Worboys, M. (1998).
Principles of Geographical Information System. Oxford University Press.
- Cansing Andrade, S., & Mena Naranjo, G. (2019). *Diseño de una estructura de protección costera para playa bruja, ubicada en la comunidad Libertador Bolívar-provincia de Santa Elena* [Trabajo de grado-Pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/48182>
- Carranza-Edwards, A. (2010). Causas y consecuencias de la erosión de playas. En *Impactos del cambio climático sobre la zona costera* (pp. 37–51). Instituto de Ecología A. C. (INECOL). www.ine.gob.mx

Chico Ramírez, L., & Tapias Vargas, Y. (2014). *Análisis y aplicación del uso de estructuras hidráulicas blandas empleando geosintéticos para la protección costera caso de estudio: Estructuras en la línea de costa de Cartagena de Indias*. Universidad de Cartagena.

<https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/1362/Trabajo%20de%20Grado%20Final%20-%20Chico%20%26%20Tapias.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chuez Cedeño, M. F., & Ramírez Ruiz, L. N. (2021). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar*. ESPOL. FIMCM. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51445>

Corporación Andina de Fomento. (1998). *El fenómeno El Niño 1997-1998 Memorias, retos y soluciones*.

<https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/675/Las%20lecciones%20de%20El%20Ni%C3%B1o.%20Ecuador.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Delft3D. (2023). *About Delft3D*. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/about>

(Department of the Army US Army Corps of Engineers. (2002). Coastal Engineering Manual Part II: Coastal Hydrodynamics. En *Coastal Engineering Manual* (Vol. 1).

Emery, K. O. (1961). A Simple Method of Measuring Beach Profiles. *Limnology and oceanography*, 6(1), 90–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.4319/lo.1961.6.1.0090>

Galindo Vergel, C., & Salgado Meléndez, K. (2020). *Desarrollo de una metodología para el diseño de un relleno artificial de arena en una costa aplicando la tecnología Sand Motor. Caso de estudio playas de Bocagrande, en Cartagena* [Trabajo de grado - Pregrado, Universidad de Cartagena]. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.57799/11227/7758>

Google. (2010). *Análisis planetario en la nube de Google*. Google Earth. https://www.google.com/intl/es-419_ALL/earth/education/tools/google-earth-engine/

- Guisado Pintado, E., Malvárez García, G., & Navas Concha, F. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG*. (Vol. 14). Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. <http://hdl.handle.net/11441/66640>
- Günter Dietmar, R. (2003). *Meteorología. Formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos, situaciones meteorológicas generales, pronósticos del tiempo*. Omega.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/ofr20181179>
- Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada. (2001). *El Niño*. Primer Reconocimiento . http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/002342/inocar/pages/nino/carpeta1/nin_car1_pag1.html
- Instituto Oceanográfico y Antártida de la Armada. (2023). *Estación DATA POSORJA-Mareas anuales predichas*. https://www.inocar.mil.ec/mareas/graphs/grafico_anual.php?id_est=381
- Mendez, K. M., Pritchard, L., Reinke, S. N., & Broadhurst, D. I. (2019). Toward collaborative open data science in metabolomics using Jupyter Notebooks and cloud computing. *Metabolomics*, 15(10). <https://doi.org/10.1007/s11306-019-1588-0>
- NASA. (2023). *Landsat Science* . Satellites. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>
- Nassar, K., Mahmood, W., Fath, E. S. H., Masria, A., Nadaoka, K., & Negm, A. M. (2019). Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinai coast, Egypt. *Marine Georesources and Geotechnology*, 37(1), 81–95. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1448912>

- Ovalle Collazos, J. (2012). *Aplicación de obras de defensa blanda para la protección de la costa Catalana* [Tesis de máster]. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2020). Google Earth Engine - GEE: A powerful tool linking the potential of massive data and the efficiency of cloud processing. *Investigaciones Geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- Portilla Diaz, A., & Coello Garnica, D. (2022). *Estudio del proceso erosivo en la zona comprendida entre La Chocolatera y La Lobería, Salinas* [Trabajo de grado-pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56147>
- Pucha-Cofrep, F., Fries, A., Cánovas-García, F., Oñate-Valdivieso, F., González-Jaramillo, V., & Pucha-Cofrep, D. (2017). *Fundamentos de SIG: Aplicaciones con ArcGIS*. Ediloja Cia. Ltda. www.acolita.com
- Rivera-Arriaga, E., Azuz-Adeath, I., Cervantes Rosas, O. D., Espinoza-Tenorio, A., Casarín Silva, R., Ortega-Rubio, A., Botello, A. V., & Vega-Serratos, B. E. (2020). *Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre Una Guía para Tomadores de Decisiones*. Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (epomex) Universidad Autónoma de Campeche. <https://doi.org/doi.10.26359/epomex.0120>
- Rolon-Mérette, D., Ross, M., Rolon-Mérette, T., & Church, K. (2020). Introduction to Anaconda and Python: Installation and setup. *The Quantitative Methods for Psychology*, 16(5), S3–S11. <https://doi.org/10.20982/tqmp.16.5.s003>
- Sánchez-Arcilla Conejo, A., & Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería del agua*, 1(2). <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2639>
- Sánchez Cuadros, E. (1978). *Transporte Litoral en General Villamil (Playas)* [Trabajo de grado-Pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56965>

- Sciarrone, R., Melendez, R., & Loschacoff, S. (2012). *Rompeolas aislados como estructuras de protección costera, recuperación de playas*.
- Sierra-Howard, G. (2015). *Estrategias de control y prevención de la erosión en la Playa de South West en la Isla de Providencia* [Trabajo de grado - Pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/2374>
- Silveira, G., & Valla, G. (2023). *Protección contra la erosión costera en Costa Azul, Rocha*. Universidad de la República Uruguay. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/37068>
- The European Space Agency. (2023). *Sentinel-2B*. <https://esoc.esa.int/content/sentinel-2b>
- Thinh, N. A., & Hens, L. (2017). A Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applied on mangrove shoreline changes along the Giao Thuy coastal area (Nam Dinh, Vietnam) during 2005-2014. *VIETNAM JOURNAL OF EARTH SCIENCES*, 39(1). <https://doi.org/10.15625/0866-7187/39/1/9231>
- Tristá Barrera, E., Juanes Martí, J., Caballero Camejo, V., & Izquierdo Alvarez, M. (2012). Causas y alternativas para el control de los procesos de erosión en las playas. Experiencias de las aplicaciones en la Región del Caribe. En *La gestión integrada de playas y dunas: experiencia en Latinoamérica y Europa* (pp. 241–255). Societat d'Història Natural de les Balears.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2023). *Soluciones basadas en la naturaleza*. <https://www.iucn.org/es/nuestro-trabajo/soluciones-basadas-en-la-naturaleza>
- US Army Corps of Engineers. (1984). *SHORE PROTECTION MANUAL DEPARTMENT OF THE ARMY Waterways Experiment Station, Corps of Engineers* (Vol. 1). US Army Corps of Engineers. <https://luk.staff.ugm.ac.id/USACE/USACE-ShoreProtectionManual1.pdf>

- Valdez Zertuche, J. I., Badii, M. H., Guillen, A., & Acuña Zepeda, M. S. (2015). Causas e Impactos Socio-Económico y Ambientales de la Erosión. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(1), 76–87.
- Vargas Romero, N. (2022). *Evaluación del proceso erosivo en Subida Alta, Puná y sensibilización de la amenaza ante la comunidad* [Trabajo de grado-Pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53156>
- Vera, L. (2000). Análisis de los procesos costeros en la Libertad. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 10(1).
- Vera, L. (2007). Comparación de la tasa anual de transporte de sedimentos de playa en la Isla Jambelí, utilizando formulación sugerida por varios autores. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 14(1), 21–24. <http://hdl.handle.net/1834/2502>
- Vera, L., Lucero, M., & Mindiola, M. (2009). Caracterización oceanográfica de la costa central ecuatoriana entre la Punta del Morro y Jaramijó, Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 14(1), 7–17. <http://hdl.handle.net/1834/3347>
- Woods Hole Coastal and Marine Science Center. (2022, diciembre 6). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*. <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas>

Anexos

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

```
link='http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/Model_output/WAVEWA
TCH_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*')
title("Boyas virtuales del WAVE WATCH III")

% 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==-3);

% 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);
ixtheta=find(w_theta>360 | w_theta<120);
w_theta(ixtheta)=NaN;
% [qc] theta --> [0,360]
%cualquier valor fuera de este rango sera [NaN]

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

% decimar, solo tomar un dato por dia
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);
ind=find(vv>15 | vv<-20);
vv(ind)=NaN;

ww=double(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','lablegend','Velocidad de Viento [m/s'],'TitleString',{'Rosa de viento';'Posición de la boya [278.75,-3]';'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','lablegend','Altura significativa de ola [m'],'TitleString',{'Rosa de oleaje';'Posición de la boya [278.75,-3]';'Período: 1997-2019'}};
[figure_handle,count,speeds,directions,Table] = WindRose(w_theta,w_hsig,Options);

%Descargar data

```

```
% data_oleaje_ = [tim,datevec(tim),w_hsig,w_per,w_theta,ww,wmdir,uu,vv];  
% csvwrite('data_oleaje_A27875_-3.csv',data_oleaje_);  
data_oleaje_ = [tim,datevec(tim),w_hsig,w_per
```

Anexo 2: Código de 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 = [[[-80.405958333333, -2.6317055555556],
            [-80.389477777778, -2.6308333333333],
            [-80.390094444444, -2.6443583333333],
            [-80.404605555556, -2.6445694444444],
            [-80.405958333333, -2.6317055555556]]]

# 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 = ['2016-12-21', '2016-12-22']

# satellite missions ['L7','L8','L9','S2']
sat_list = ['S2']

# choose Landsat collection 'C01' or 'C02'
collection = 'C02'

# name of the site
sitename = '2016-12-21'

# 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,    # ditance 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,
```

```
}
```

```
SDS_preprocess.save_jpg(metadata, settings)
```

```
Batch shoreline detection
```

```
%matplotlib qt
```

```
output = SDS_shoreline.extract_shorelines(metadata, settings)
```

```
from pyproj import CRS
```

```
geomtype = 'points' # 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 = CRS(settings['output_epsg']) # set layer projection
```

```
# save GEOJSON layer to file

gdf.to_file(os.path.join(inputs['filepath'],
                           inputs['sitename'],
                           '%s_output_%s.shapefile'%(sitename,geomtype)),
            driver='ESRI Shapefile', encoding='utf-8')
```

Anexo 3: Cálculo de altura de marea

FECHA HORA	Y	HORA	ALTURA		
2004-04-08- 15:22:01		6:15 AM	2.49	Duración	5:55
		12:10 PM	0.32	Diferencia	1:48
		10:22 AM	0.778961	Amplitud	2.17
				Corrección	0.458961
2005-02-06- 15:22:01		7:50 AM	0.44	Duración	6:41
		2:31 PM	2.18	Diferencia	2:32
		10:22 AM	0.987325	Amplitud	-1.74
				Corrección	0.547325
2006-12-26- 15:23:01		8:17 AM	2.14	Duración	6:03
		2:20 PM	0.4	Diferencia	2:06
		10:23 AM	1.672	Amplitud	1.74
				Corrección	0.468
2007-2-28- 15:23:01		8:07 AM	0.56	Duración	6:37
		2:44 PM	2.12	Diferencia	2:16
		10:23 AM	0.969761	Amplitud	-1.56
				Corrección	0.409761
2008-11-29- 15:22:01		4:57 AM	2.09	Duración	6:11
		11:08 AM	0.28	Diferencia	0:46
		10:22 AM	0.347793	Amplitud	1.81
				Corrección	0.067793
2009-7-11- 15:23:01		6:49 AM	2.29	Duración	6:02
		12:51 PM	0.6	Diferencia	2:28
		10:23 AM	1.206296	Amplitud	1.69

			Corrección	0.606296
2011-4-28- 15:26:01	7:00 AM	0.73	Duración	6:32
	1:32 PM	2.09	Diferencia	3:06
	10:26 AM	1.464439	Amplitud	-1.36
			Corrección	0.625561
2012-3-29- 15:27:01	8:38 AM	1.98	Duración	5:55
	2:33 PM	0.79	Diferencia	1:49
	10:27 AM	1.723998	Amplitud	1.19
			Corrección	0.256002
2014-11-14- 15:31	9:19 AM	1.8	Duración	6:06
	3:25 PM	0.7	Diferencia	1:12
	10:31 AM	1.698266	Amplitud	1.1
			Corrección	0.101734
2015-2-10- 15:33	8:09 AM	2.02	Duración	5:51
	2:00 PM	0.59	Diferencia	2:24
	10:33 AM	1.503925	Amplitud	1.43
			Corrección	0.516075
2016-12-21- 15:52	10:11 AM	1.93	Duración	5:52
	4:03 PM	0.7	Diferencia	0:41
	10:52 AM	1.889283	Amplitud	1.23
			Corrección	0.040717
2017-12-11- 15:53	4:47 AM	0.64	Duración	6:14
	11:01 AM	1.95	Diferencia	0:08
	10:53 AM	1.948522	Amplitud	-1.31
			Corrección	0.001478

2018-7-9- 15:52	6:25 AM	0.7	Duración	6:14
	12:39 PM	2.2	Diferencia	1:47
	10:52 AM	1.916913	Amplitud	-1.5
			Corrección	0.283087
2019-9-7- 15:53	10:43 AM	1.96	Duración	6:19
	5:02 PM	0.63	Diferencia	0:10
	10:53 AM	1.957717	Amplitud	1.33
			Corrección	0.002283
2020-6-13- 15:53	10:15 AM	2.1	Duración	6:20
	4:35 PM	0.78	Diferencia	0:38
	10:53 AM	2.067697	Amplitud	1.32
			Corrección	0.032303
2021-5-4- 15:53	10:46 AM	2.13	Duración	6:17
	5:03 PM	0.81	Diferencia	0:07
	10:53 AM	2.128877	Amplitud	1.32
			Corrección	0.001123
2022-5-9- 15:53	10:38 AM	1.93	Duración	6:18
	4:56 PM	0.91	Diferencia	0:15
	10:53 AM	1.926042	Amplitud	1.02
				0.003958
2023-5-29- 15:53	5:17 AM	0.81	Duración	6:32
	11:49 AM	2.07	Diferencia	0:56
	10:53 AM	2.00761	Amplitud	-1.26
			Corrección	0.06239

Anexos 4: Salida de campo



Toma de datos de observaciones de altura de ola rompiente.



Visualización del frente de tren de olas en la estación 3.



Toma de datos de la corriente litoral, personal de la carrera hace uso del chaleco salvavidas.

Playa:		Playas		Fecha:		1/7/2023		Observador:							
Estación:		1		Fase lunar:		Sicigia		Proyecto:							
		Horas	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30
1	CORRIENTE LITORAL	Espacio (m)	20	11	10	10	4	12	10	12.5	12	16	25	8	5
2		Tiempo (s)	65	42	50	40	25	39	45	30	32	40	76	27	30
3		Dirección*	I	I	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
4		Velocidad (n)	0.31	0.26	0.20	0.25	0.16	0.31	0.22	0.42	0.38	0.40	0.33	0.30	0.17
5		Corriente de resaca	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
6		Ancho de zona de surf (m)	40	45	55	35	30	35	35	30	45	48	50	45	50
7		Distancia L.P.-flotador (m)	32	35	45	28	20	30	30	30	40	45	45	40	45
8		Distancia L.P.-rompiente	40												
9		Distancia IP- LA	44	40	38	35	35	32	30	26	25	30	30	35	38
10	VIENTO	Velocidad (n)	3	2	2.2	1.8	1.9	1.6	2.1	3.3	1.4	2.8	1.7	1.3	2.4
11		Dirección (°)	290	290	230	300	240	270	270	310	300	260	240	260	300
12	OLAS	Línea de playa (°)	275												
13		Ortogonal (°)	180	180	190	190	180	180	180	190	190	200	210	180	190
14		Tipo**	P	SP	S	S	S	P	P	P	SP	SP	SP	SP	SP
15		Periodo (seg)	132	163	135	147	168	157	142	155	150	168	157	135	168
16		Periodo/10	13.2	16.3	13.5	14.7	16.8	15.7	14.2	15.5	15	16.8	15.7	13.5	16.8
	N° de observación	Alturas (cm)													
	1	30	30	50	30	80	30	40	80	50	30	100	50	40	
	2	30	40	60	50	80	60	60	60	40	30	120	70	50	
	3	40	50	70	30	60	50	30	50	30	30	90	50	70	
	4	30	60	70	40	60	70	30	50	40	40	90	70	40	
	5	50	80	40	60	70	60	50	80	50	20	70	30	70	
	6	60	40	50	50	50	30	70	30	30	30	80	30	30	
	7	50	30	50	60	30	30	70	60	30	40	60	60	40	
	8	40	60	30	70	30	60	30	90	50	30	90	40	40	
	9	20	50	50	50	60	50	40	80	30	20	60	40	50	
	10	70	20	50	40	70	80	60	60	40	30	50	50	30	
16	Promedio (H _w , m)	42	46	52	48	59	52	48	64	39	30	81	49	46	

Hoja de caracterización litoral de la estación 1

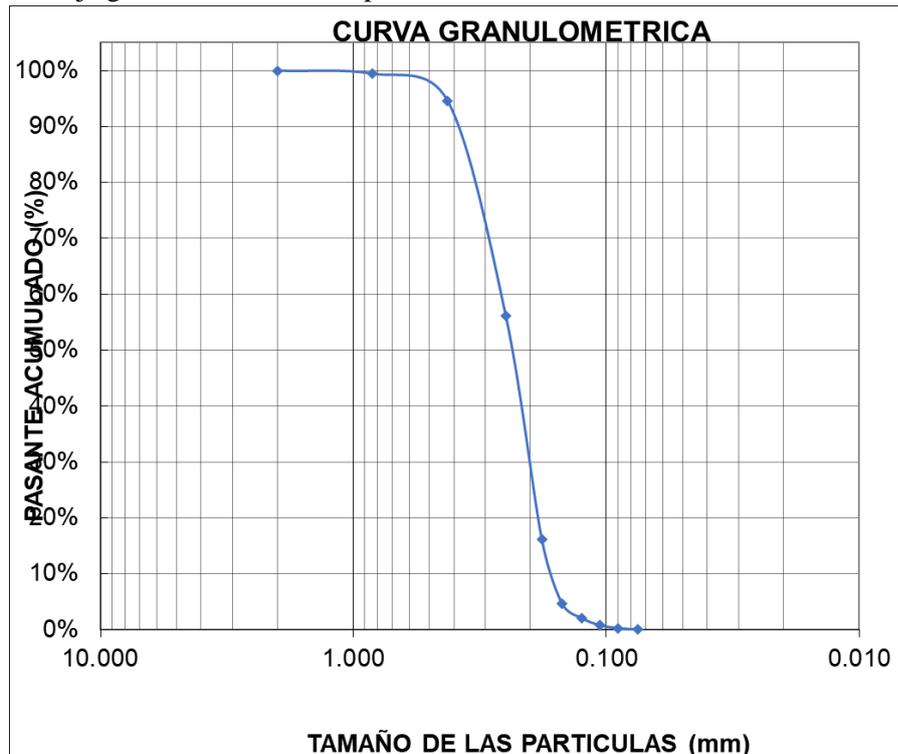
Anexo 5: Análisis granulométrico de las muestras de arena.

LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA			
ANÁLISIS GRANULOMETRICO			
PROYECTO:	PROYECTO INTEGRADOR	FECHA MUESTREO:	1 de julio del 2023
ESTACIÓN / MUESTRA:	Estación 1 ALTA	FECHA ANÁLISIS:	6 de julio del 2023
SITIO:	Playas-sector Humboldt	AUTOR:	Marcela Cordova Fabian

			Rango de error aceptable (1%)
PESO INICIAL:	533.850	539.189	528.512

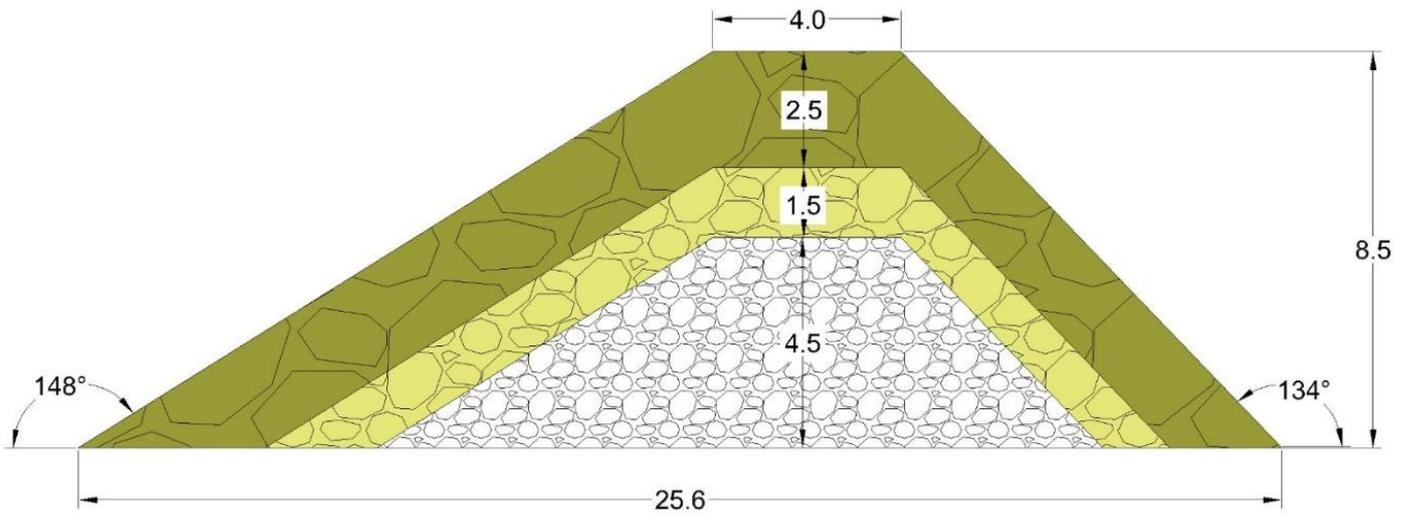
No. TAMIZ	ASTM (U.S. Standard)	DIÁMETRO LUZ (mm)	PESO PARCIAL (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
10	Guijarros finos	2.000	0.23	0.04%	0.04%	99.96%
20	Arena Gruesa	0.841	2.90	0.54%	0.59%	99.41%
40	Arena Media	0.425	25.77	4.83%	5.42%	94.58%
60		0.250	205.18	38.45%	43.87%	56.13%
80	Arenas finas	0.180	213.62	40.03%	83.90%	16.10%
100		0.150	60.80	11.39%	95.30%	4.70%
120		0.125	14.35	2.69%	97.99%	2.01%
140		0.106	6.60	1.24%	99.22%	0.78%
170	Arenas muy finas	0.090	2.85	0.53%	99.76%	0.24%
200		0.075	1.20	0.22%	99.98%	0.02%
FONDO	Limo	0,063	0.10	0.02%	100.00%	0.00%
TOTAL			533.60	100%		

Hoja granulométrica correspondiente a la muestra alta de la estación 1.



Curva granulométrica de la muestra alta de la estación 1.

Anexo 6: Diseño del rompeolas



	Núcleo	Capa Intermedia	Capa Externa
Área [m ²]	43.7	26	56
Volumen [m ³] Rompeolas 100 m	4370	2600	5600
Volumen [m ³] rompeolas 130 m	5681	3380	7280