

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Análisis de la evolución morfológica de un sistema de bancos de arena localizados junto a las boyas 28 y 33 del canal marítimo en el Golfo de Guayaquil durante la última década, empleando imágenes satelitales y datos levantados en sitio.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Oceanografía

Presentado por:

Melanie Samantha Agila Pinto

Andrea Caroline Zambrano Galeano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Melanie Samantha Agila Pinto y Andrea Caroline Zambrano Galeano y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Melanie Samantha Agila Pinto

Andrea Caroline Zambrano Galeano

Evaluadores

Jorge Washington Espinoza Amaguaña

PROFESOR MATERIA INTEGRADORA

Indira Yadira Nolivos Álvarez

TUTORA

RESUMEN

El canal de acceso marítimo a los puertos de Guayaquil representa una alta importancia económica y comercial no solo a nivel local sino nacional. Jan de Nul, al ser el encargado de su profundización y mantenimiento se encuentra en la búsqueda constante de conocer acerca del sistema de bancos localizados en la vecindad del canal. El trabajo presente se centra en estudiar su evolución morfológica a través del análisis de imágenes satelitales en conjunto con información batimétrica y composición sedimentológica, para desarrollar una metodología de monitoreo remoto que sea eficaz y de bajo costo.

Se recopiló levantamientos hidrográficos de los años 2004, 2009 y 2021 proporcionados por el INOCAR y procesados con SIG, los estados de marea del 2018 al 2022 de la estación C2 de Jan de Nul, la toma de 59 muestras de sedimentos con el muestreador de Pistón y la descarga de imágenes satelitales con Sentinel-2 en época seca y lluviosa. Posteriormente se calculó 5 índices espectrales en GEE para el año 2021 que fueron validados con las herramientas QGIS, ArcGis y Excel.

Los hallazgos evidencian zonas estables del banco compuestas mayormente por arena y zonas inestables por material fino y arcilloso, se registró acreción entre los periodos 2004 al 2021 y fue el índice MNDWI el que tuvo una correlación alta con la data batimétrica. Más allá de los resultados, el implementar una metodología con sensores remotos ha permitido seguir los cambios morfológicos de un sistema de bancos de arena de manera factible y accesible.

Palabras Clave: Acreción, correlación, erosión, bancos, satélites

ABSTRACT

The maritime channel of access to the ports of Guayaquil represents a high economic and commercial importance not only locally but also nationally. Jan de Nul, overseeing its deepening and maintenance, is constantly seeking to learn about the sandbanks located near the canal. The present work focuses on studying its morphological evolution through the analysis of satellite images together with bathymetric information and sedimentological composition, to develop a remote monitoring methodology that is effective and low cost.

Hydrographic surveys from the years 2004, 2009 and 2021 provided by INOCAR and processed with GIS were collected, the tidal states from 2018 to 2022 of the Jan de Nul C2 station, the taking of 59 sediment samples with the Piston Sampler and the download of satellite images with Sentinel-2 in the dry and rainy seasons. Subsequently, five spectral indices were calculated in GEE for the year 2021 that were validated with the QGIS, ArcGIS and Excel tools.

The findings show stable zones of the bank composed mostly of sand and unstable zones of fine and clayey material, accretion was identified between the periods 2004 to 2021 and it was the MNDWI index that had a high correlation with the bathymetric data. Implementing a remote sensing methodology has made it possible to follow the morphological changes of a sandbar system in a feasible and accessible way.

Keywords: *Correlation, erosion, sandbanks, satellites, sedimentation.*

INDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| Resumen..... | I |
| Abstract..... | II |
| Indice General..... | III |
| Abreviaturas..... | VI |
| Simbología..... | VIII |
| Indice De Figuras..... | IX |
| Índice De Tablas..... | X |
| Capítulo 1..... | 1 |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1.1. Descripción Del Problema..... | 1 |
| 1.1.2. Justificación Del Proyecto..... | 1 |
| 1.1.3. Objetivos..... | 2 |
| 1.1.4. Objetivo General..... | 2 |
| 1.1.5. Objetivos Específicos..... | 2 |
| 1.1.6. Marco Teórico..... | 2 |
| 1.1.7. Formación De Estuarios..... | 3 |
| 1.1.8. Clasificación De Estuarios..... | 5 |
| 1.1.8.1. Clasificación Geomorfológica..... | 5 |
| 1.1.8.2. Clasificación Física..... | 8 |
| 1.1.9. Descripción Del Área De Estudio..... | 9 |
| 1.1.9.1. Influencia De Mareas En El Área..... | 11 |
| 1.1.9.2. Dinámica Estuarina..... | 12 |
| 1.1.9.3. Oleaje..... | 13 |
| 1.1.9.4. Hidrografía..... | 13 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| 1.1.9.5. | Geomorfología | 13 |
| 1.1.9.6. | Clima..... | 14 |
| 1.1.9.7. | Transporte De Sedimentos | 14 |
| 1.1.9.8. | Mezcla En El Estuario, Prisma De Marea Y Tasa De Renovación..... | 16 |
| Capítulo 2..... | | 17 |
| 2. | Metodología..... | 17 |
| 2.1. | Levantamiento De Información | 17 |
| 2.1.1. | Información Batimétrica | 17 |
| 2.1.2. | Parámetros Oceanográficos | 18 |
| 2.1.3. | Muestreo De Sedimentos | 20 |
| 2.1.4. | Teledetección | 21 |
| 2.1.5. | Tipo De Sensores..... | 23 |
| 2.1.6. | Bandas Del Espectro Electromagnético | 23 |
| 2.1.6.1. | Selección De Imágenes Satelitales..... | 25 |
| 2.2. | Procesamiento De Información..... | 26 |
| 2.2.1. | Google Earth Engine (Gee) | 26 |
| 2.2.2. | Aplicación De Índices Espectrales..... | 27 |
| 2.2.3. | Prototipo De Diseño..... | 30 |
| 2.2.4. | Procesamiento En Sistemas De Información Geográfica..... | 31 |
| 2.2.4.1. | Obtención De Contornos, Superficies Y Volumen..... | 31 |
| 2.2.4.2. | Caracterización Sedimentológica..... | 32 |
| 2.3. | Aplicación De Metodología..... | 32 |
| 2.3.1. | Validación Y Selección Del Índice Espectral | 32 |
| 2.3.2. | Análisis Estadístico..... | 33 |
| 2.3.3. | Análisis Del Periodo 2018 Al 2022 | 35 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 3..... | 36 |
| 3. Resultados Y Análisis | 36 |
| 3.1. Contornos, Superficies Y Volumen | 36 |
| 3.2. Determinación De Tasa De Acreción/Erosión..... | 39 |
| 3.3. Distribución Superficial Actual De Los Bancos De Sedimentos..... | 41 |
| 3.4. Caracterización Sedimentológica..... | 41 |
| 3.5. Tendencia De Acercamiento Al Canal De Navegación..... | 43 |
| 3.6. Cálculo De Índices Espectrales Para Validación | 45 |
| 3.7. Resultados Estadísticos..... | 46 |
| 3.8. Aplicación De Los Índices Para El Periodo 2018 Al 2022..... | 47 |
| Capítulo 4..... | 50 |
| 4. Conclusiones Y Recomendaciones | 50 |
| 4.1. Conclusiones | 50 |
| 4.2. Recomendaciones | 51 |
| Bibliografía..... | 52 |
| Apéndices | 55 |
| Apéndice A | 55 |
| Apéndice B | 59 |
| Apéndice C | 63 |

ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| ALOS | Satélite Avanzado de Observación Terrestre |
| AVHRR | Advanced Very High Resolution Radiometer |
| CM | Canal Marítimo |
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| GEE | Google Earth Engine |
| IDW | Inverse Distance Weighted |
| INOCAR | Instituto Oceanográfico de la Armada |
| JDN | Jan de Nul |
| LSWI | Land Surface Water Index |
| MNDWI | Modified Difference Water Index |
| MSL | Mean Sea Level |
| MLWS | Mean Low Water Spring |
| MODIS | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NOAA | National Oceanographic and Atmospheric Administration |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| NDWI | Normalized Difference Water Index |
| NIR | Infrarrojo cercano |
| NRS | Nivel de Reducción de Sondas |
| SIG | Sistema de Información Geográfica |
| SWIR | Infrarrojo de onda corta |

| | |
|------|--|
| TVU | Incertidumbre Total Vertical |
| USGS | Servicio Geológico de los Estados Unidos |
| WRI | Water Ratio Index |

SIMBOLOGÍA

cm Centímetro

dd Día

m Metro

mm Milímetro

η m Nanómetro

μ m Micrómetro

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.1 Elementos de un estuario (Perillo, 1989)</i> | 5 |
| <i>Figura 1.2 Clasificación morfogenética de los estuarios (Perillo, 1995)</i> | 6 |
| <i>Figura 1.3 Clasificación del estuario basado en la circulación, cuña salina (Pritchard, 1960)</i> | 8 |
| <i>Figura 1.4 Clasificación del estuario basado en la circulación, mezcla parcial (Pritchard, 1960)</i> | 9 |
| <i>Figura 1.5 Clasificación del estuario basado en la circulación, homogéneo (Pritchard, 1960)</i> | 9 |
| <i>Figura 1.6 Golfo de Guayaquil</i> | 10 |
| <i>Figura 1.7 Área objeto de estudio</i> | 11 |
| <i>Figura 2.1. Ubicación del mareógrafo C2 utilizado para la obtención de las mareas...</i> | 19 |
| <i>Figura 2.2 Marea registrada para época húmeda y época seca en la Estación C2 perteneciente a Jan de Nul</i> | 20 |
| <i>Figura 2.3 Sedimentos tomados con el Piston Sampler</i> | 21 |
| <i>Figura 2.4. Componentes de un sistema de percepción remota. (Coutiño, 2021)</i> | 22 |
| <i>Figura 2.5. Espectro electromagnético</i> | 24 |
| <i>Figura 2.6. Cortes Transversales, QGIS</i> | 33 |
| <i>Figura 2.7. Secciones transversales finales, QGIS</i> | 35 |
| <i>Figura 3.1. Modelo digital del Terreno. año 2004</i> | 36 |
| <i>Figura 3.2. Modelo digital del Terreno, año 2009</i> | 38 |
| <i>Figura 3.3. Modelo digital del Terreno, año 2021</i> | 39 |
| <i>Figura 3.4. Distribución por superficie actual.</i> | 41 |
| <i>Figura 3.5. Mapa geomorfológico de distribución de sedimentos en el sistema.</i> | 43 |
| <i>Figura 3.6. Transectas trazados a partir del veril -10m.</i> | 44 |
| <i>Figura 3.7. Correlación índice MNDWI vs. Batimetría 2021</i> | 47 |
| <i>Figura 3.8. Vista general del índice MNDWI del periodo seleccionado</i> | 48 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1.1 Factores que controlan la formación de los estuarios (Perillo, 1995)</i> | 3 |
| <i>Tabla 1.2 Clasificación geomorfológica. (Perillo, 1995)</i> | 7 |
| <i>Tabla 2.1. Información relevante de los levantamientos hidrográficos</i> | 17 |
| <i>Tabla 2.2 Marea registrada para época húmeda y época seca en la Estación C2 perteneciente a Jan de Nul</i> | 20 |
| <i>Tabla 2.3. Composición de imágenes satelitales seleccionadas</i> | 25 |
| <i>Tabla 2.4. Bandas espectrales utilizadas para el cálculo de los índices</i> | 26 |
| <i>Tabla 2.5. Índices espectrales utilizados en el estudio</i> | 27 |
| <i>Tabla 2.6. Herramientas utilizadas en GEE</i> | 31 |
| <i>Tabla 2.7. Asociación de variables respecto al valor del índice.</i> | 34 |
| <i>Tabla 3.1. Área y volumen obtenido para las cotas 0m y -2m, para la batimetría del 2004.</i> | 37 |
| <i>Tabla 3.2. Área y volumen obtenido para las cotas 0 m y -2 m, para la batimetría del 2009.</i> | 38 |
| <i>Tabla 3.3. Área y volumen obtenido para las cotas 0m y -2m, para la batimetría del 2021.</i> | 39 |
| <i>Tabla 3.4. Acreción/Erosión neta por periodo.</i> | 40 |
| <i>Tabla 3.5. Proporción general de tipo de sedimentos en el Sistema de bancos.</i> | 42 |
| <i>Tabla 3.6. Índices espectrales para la validación</i> | 45 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Descripción del Problema

El canal de acceso marítima representa una alta importancia a nivel económico y comercial para la ciudad de Guayaquil, debido a la navegabilidad de este garantiza el ingreso de buques a los diferentes puertos más importantes del Ecuador.

Jan de Nul es el encargado de la profundización y mantenimiento de la profundidad del Canal de Acceso Marítimo y como tal está encargado interesado en conocer la evolución morfológica del sistema de bancos

El tránsito seguro de embarcaciones hacia estos puertos depende exclusivamente de la navegabilidad del canal de acceso, el cual se garantiza con el dragado. Es aquí cuando surge nuestro cliente Jan de Nul Ecuador, que maneja la concesión del canal de acceso marítimo y como tal, está interesado en conocer la evolución morfológica del sistema de bancos en la vecindad del canal. Sin embargo, no existe una metodología que permita darle seguimiento a la evolución de este sistema debido a que no se llevan a cabo levantamientos hidrográficos periódicos, ni el seguimiento de los cambios registrados en periodos cortos de tiempo.

1.1.2. Justificación del proyecto

El presente trabajo tiene la finalidad de emplear una metodología en la que se estudie la evolución de un sistema de bancos de arena y permita realizar un seguimiento a través de herramientas de fácil accesibilidad y bajo costo, para lograr identificar la tendencia evolutiva de un sistema de bancos de sedimentos ubicados junto a las boyas 28 y 33 del Canal de Acceso Marítimo a las terminales portuarias de Guayaquil.

Esta necesidad nace ante la dificultad de acceso a el área de estudio, la falta de seguimiento constante a la evolución morfológica del sistema de bancos y del levantamiento y monitoreo de estos, lo que no ha permitido dar a conocer el comportamiento que han tenido a lo largo del tiempo e imposibilitando que se desarrollen proyectos a futuro que beneficien a la zona y poblaciones cercanas.

1.1.3. Objetivos

1.1.4. Objetivo General

Estudiar la evolución morfológica de un sistema de bancos de sedimentos a través del análisis de imágenes satelitales, en conjunto con información batimétrica y de composición sedimentológica para su monitoreo remoto.

1.1.5. Objetivos Específicos

- Recopilar información generando un estado del arte que contemple datos meteorológicos y oceanográficos a partir de estudios previos llevados a cabo en el área de estudio.
- Realizar un levantamiento de información de campo a partir de un reconocimiento de la zona y la toma de muestras para identificar los sedimentos del sistema de bancos.
- Establecer una metodología mediante el procesamiento de imágenes satelitales y batimetría para el seguimiento del área de estudio de forma remota.

1.1.6. Marco teórico

Durante 50 años, los estuarios han sido definidos y clasificados de diversas maneras, Perillo (1995) analizó más de 40 definiciones en distintas fuentes y propuso la siguiente definición que incluye tanto los aspectos físicos, químicos y geomorfológicos de este cuerpo de agua:

“Un estuario es un cuerpo semicerrado de agua costero que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de mareas, dentro del cual el agua de mar ingresa por una o más conexiones con el mar abierto o cualquier otro cuerpo costero de agua salada, es significativamente diluida por agua dulce derivada del drenaje terrestre, y puede sustentar especies biológicas eurihalinas por una parte o la totalidad de su ciclo de vida”

De acuerdo con la Enciclopedia de Estuarios (2015), los bajos/bancos se definen como formas en el lecho que consisten en sedimentos cohesivos o no cohesivos en estuarios y en áreas de la plataforma continental que son expuestos durante la marea baja, generalmente se forman por el transporte de sedimentos por corrientes de marea y olas, así como por cambios de prisma de marea debido a la sedimentación estuarina.

1.1.7. Formación de estuarios

Los estuarios pueden formarse por la combinación de factores como: el clima, el tipo de costas, el tipo de rocas, la amplitud de marea, la estabilidad de la costa, el caudal del río, las fuerzas marinas y las fuerzas atmosféricas, no necesariamente es la lista completa pero la adecuada combinación de estos factores producirá un estuario específico con su propio patrón de circulación (ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Factores que controlan la formación de los estuarios (Perillo, 1995)

| Factores | Subfactores |
|---|--|
| Clima | <ul style="list-style-type: none">➤ Polar y subpolar➤ Templado➤ Subtropical y tropical |
| Tipo de costas | <ul style="list-style-type: none">➤ De traslación➤ Colisión➤ Mares marginales |
| Tipo de rocas | <ul style="list-style-type: none">➤ Roca dura➤ Roca blanca (sedimentitas) |
| Amplitud de marea | <ul style="list-style-type: none">➤ Macro mareal➤ Meso mareal➤ Micro mareal |
| Estabilidad de la costa | <ul style="list-style-type: none">➤ Sumersión➤ Emersión➤ Estable |
| Caudal líquido y sólido del río | <ul style="list-style-type: none">➤ Alto➤ Medio➤ Bajo |
| Fuerzas difusivas marinas (olas, mareas, corrientes) | <ul style="list-style-type: none">➤ Fuertes➤ Moderadas➤ Débiles |
| Fuerzas atmosféricas | <ul style="list-style-type: none">➤ Fuertes➤ Moderadas➤ Débiles |

Cuando se refiere al grado de dilución salina y la dinámica de mareas, un estuario se puede fragmentar en tres tramos: el exterior, medio y el interior (ver Figura 1.1). El tramo exterior es la zona de contacto inmediato con el mar que provee agua salada, en esta sección las

salinidades son máximas en la columna de agua, muestra granulometría gruesa producto del aporte de las corrientes de marea y de la deriva litoral. Dependiendo de las condiciones hidrodinámicas, la desembocadura puede ser abierta o semicerrada por los deltas de marea y además pueden ser de flujo y refluo. Por lo general, los deltas de marea se presentan en estuarios meso mareales y macro mareales (Hayes, 1975).

El tramo medio es la zona donde se mezclan el agua dulce y salada, siendo la característica principal de un estuario, aquí el rango de salinidad varía entre 1 y 35‰, concurriendo una estratificación definida por el agua de mar, río y de la mezcla inducida por la turbulencia de la marea, en donde dependiendo del dominio de cada tipo de agua, se originan efectos significativos como la distribución de las especies biológicas y de los sedimentos suspendidos. A su vez, esta interfase entre los cuerpos de agua es donde se halla la turbidez máxima.

En el tramo interior de un estuario se registran las salinidades propias del río y las especies son diferentes a las que se localizan en el exterior, aquí el transporte de sedimentos depende de la descarga del río, pero debido a la influencia de la marea las características de las formas de fondo son diferentes a las de los ambientes con corrientes unidireccionales. A pesar de que la salinidad del mar no llegue a esta zona, la marea si ingresa y afecta a esta parte del tramo, teniendo en cuenta que la amplitud de marea por efectos de convergencia hacia menores profundidades y ancho del canal tiende a aumentar a medida que se integra al interior del estuario, manteniéndose hasta que el caudal del río remedie a la marea y decreciendo la amplitud.

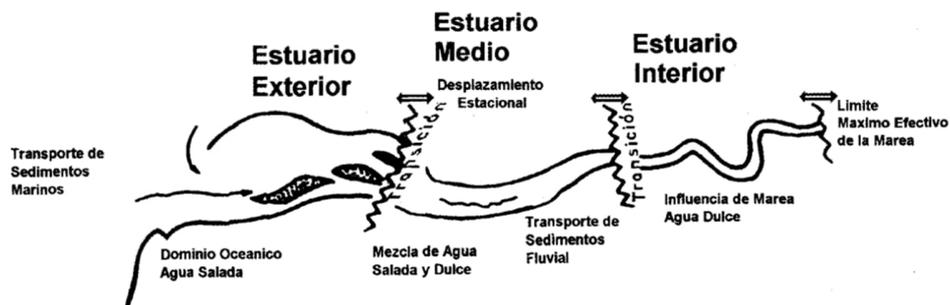


Figura 1.1 Elementos de un estuario (Perillo, 1989)

Cabe recalcar, que no todos los estuarios poseen tres tramos, sino que pueden estar compuestos únicamente de uno solo de ellos.

1.1.8. Clasificación de estuarios

Pritchard (1952,1960) fue el primero en clasificar a los con respecto a los aspectos físicos y geomorfológicos, y a su vez describió los componentes básicos de los estuarios.

1.1.8.1. Clasificación geomorfológica

Existen diversas clasificaciones estas pueden ser específicas y de igual manera un mismo estuario puede presentar diferentes categorías dependiendo de que clasificación se esté considerando. Pritchard (1952, 1960) dividió en cuatro grupos a los estuarios de acuerdo con su geomorfología: *valles fluviales inundados*, *fiordos*, *estuarios* formados por procesos tectónicos y de barrera. No obstante, Hayes (1975) planteó una clasificación fundamentada en las variaciones del rango de marea (H): micro mareales ($H < 2$ m), meso mareales ($2 < H < 4$ m) y macro mareales ($H > 4$ m). Fue en 1992 que Dalrymple et al. introduce el concepto de estuario dominados por olas y por mareas y en 1995 que Perillo introduce una clasificación basada en la morfo genética fundado en el criterio postulado por Shepard (1973) instituyendo el concepto de estuarios secundarios y primarios (Piccolo & Perillo, 1997).

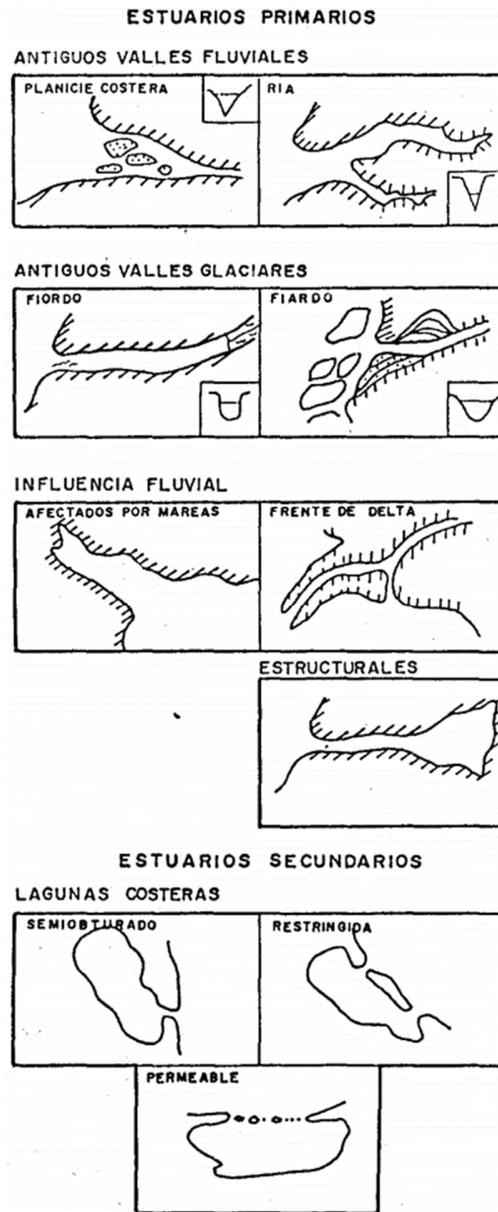
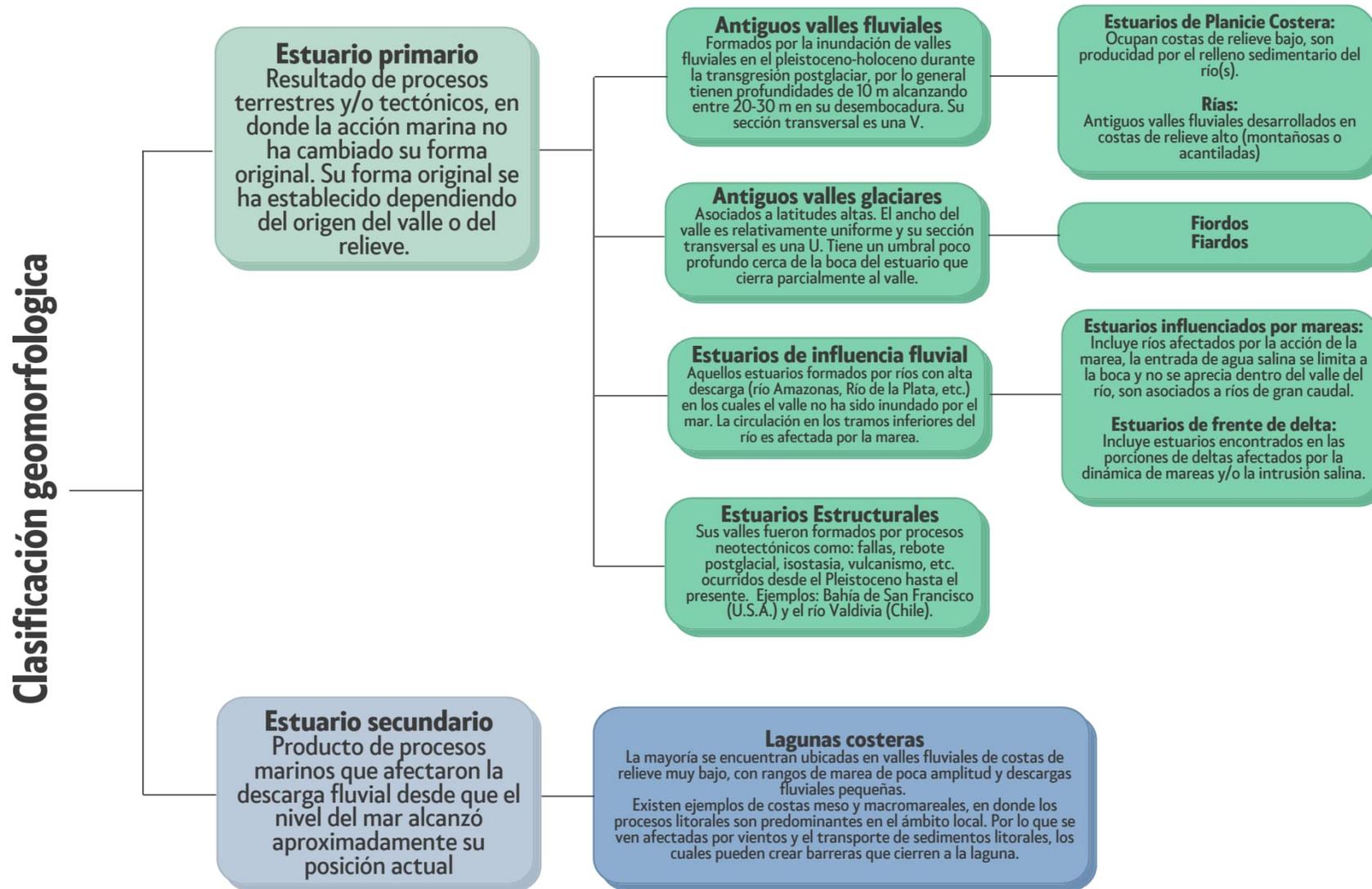


Figura 1.2 Clasificación morfo genética de los estuarios (Perillo, 1995)

Tabla 1.2 Clasificación geomorfológica. (Perillo, 1995)



1.1.8.2. Clasificación física

Se basan en su mayoría en la distribución vertical de la salinidad promediada sobre el ciclo de marea. Esta salinidad está medida de la dilución del agua dentro de un estuario, siendo una herramienta para aprender la circulación no inducida por la marea. Pritchard (1960) las clasifica según el patrón de circulación:

- **Cuña salina:** se define por poseer una descarga fluvial eminente con respecto a la amplitud de marea, las capas de agua dulce y salada se encuentran bien diferenciadas.

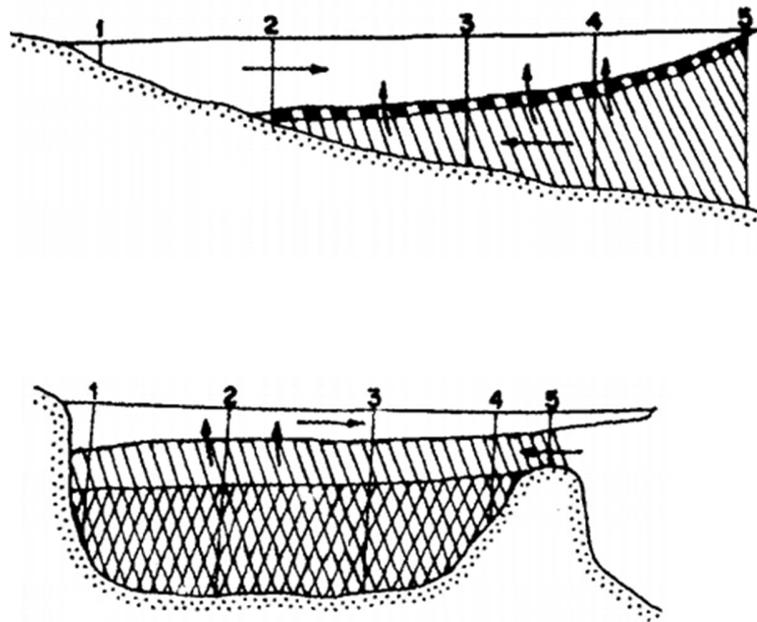


Figura 1.3 Clasificación del estuario basado en la circulación, cuña salina (Pritchard, 1960)

- **Mezcla parcial:** es donde la descarga del río no es un factor absoluto. La acción de marea forma vórtices que introducen transportes de masa significativos. Este tipo de estuario es el más habitual y de los que poseen una mayor distribución en los tipos de marea y zonas climáticas.

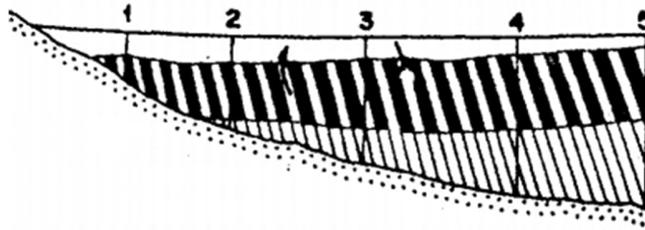


Figura 1.4 Clasificación del estuario basado en la circulación, mezcla parcial (Pritchard, 1960)

- **Verticalmente homogéneos:** este tipo de estuarios tienen corriente de marea son dinámicos en relación con la descarga fluvial, creando una mezcla a partir de la turbulencia generada, por tanto, exhibe una columna de agua agitada en donde la mezcla es homogénea a pesar de tener una gradiente longitudinal.
- **Seccionalmente homogéneos:** son estuarios angostos y profundos, las condiciones de la salinidad se transforman exclusivamente a lo largo del eje del canal y el flujo neto está encaminado hacia el mar a una tasa equivalente a la descarga fluvial del río.

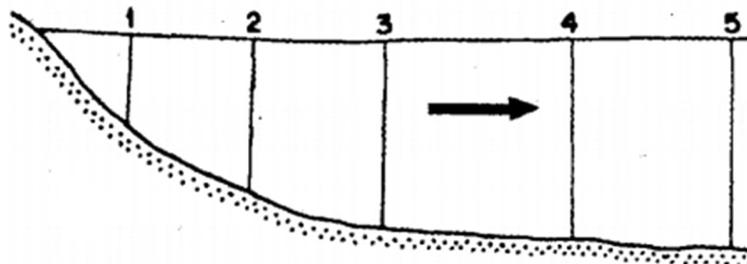


Figura 1.5 Clasificación del estuario basado en la circulación, homogéneo (Pritchard, 1960)

Las figuras precedentes son formas ideales, muestra una gradación entre un tipo y otro cuando las condiciones son modificadas. Pritchard (1960) consideraba que los factores importantes para poder clasificar al estuario son mediante la descarga del río, la intensidad de las corrientes de marea, la profundidad y el ancho del canal (Piccolo & Perillo, 1997).

1.1.9. Descripción del área de estudio

El Golfo de Guayaquil es el entrante de agua más grande del Pacífico Sudamericano, el ingreso al golfo está ubicada a los 3° de la línea ecuatorial, y se extiende a 204 km de norte

a sur a lo largo del meridiano en 81°W. Es una región litoral y oceánica fraccionada en dos sistemas estuarinos uno al occidente y otro al oriente de la Isla Puná (ver Figura 1.6).



Figura 1.6 Golfo de Guayaquil

La ubicación de interés comprende del estuario interior que se extiende cerca de 74 kilómetros en dirección noreste desde el extremado occidental de la Isla Puná, para luego estrecharse y constituir el canal del Río Guayas y el Estero Salado (Vera, 2003). El Estero Salado se expande alrededor de unos 60 kilómetros desde el Puerto Marítimo de Guayaquil hasta Posorja, el Canal del Morro presenta 3 kilómetros de ancho y 60 metros de profundidad, aproximándose a Guayaquil este se ensancha y se fracciona en una serie de canales secundarios, riachuelos, bancos e islas que se dispersan con sentido hacia el noreste llegando hasta los ramales internos de la ciudad de Guayaquil.

El Canal del Morro conecta el estuario exterior con el Estero Salado, en el cual se encuentra el Canal de Acceso hacia los esteros del norte donde se localizan los Terminales Marítimos de Guayaquil. El área de estudio (ver Figura 1.7) se ubica en el estuario interno a la altura de la Boya 28 y la Boya 33 donde inicia la Barra Interna con el canal que toma diferentes rumbos a las terminales de la ciudad (CONSULSUA, 2017).

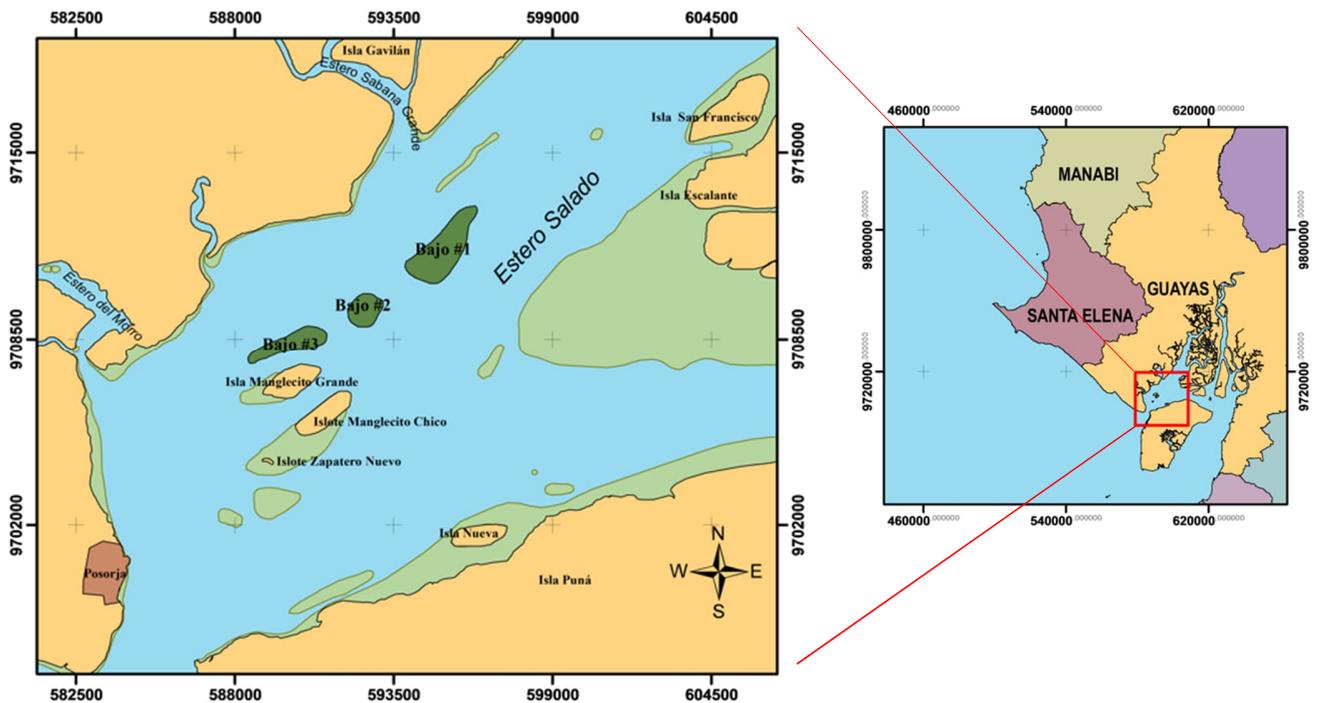


Figura 1.7 Área objeto de estudio

Cabe recalcar que alrededor del área de estudio se han mantenido constantes actividades de dragado desde el año 2008, la cual se ha realizado debido a que en zonas contiguas existe una reducción natural en la profundidad del área causado por procesos geológicos y además se registran movimientos laterales entre los bancos y canales naturales debido a la sedimentación (CONSULSUA, 2017).

1.1.9.1. Influencia de mareas en el área

En las costas ecuatorianas se muestran meso mareas ($2 \leq H \leq 4$ m) de tipo semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares en algo más de 24 horas con bajas desigualdades diurnas (Vera, 2003).

La amplitud de marea es la que rige la magnitud y la dirección de las corrientes; por ello las máximas velocidades se manifiestan en la mitad del ciclo, esto es entre la pleamar y bajamar, y viceversa. Medina F. (1990) mediante un estudio en la Isla Santa Clara, señaló que la transporte en el área está fuertemente influenciada por las corrientes de marea.

Las velocidades máximas de marea suelen suceder a la mitad de los ciclos de flujo y reflujó, en la boca y la cabecera y durante mareas de sicigia; lo inverso sucede en las mínimas que se registran durante estoas de pleamar y bajamar, es decir, los minutos antes y posteriores a la marea que llega a su altura máxima y su altura mínima persistiendo en niveles estables, estas se encuentran ubicadas en el recorrido intermedio del canal o en fases de cuadratura (Vera, 2003). Datos cuantitativos del estudio de Stevenson en junio de 1970, señalan que en el Canal del Morro concurren magnitudes de velocidades de 1.63 m/s siendo ésta la más alta y de hasta 0.5 m/s en el Canal de Jambelí.

1.1.9.2. Dinámica estuarina

Murray et al. (1970), encontró que la geometría del sistema estuarino y las diferencias de fases entre los niveles de agua, forman un complicado patrón de corrientes en todo el sistema. Estos desniveles de agua producen en ciertos momentos, sobre todo en el Canal de Cascajal, flujos convergentes o divergentes de acuerdo con la amplitud de la marea en ambos estuarios.

La oscilación del flujo, y por ende la circulación resultante en el estuario, se presenta en forma asimétrica. Esto se debe a la fricción hidráulica, la descarga de los ríos, la geometría de los canales y esteros, las variaciones de profundidad, las corrientes de densidad y a los efectos del viento. La combinación de estos movimientos con las corrientes litorales en el Golfo de Guayaquil, que convergen hacia el estuario, constituye un patrón de corrientes residuales de gran importancia con valores promedio de 5 nudos. En lo que respecta al transporte de sedimentos y de sal en todo el sistema, además también lo son para la distribución de elementos contaminantes en el mismo.

1.1.9.3. Oleaje

En el interior del canal de navegación, las alturas de las olas no son significativas, ya que alcanzan 30 a 50 centímetros; los buques que navegan por el canal generan olas cuyas alturas pueden alcanzar un metro, y al reventar en las playas o zonas de manglar, provocan acreción o erosión de arenas o lodos. (CONSULSUA, 2017).

1.1.9.4. Hidrografía

En el Estero Salado por contraste el aporte de agua procedente de las zonas altas montañosas es poco significativo, el escaso suministro de agua fresca permite una intrusión profunda del agua salina lo que da lugar a su nombre; ya que, a diferencia del Río Guayas, éste no está asociado a una descarga fluvial permanente, sino que es una entrante de mar, cuyo origen se ha atribuido al propio Río. El Estero recepta los diversos drenajes de la falda oriental y sur del sector de la cordillera de Chongón al oeste de Guayaquil, y hacia él concurren las aguas que en época de lluvias vienen desde las colinas circundantes. En el Estero descargan pequeños ríos que drenan un área de casi 1 500 km² al oeste del estuario interior, el área de drenaje del Estero Salado se ha cuantificado en aproximadamente 3 750 ha (Lahmeyer Cimentaciones, 1997). En la época lluviosa el agua dulce en el Estero aumenta. En total el Golfo de Guayaquil es una zona de descarga de tres importantes vertientes: la suroccidental de Los Andes, la suroriental de Chongón y la del Río Guayas (Vera, 2003).

1.1.9.5. Geomorfología

Estudios sísmicos efectuados en la parte exterior del Canal del Morro y en el Estuario Salado, han permitido que se defina la morfología del Canal, así como la relación sedimento-sustrato rocoso del fondo. Sin embargo, poco se conoce acerca de la evolución geológica de este sistema estuarino.

La parte exterior del estuario presenta una topografía relativamente plana, teniendo una profundidad promedio de 12 m, incrementándose a medida se acerca al Canal del Morro. Frente a la Punta del Morro, el fondo es rocoso, muy irregular y cuenta con profundidades superiores a los 20 m (Rada, 1986).

Al presente un factor externo que ha provocado cambios en la morfología de este sistema son las construcciones de camaroneras, lo que ha aumentado la carga sedimentaria, ya sea

por sedimentos arrojados directamente o por la tala de manglares que trabajan como un filtro retenedor de sedimentos suspendidos.

1.1.9.6. Clima

En base a la clasificación climática de Koppen, el Golfo de Guayaquil se caracteriza por ser una zona de clima tropical húmedo y seco de sabana. Las condiciones meteorológicas y oceanográficas en el área están conectadas entre sí, debido a la ubicación geográfica y el comportamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, el Frente Ecuatorial, el patrón de corrientes oceánicas y vientos ecuatoriales (Vera, 2003).

Vaca (2006), indica que el Ecuador existen dos periodos estacionales y un periodo transicional abarcado entre los meses de diciembre hasta abril que es la época lluviosa y es en entre los meses de febrero a marzo que se registran mayores precipitaciones; y de mayo hasta noviembre denominado época seca, en donde las precipitaciones son cercanas a cero entre los meses de junio a noviembre. La humedad media es de 48.78% y el promedio anual de las precipitaciones es de 995 mm (Mirabá, 2021).

1.1.9.7. Transporte de sedimentos

Los sedimentos en movimiento pueden clasificarse de dos maneras, con respecto a su origen: provenientes del fondo del cauce y los de una fuente externa al cauce y de acuerdo con su desplazamiento: en donde si las partículas se sostienen en el agua por efectos ascendentes de la turbulencia se las conoce como transporte suspendido y aquella que se desplazan por arrastre o cerca del fondo del cauce se lo conoce como arrastre de fondo.

Aun cuando el arrastre de fondo representa menos del 20% de la descarga total de sedimentos de una corriente natural (Reid y Frostick, 1987), este tiene importancia inmediata en la planeación para el manejo de cuerpos de agua, para aumentar el conocimiento de los impactos de la sedimentación sobre hábitats acuáticos, cauces naturales y para identificar cambios climáticos, ya que su importancia radica en la contribución a la morfología del cauce y ayuda a determinar la permanencia del canal natural.

La hipótesis de transporte de sedimentos indica que las variables que gobiernan el movimiento de sedimentos en un cauce natural son la capacidad de transporte del cauce y la disponibilidad de sedimento (Graf, 1971; Simons y Senturk, 1992).

Rada (1986) correlacionó batimetrías realizadas en 1952, 1978, 1985 en donde estableció la relación sedimentación-erosión de la zona, concluyendo:

- Se presenta un incesante proceso de sedimentación-erosión lo que conserva el equilibrio dinámico de la zona.
- En la parte media del Estero Salado (Boya 39 y 32) hay una preeminencia de la sedimentación, acentuándose frente a la Isla Escalante y Paso Santo.
- Existe un desplazamiento relativo de los bancos de sedimentos hacia el eje del Canal en el Estero Salado.

Los sedimentos ubicados en un estuario están relacionados con la erosión, el lavado de suelos de las cuencas, las formaciones rocosas aledañas, así como de la minería, del dragado y del océano con el que interactúa. Los sedimentos depositados se ven afectados en función de la energía de corriente de la zona, del tamaño de grano y de la densidad de las partículas.

La turbidez también está coligada a este proceso, ya que las partículas suspendidas son las que establecen la penetración de luz en las capas de agua del estuario, es decir, que mientras más sedimento suspendido se reconozca en la zona, más turbia será el agua. Stevenson (1981) acarreó estudios con el disco de Secchi para evaluar el grado de turbidez calculando la profundidad de la zona eufótica en el estuario del Guayas, en donde halló valores de 1-3 m en el estuario interior y de 11 m en el estuario exterior.

Delft Hydraulics Laboratory (1985) realiza un estudio en el que determinó:

- El sedimento predominante en la época seca consiste en material fino.
- Hay una mayor concentración de sedimento de fondo.
- La tasa de transporte de sedimento suspendido está vinculada con las mareas y corrientes.
- Las áreas de pantanos y manglares son las que más acopian sedimentos en el estuario acumulándose gradualmente, sin embargo, la totalidad del sedimento transportado se dirige hacia el mar.

1.1.9.8. Mezcla en el estuario, prisma de marea y tasa de renovación

La mezcla en los estuarios se ve regida por la acción simultánea entre la energía de descarga de las aguas dulces, las corrientes de marea, el viento y otros tipos de energías que impulsan estos cambios a lo largo del tiempo. Entre las primordiales están:

- **Salinidad:** las diferencias entre las densidades ocasionadas por la mezcla advectiva entre río y mar genera la circulación estuarina. Los gradientes de presión suceden por la inclinación de la isopicna y estas entran en la dirección del flujo conducido por la densidad media, dado como lugar a un patrón de circulación típico de un estuario. La mayor energía cinética está disponible al quebrar la interfase y al combinarse por turbulencia entre las capas de agua dulce y salada.
- **Fuerza de la marea:** una de las responsables de la mezcla estuarina, la interacción entre corrientes de marea y fronteras estuarinas inducen a turbulencias y la mezcla a larga escala y efectos dispersivos. Esta composición es generada porque la energía de las mareas se convierte en energía cinética produciendo turbulencia, acrecentando la energía potencial del agua mediante la mezcla vertical.
- **Esfuerzo del viento:** esta consecuencia pende de las corrientes provocadas y solo toma importancia en estuarios abiertos y someros.

Cuando se producen mareas de sicigia las amplitudes de marea y corrientes se intensifican lo que incrementa la mezcla vertical del estuario, permitiendo el afloramiento de fondo y aumentando los nutrientes desde el fondo hasta la zona fótica.

Prismas de marea es la cuña de agua que se integra al sistema del Golfo con la onda de marea, está se calcula entre los volúmenes de agua en el pleamar y bajamar. En el sistema estuarino del Golfo se han obtenido $1228 \times 10^6 \text{ m}^3$ para el ramal del Estero Salado-Canal del Morro y de $4432 \times 10^6 \text{ m}^3$ para el ramal del Río Guayas-Canal de Jambelí (Vera, 2003).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La ejecución de este proyecto que tiene como objetivo analizar la evolución de los bajos durante la última década se dividió en tres fases descritas a continuación:

2.1. Levantamiento de información

2.1.1. Información Batimétrica

Para visualizar la morfología de los bancos de sedimentos, se recopilaron dos fuentes de información batimétrica.

Como primera fuente de información, el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR) ha realizado varias campañas de levantamiento hidrográficos en el 2004, 2009, 2021, con el fin de generar cartografía náutica. Dicha información para fines académicos es de acceso gratuito, sin embargo, es de libre acceso pagado para cualquier organización interesada. Los datos estadísticos fueron obtenidos posterior al procesamiento.

Tabla 2.1. Información relevante de los levantamientos hidrográficos

| Año | Espaciado | Ecosonda | Profundidad Mínima | Profundidad Máxima | Profundidad Media |
|------|-----------|----------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 2004 | 125 | Mono haz | -1.200 | 22.342 | 6.074 |
| 2009 | 50 | Mono haz | -1.500 | 20.717 | 6.283 |
| 2021 | 100 | Mono haz | -1.980 | 20.683 | 6.299 |

La segunda fuente de información batimétrica proviene de Jan de Nul Ecuador, la cual no es de acceso libre, sin embargo, al ser nuestro cliente, fue proporcionada con facilidad. Se cuenta únicamente con una campaña de levantamiento hidrográfico ejecutada en el 2021.

Estos levantamientos hidrográficos se realizaron empleando un ecosonda mono haz, con la cual se realizan perfiles paralelos perpendiculares a la costa. Debido a la naturaleza somera del área, se presentaron limitaciones para correcta toma de estos perfiles, resultando en espaciados y traslapes no uniformes.

La información batimétrica obtenida por INOCAR esta referenciada al Mean Low Water Springs (MLWS) o nivel medio de bajamares de sicigia y cubren toda el área de estudio.

La incertidumbre vertical de un ecosonda equivale a la incertidumbre de las profundidades reducidas, por lo que, para obtener dicho valor, se combinaron todos los errores en la determinación de la profundidad y así obtener la incertidumbre total vertical (TVU) empleando la ecuación (2.1) con un 95% de confianza. Según la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) se obtiene de la siguiente manera:

$$TVU = \sqrt{a^2 + (b \times z)^2} \quad (2.1)$$

Siendo a, el error constante de profundidad; b, el coeficiente de error, el cual depende de la profundidad y z, la profundidad media de la batimetría.

2.1.2. Parámetros Oceanográficos

Mediante la base de datos de mareas de Jan de Nul e INOCAR, se obtuvo que la amplitud de la marea varía en el Golfo de 1.5 m durante la fase de cuadratura a 2.3 m en la fase de Sicigia.

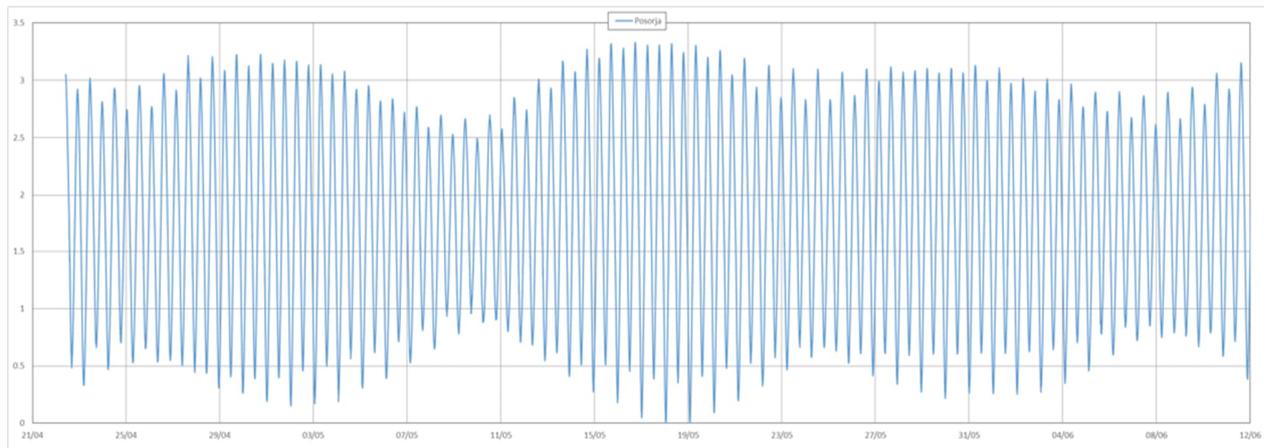


Figura 2.2 Marea registrada para época húmeda y época seca en la Estación C2 perteneciente a Jan de Nul

De esta forma se emplearon estos datos de marea, para la complementación de la meta data de las imágenes satelitales.

2.1.3. Muestreo de Sedimentos

Jan de Nul realizó campañas de muestreo de sedimentos incluyendo la obtención de núcleos, con el fin de caracterizar los sedimentos del área de estudio. En total se realizaron 6 campañas de muestreo y se tomaron un total de 59 muestras en la recolección de sedimentos:

Tabla 2.2 Marea registrada para época húmeda y época seca en la Estación C2 perteneciente a Jan de Nul

| Campañas | Fechas | Muestras Tomadas |
|----------|------------|------------------|
| #1 | 22/08/2020 | 05 |
| #2 | 25/11/2021 | 09 |
| #3 | 13/07/2022 | 05 |
| #4 | 26/09/2022 | 13 |
| | 27/09/2022 | |
| #5 | 02/03/2022 | 16 |
| | 03/03/2022 | |
| #6 | 05/01/2023 | 11 |

Estas muestras fueron obtenidas utilizando el penetrómetro Piston Sampler o muestreador de Pistón, el cual logra penetrar el suelo a un máximo de 2 metros, permitiendo así obtener un núcleo, el cual proporcionaría información de las capas superficiales que componen estos bancos de sedimentos.



Figura 2.3 Sedimentos tomados con el Piston Sampler

Un análisis granulométrico fue realizado en los núcleos, lo cual fue una entrada para la validación de la metodología en las siguientes etapas.

2.1.4. Teledetección

Es un proceso que ha significado un gran avance para el monitoreo de la superficie terrestre, el cual está basado en la ciencia y la tecnología, utilizando energía emanada por la superficie de la tierra para identificar las características del área de interés (Mirabá, 2021).

Estudios de las diferentes respuestas de la superficie marina en el espectro electromagnético han aumentado, dado que las características naturales del mismo hacen que el agua presente una mayor reflectividad en las bandas cortas (visibles) y menor en largas (infrarrojos) por lo que la implementación de las primeras bandas es fundamental para el análisis de sedimentos suspendidos (Cruz, 2020). No obstante, en este proyecto se

considera la profundidad mediante información batimétrica dado que para posteriores análisis es necesario separar el fondo de los sedimentos suspendidos en la columna de agua de la zona del sistema de bancos de arena a causa de que esta influye en la respuesta espectral.

El proceso de teledetección involucra una radiación incidente y los objetos de interés, así como la percepción de energía emitida y el uso de sensores que no producen imágenes (ver Figura 2.4).

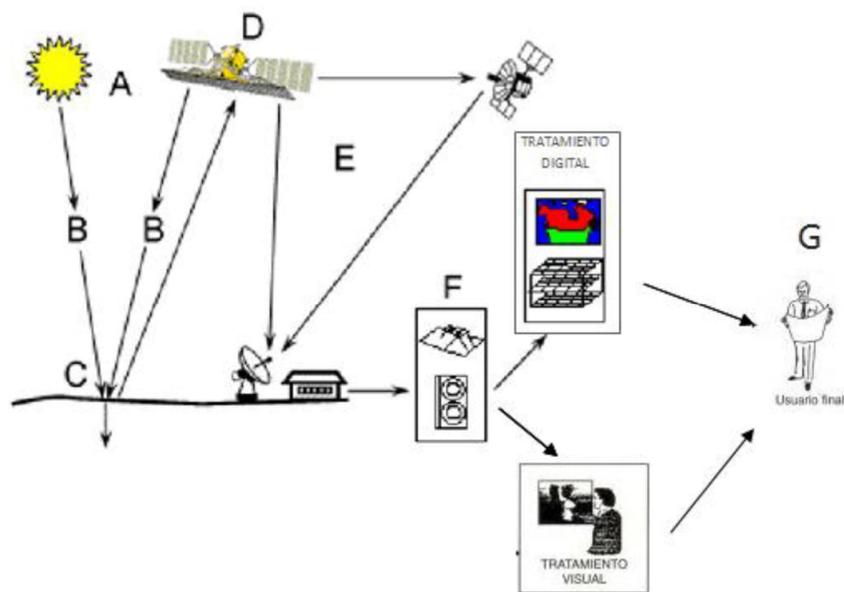


Figura 2.4. Componentes de un sistema de percepción remota. (Coutiño, 2021)

- A.** Fuente de energía o iluminación, el flujo energético detectado por el sensor ilumina y provee de energía electromagnética al objeto de interés. Puede ser una fuente externa al sensor ya sea teledetección pasiva o activa.
- B.** Atmósfera y radiación, puede presentarse de dos formas ya sea al momento de interactuar con el objeto, el cual es fuente de energía y cuando la energía viaja hacia del objeto al sensor, para ambos casos la energía interactúa con la atmósfera.

- C. Interacción con el objeto, este recibe señal energética procedente de la fuente e interactúa de forma particular con ella en función a sus propiedades y características físicas.
- D. Sistema sensor, integrado por el sensor y la plataforma encargada de la “transporte” de esa energía, mediante la captación de energía emitida para luego codificarla, grabarla y enviarla al sistema.
- E. Estación de recepción-comercialización, se recibe la información por el sensor, grabada como una imagen con sus correcciones para su posterior difusión y distribución.
- F. Interpretación y análisis, la imagen es analizada e interpretada para extraer la información sobre el objeto de interés para facilitar la visualización.
- G. Aplicación, el usuario final es encargado de analizar y aplicar la información obtenida para aplicar conocimientos y analizar resultados.

2.1.5. Tipo de sensores

Existen dos tipos de sensores cuya diferencia se basa en la recepción de señal, el pasivo recibe señal emitida naturalmente y reflejada por el objeto percibido al contrario de los sensores activos (Mirabá, 2021).

Mientras que los pasivos no pueden penetrar la capa densa de la atmósfera cubierta por nubes, los sensores activos tienen sensores de detección y alcance de radio (radar) que trabajan con el espectro electromagnético lo que da la capacidad de penetrar en la atmósfera en el mayor caso de las condiciones (NASA, 1999).

2.1.6. Bandas del espectro electromagnético

El espectro electromagnético se puede interpretar como el conjunto de las longitudes de onda (y frecuencia, debido a su proporcionalidad inversa) que puede adoptar la radiación. Se encuentra dividido en una serie de bandas o regiones, en la que cada una de ellas presenta el comportamiento de la energía radiante, es decir, la energía transportada por una onda electromagnética (Chuvienco, 1995). Sus unidades van relacionadas con la longitud de onda, en donde las más cortas se utiliza en nanómetros (nm) o micrómetros (μm), mientras que más grande es se miden en centímetros (cm) o metros (m).

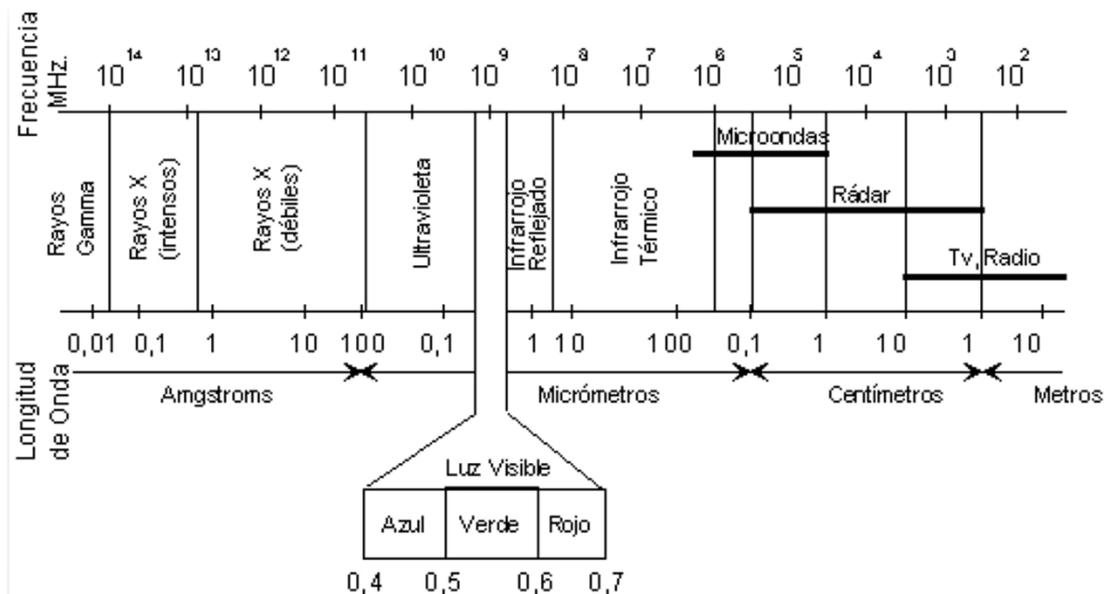


Figura 2.5. Espectro electromagnético

Cabe recalcar las bandas más utilizadas en la teledetección (Chuvieco, 1995):

- Espectro visible (0.4 a 0.7 μm), es la única radiación perceptible al ojo humano, la cual coincide con las longitudes de ondas donde es máxima la radiación solar. Se divide en tres bandas elementales: azul (0.4 a 0.5 μm); verde (0.5 a 0.6 μm) y roja (0.6 a 0.7 μm), colores los cuales son asociados a la longitud de esa onda.
- Infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm), también conocido como infrarrojo reflejado y fotográfico, es importante al momento de detectar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm), es donde se mezclan los procesos de la luz solar y el de la emisión de superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm), incluye la fracción emisiva del espectro terrestre.
- Microondas (a partir de 1 mm), es un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa, sin embargo, está asociada a poca energía.

2.1.6.1. Selección de imágenes satelitales

Se descargaron imágenes satelitales de libre acceso utilizando Google Earth Engine y la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS abarcando aproximadamente 10 años (2004 – 2022), las imágenes entre los años 1999 y 2017 fueron obtenidas de la serie del satélite Landsat-7 que acabó su misión el 7 de febrero del 2017 y para los años posteriores del 2015 al 2022 se utilizó Sentinel-2 que se encuentra en órbita desde el 23 de junio del 2015 hasta la actualidad. Tienen las características siguientes:

Tabla 2.3. Composición de imágenes satelitales seleccionadas

| Características | Descripción | |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Agencia Espacial | European Space Agency | NASA |
| Satélites | Sentinel-2A | Landsat-7 |
| | Sentinel-2B | |
| Fecha de Lanzamiento | 23/06/2015 | 15/04/1999 |
| | 28/03/2017 | |
| Sensores | Multispectral Instrument (MSI) | Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) |
| Resolución espectral [# de bandas] | 12 | 8 |
| Resolución espacial [m] | 10 - 60 | 15 - 60 |
| Resolución temporal [dd] | 10 | 16 |

Las imágenes fueron escogidas bajo los siguientes parámetros:

- Cobertura de nubes en la zona de estudio
- Condiciones cercanas a bajamar
- Hora y fecha de la captura de la imagen
- Calidad visual de la imagen

De esta forma, al procesar las imágenes satelitales se identificaron algunas desventajas del Landsat-7 a comparación del Sentinel-2, ya que estas presentaron bandeamiento generando líneas de ausencia de información, este error fue corregido con la herramienta

QGIS, pero seguían teniendo una baja resolución de 30 metros por píxel y el análisis de visualización de datos y cálculos de los índices espectrales se dificultaba.

Se ejecutaron índices espectrales en imágenes manualmente seleccionadas del Sentinel-2 desde el 2018 hasta el 2022 en época seca y lluviosa, descartando los años 2015 a 2017, puesto que no existe récord de toma de imágenes en dicho periodo. Para el conocimiento de la base de datos de las imágenes satelitales se accedió a su meta data, en donde se obtuvieron los porcentajes de nubosidad, sombra, de píxeles sin data, la proyección, la hora de captura siendo aproximadamente tomadas a las 3:00 p.m. y la escala de cada imagen.

Las bandas principales consideradas de en el análisis multi temporal SENTINEL fueron:

Tabla 2.4. Bandas espectrales utilizadas para el cálculo de los índices

| Bandas utilizadas | | Longitud de onda (μm) | Resolución (m) |
|-------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------|
| B3 | Verde | 0.500 – 0.578 | 10 |
| B4 | Roja | 0.620 – 0.700 | 10 |
| B8 | Infrarrojo cercano (NIR) | 0.700 – 1.300 | 10 |
| B11 | Infrarroja de onda corta (SWIR) | 1.610 | 20 |

2.2. Procesamiento de Información

2.2.1. Google Earth Engine (GEE)

GEE es una plataforma de procesamiento geoespacial gratuita que es eficaz al momento de procesar una gran cantidad de datos conocidos como “big data” y monitorear series temporales. Tiene una interfaz de programación con un editor de código basado en el lenguaje Java y Python (Mirabá, 2021), al mismo tiempo que alberga escalas de Peta bytes de más de 40 años de datos de teledetección, como Landsat, MODIS, National Oceanographic and Atmospheric Administration Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA AVHRR), Sentinel 1, 2, 3 y 5-P; y datos del Satélite Avanzado de Observación Terrestre (ALOS) (Tamiminia, y otros, 2020).

2.2.2. Aplicación de índices espectrales

Los índices espectrales son operaciones aritméticas calculado para cada píxel de la imagen satelital utilizando las bandas de reflectancia espectral de dos o más longitudes de onda. Estos fueron aplicados con el objetivo de tener un mejor conocimiento acerca del comportamiento de los bancos de arena e identificar los cambios en sus contornos a lo largo del tiempo.

Posteriormente, a la obtención y filtración de imágenes satelitales del Sentinel-2 lanzado por el programa Copernicus en el 2015, se implementó la herramienta de acceso libre Google Earth Engine con el fin de a analizar los siguientes índices espectrales:

Tabla 2.5. Índices espectrales utilizados en el estudio

| Indicadores | Fórmula |
|--|---|
| NDVI Normalized Difference Vegetation Index (Tarpley et al., 1984) | $\frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$ |
| WRI Water Ratio Index (Shen y Li, 2010) | $\frac{\text{Green} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{SWIR1}}$ |
| LSWI Land Surface Water Index (Xiao et al., 2002) | $\frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$ |
| NDWI Normalized Difference Water Index (McFeeters, 1996) | $\frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}}$ |
| MNDWI Modified Difference Water Index (McFeeters, 1996 - modified by Xu, 2006) | $\frac{\text{Green} - \text{SWIR}}{\text{Green} + \text{SWIR}}$ |

Se compararon los diferentes resultados basados entre 5 índices: NDVI, MNDWI, LSWI, WRI Y NDWDI (ver Tabla 2.5). Considerando imágenes desde el 2018 hasta el 2022 las cuales fueron seleccionadas con respecto a la nubosidad y condiciones de bajamar cercanas a las condiciones de sicigia época seca y lluviosa comprendida entre los meses de mayo a noviembre y de diciembre a abril respectivamente.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (**NDVI**) es usado para cuantificar el verdor de la vegetación y ayuda comprender la densidad de la vegetación y evaluar sus cambios, haciendo que el pigmento de la clorofila genere una reflectancia espectral en la parte visible e infrarroja cercana (Tarpley, Schneider, & R.L., 1983). La reflectancia diferencial entre estas bandas ha sido utilizada ampliamente para clasificar y estimar la cobertura de tierra o cultivos y detectar el estrés en plantas. Su fórmula es:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (2.2)$$

En donde,

NIR: es la luz que se refleja en el espectro del infrarrojo cercano

Red: es la luz que se refleja en el rango rojo del espectro

Sus valores van desde -1 a 1, cuando son negativos están conformados por nubes, agua y nieve, los valores negativos que son cercanos a cero se interpretan como rocas y suelo descubierto, valores <0.1 corresponde a secciones sin roca, arena o nieve.

Land Surface Water Index (LSWI), está relacionado con el agua del contenido total de agua en la vegetación mediante el uso de bandas infrarrojas cercanas e infrarrojas de onda corta reflectadas, este proyecto fue usado para monitorear la superficie alrededor de los bancos de área, se calcula como:

$$LSWI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR} \quad (2.3)$$

Donde:

NIR: representa la reflectancia infrarroja cercana reflectada

SWIR: representa la reflectancia infrarroja de onda corta

Water Ratio Index (WRI), desarrollado por Shen y Li (2010) en donde se utilizan cuatro bandas espectrales.

$$WRI = \frac{Green-Red}{NIR+SWIR1} \quad (2.4)$$

Donde,

Green: banda de reflectancia verde

Red: band de reflectancia roja

NIR: banda infrarroja cerca

SWIR1: banda infrarroja de onda corta

Este método es solo aplicable a aquellas imágenes satelitales que tiene una banda infrarroja media (Shen & Li, 2010).

El *Normalized Difference Water Index (NDWI)*, su cálculo se deriva de los mismos principios que se utilizaron para derivar el NDVI, se calcula como:

$$NDWI = \frac{\text{Green}-\text{NIR}}{\text{Green}+\text{NIR}} \quad (2.5)$$

Donde:

Green: es la banda que abarca la luz verde reflectada

NIR: representa la radiación infrarroja cercana reflectada

La selección de estas bandas es para maximizar la reflectancia de las características típicas del agua usando las longitudes de onda de la luz verde, minimizar la reflectancia baja de la banda NIR cercana de las características del agua y para aprovechar la alta reflectancia de la banda NIR para la vegetación y las características del suelo (McFeeters, 1996).

Cuando se utiliza esta ecuación para procesar una imagen satelital que contiene reflectancia de la banda visible verde y la banda NIR, el agua tiene valores positivos mientras que el suelo y la vegetación presenta valores cero o negativos, debido a su típica alta reflectancia de la banda NIR (McFeeters, 1996).

Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) modificado por Xu (2006), mejora ciertas características del agua mientras reduce y elimina el ruido terrestre, de la vegetación y del suelo a comparación del NDWI. Se expresa como:

$$MNDWI = \frac{\text{Green}-\text{SWIR}}{\text{Green}+\text{SWIR}} \quad (2.6)$$

Donde:

Green: es la banda que abarca la luz verde reflectada

SWIR: es la banda infrarroja de onda corta

El resultado de esta operación aritmética entre las bandas dará como resultado valores positivos mayores en el área donde haya agua ya que absorbe más luz del infrarrojo medio (MIR) que del infrarrojo cercano (NIR) y el suelo y la vegetación seguirán teniendo valores negativos debido a que el suelo refleja más luz MIR que la de luz NIR (Xu, 2006).

Por el contrario, al compararlo con el índice NDWI, el MNDWI aumenta el contraste entre los suelos y el agua dando una mejora al momento de extraer resultados más precisos sobre las características del agua y disminuyendo valores de positivo a negativos del suelo, vegetación y edificaciones.

2.2.3. Prototipo de diseño

Mediante el uso del *code editor* de la herramienta GEE, se realizó la filtración de imágenes encontradas en el catálogo de Sentinel-2. La Tabla 2.6 describe las herramientas usadas en el análisis de los índices espectrales.

Tabla 2.6. Herramientas utilizadas en GEE

| Herramienta | Función |
|----------------------|---|
| ee.ImageCollection | Permite visualizar el catálogo de datos de una serie temporal de imágenes. |
| ee.FeatureCollection | Permite operaciones adicionales en todo el conjunto del set, ya sea como filtrar, organizar o renderizar. |
| ee.Date | Permite visualizar fechas. |
| .filterDate | Filtra rangos de fecha. |
| .filterBounds | Filtra los datos de la región mediante una geometría dada. |
| .filterMetadata | Filtra el porcentaje de nubes por píxel. |
| Map.centerObject | Centra la vista del mapa en un objeto determinado. |
| Map.addLayer | Permite agregar una capa al mapa mediante ajustes en la visualización. |
| Export.image.toDrive | Exporta una imagen como ráster a Drive |

2.2.4. Procesamiento en Sistemas de Información Geográfica

2.2.4.1. Obtención de contornos, superficies y volumen

El objetivo principal fue comparar los perímetros de los bancos de sedimentos a través de la batimetría del 2004, 2009 y 2021, para lo cual se siguió el siguiente proceso:

1. Empleando el software ArcGis, con la caja de herramientas de ArcToolbox, se obtuvo un ráster de puntos como entrada para la interpolación de la superficie, empleando la técnica *Inverse Distance Weighted* (IDW) para obtener un modelo digital espacial.
2. A partir de este modelo digital espacial, se calcularon los volúmenes y áreas a partir de las cotas 0 y -2 empleando dos herramientas de QGIS.
3. Se redujo el área de interés definiendo un *shapefile* con el que se calcularon curvas de nivel y con la herramienta *ráster Surface Volume*, se calculó el volumen debajo de cada una de las curvas de nivel elegidas para el 2004, 2009 y 2021, lo cual resulta en las variables de entrada para estimar una posible erosión o acreción.

4. Se obtuvieron las tasas de acreción y erosión para los tres periodos, realizando la diferencia entre el periodo 2004 vs. 2009, 2009 vs. 2021 y 2004 vs. 2021, obteniendo tres tasas con referencia a cada periodo.

2.2.4.2. Caracterización sedimentológica

Para la caracterización de los bajos, se tomaron los resultados del análisis granulométrico y visual de las muestras, y se elaboró un mapa de sedimentos empleando el software de información geográfica QGIS, con lo cual se posicionaron los puntos tomados por muestra y se definieron las zonas en las que cada sedimento fue el predominante.

2.3. Aplicación de metodología

2.3.1. Validación y selección del índice espectral

Para la selección del índice espectral, se realizó una comparación en el software QGIS entre cada índice versus la batimetría realizada por Jan de Nul, seleccionando la imagen con condiciones más cercanas a bajamar y próxima a la fecha del levantamiento hidrográfico, el cual fue llevado a cabo en el mes de noviembre del 2021.

Posteriormente se definieron 6 líneas, las cuales están detalladas en la Figura 2.6, a partir de dichas líneas, usando la herramienta *Terrain Profile*, se obtuvieron los valores x, y de los cortes transversales, para ser analizados estadísticamente.

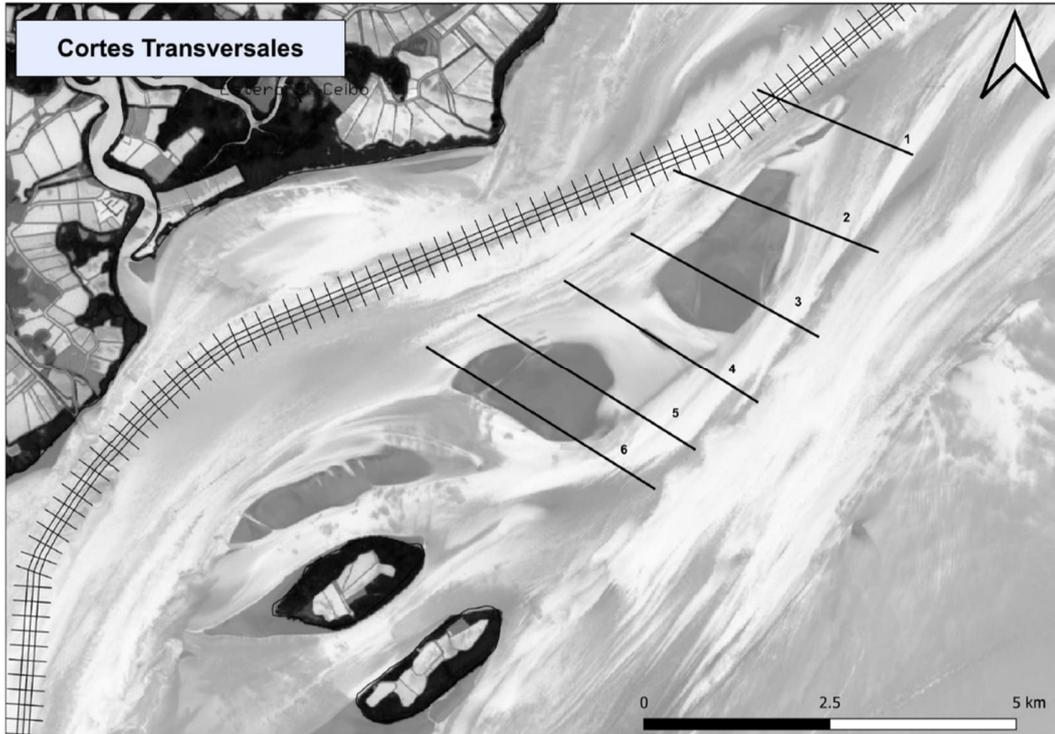


Figura 2.6. Cortes Transversales, QGIS

2.3.2. Análisis estadístico

El coeficiente de relación de Pearson (r_{xy}) analiza variables cuantitativas y mide el grado de relación entre dos variables que se relacionan de manera lineal, y está definido por la ecuación (2.7):

$$r_{xy} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N} \quad (2.7)$$

Este índice es de fácil interpretación, puesto que está comprendido en un rango de -1 a 1, siendo el signo el que determina la dirección del índice.

Por lo tanto, la asociación entre estas dos variables está dada por el valor absoluto del índice como lo detalla la siguiente tabla:

Tabla 2.7. Asociación de variables respecto al valor del índice.

| Valor del índice | Asociación |
|-------------------------|-------------------|
| 0 | Nula |
| 0.1 | Pequeña |
| 0.3 | Mediana |
| 0.5 | Moderada |
| 0.7 | Alta |
| 0.9 | Muy Alta |
| 1 | Perfecta |

La relación es perfecta positiva, cuando a medida que incrementan los valores de una variable, incrementan los otros, y es perfecta negativa en sentido contrario.

Se obtuvo el coeficiente de relación de Pearson, comparando los valores de la batimetría de Jan de Nul, aplicándose el Nivel de Reducción de Sondas (NRS) para llevar la batimetría al nivel de referencia del nivel medio del mar (MSL), de esta forma las imágenes satelitales y la batimetría se encontraban referenciados al MSL.

Finalmente, se realizó una gráfica de dispersión por cada índice versus batimetría para determinar el índice que tenga la correlación más alta, con el cual se tratarían las imágenes del periodo 2018 al 2022.

2.3.3. Análisis del periodo 2018 al 2022

A partir de los tres cortes transversales previamente detallados en la Figura 2.7, se realizó el análisis en el total de imágenes recopiladas durante este periodo.

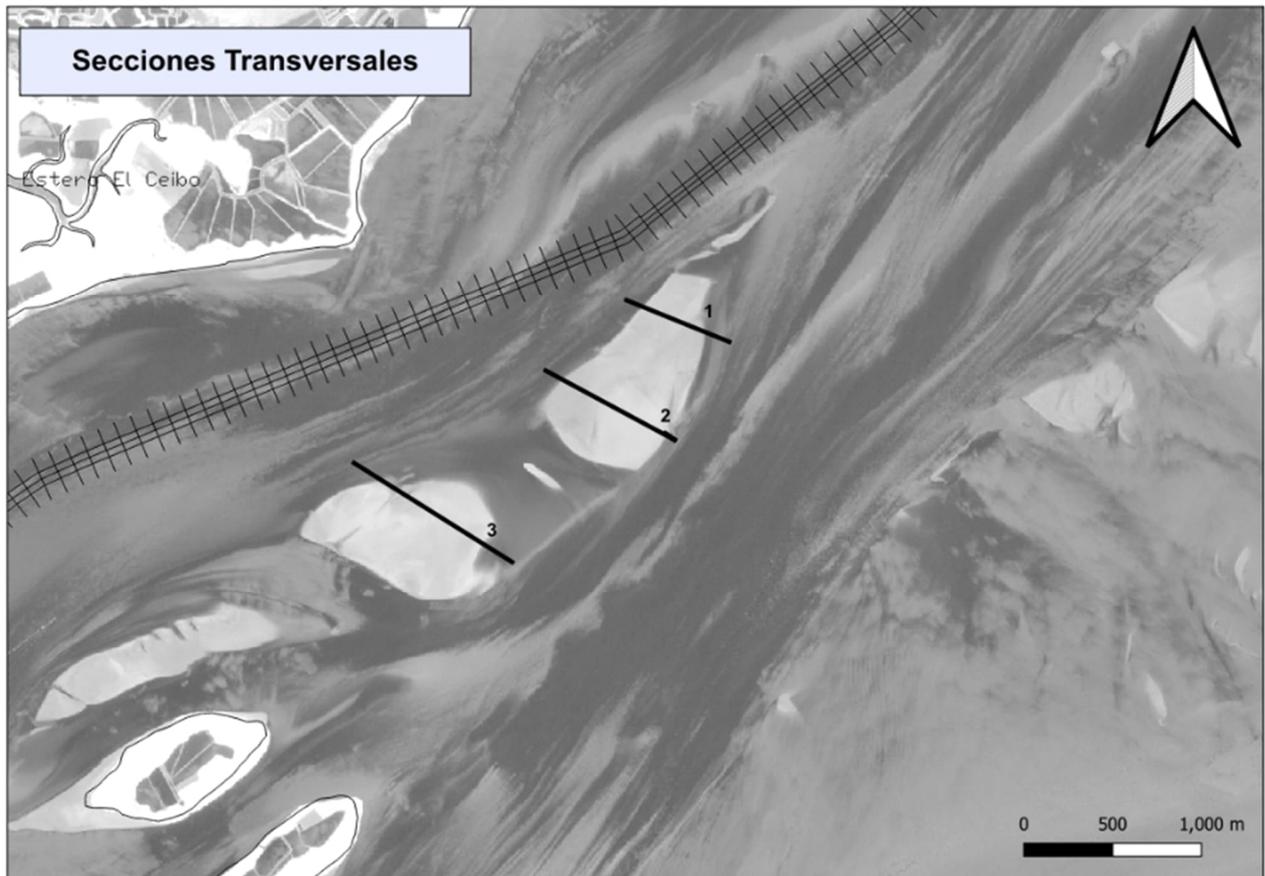


Figura 2.7. Secciones transversales finales, QGIS.

Empleando a herramienta *Terrain Profile*, se obtuvieron los valores xy para el periodo 2018 - 2022, únicamente de los valores del índice MNDWI.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Contornos, superficies y volumen

Para los tres años se generaron los modelos digitales del terreno, con lo cual se obtuvieron volúmenes para los dos niveles de diseño.

Para el 2004, se puede observar que, al MLWS, en la zona de los bancos de sedimentos, la elevación mayor sobresale de la cota 0 m con 1.20 m.

La base de los bancos de sedimentos se puede inferir que va hasta la cota de 1.5 m, en donde en el año 2004 ocupa un área de 7 449 958 m².

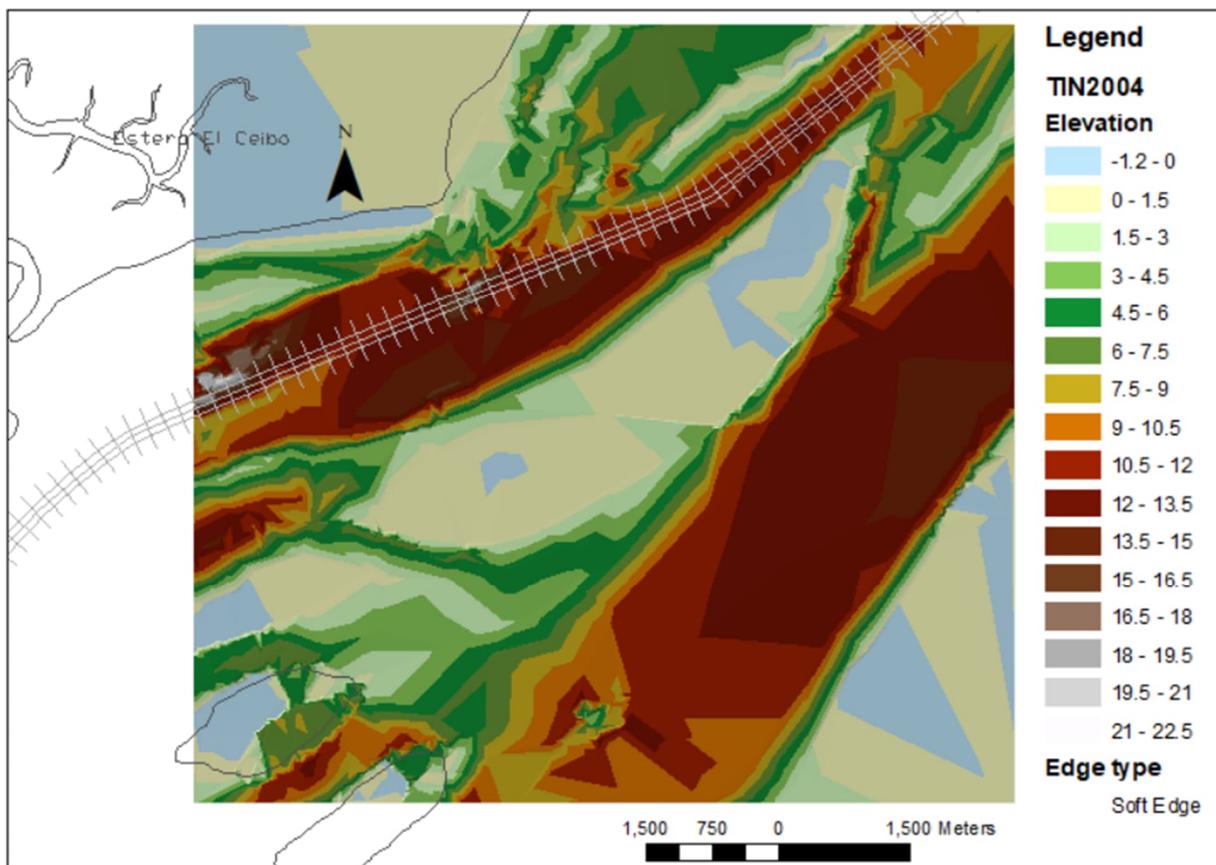


Figura 3.1. Modelo digital del Terreno. año 2004

Tabla 3.1. Área y volumen obtenido para las cotas 0m y -2m, para la batimetría del 2004.

| 2004 | Volumen m³ | Área m² |
|-------------|------------------------------|---------------------------|
| -2m | 13 207 595 | 7 981 425 |
| 0 m | 1 374 144 | 3 246 338 |

Para el 2009, se puede observar que, al MLWS, en la zona de los bancos de sedimentos, la elevación mayor sobresale de la cota 0 m con 1.50 m. Lo que significaría que los bancos presentan pequeños puntos de elevación, puesto que en la cota 0, la superficie del bajo únicamente alcanza los 420 mil m², lo que en total representa una reducción de 2 millones de m².

La base de los bancos de sedimentos se puede inferir que va hasta la cota de -1.5 m a 0 m, en donde en el año 2009 ocupa un área de 6 321 327m². Lo cual implica que la forma de los bancos cambio en el transcurso de 5 años y disminuyó más de 1 millón de m² en superficie.

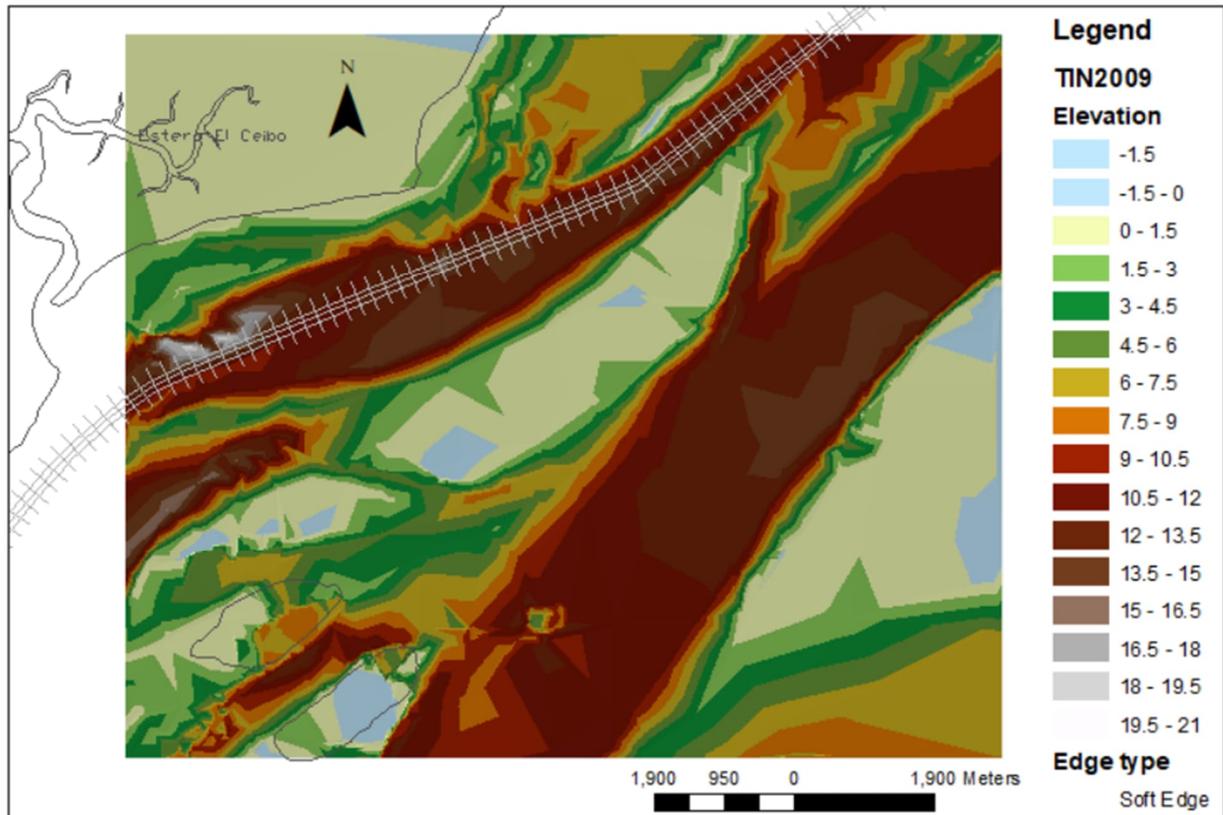


Figura 3.2. Modelo digital del Terreno, año 2009

Tabla 3.2. Área y volumen obtenido para las cotas 0 m y -2 m, para la batimetría del 2009.

| 2009 | Volumen m ³ | Área m ² |
|------|------------------------|---------------------|
| -2m | 9 742 103 | 9 742 103 |
| 0 m | 424 191 | 1 310 869 |

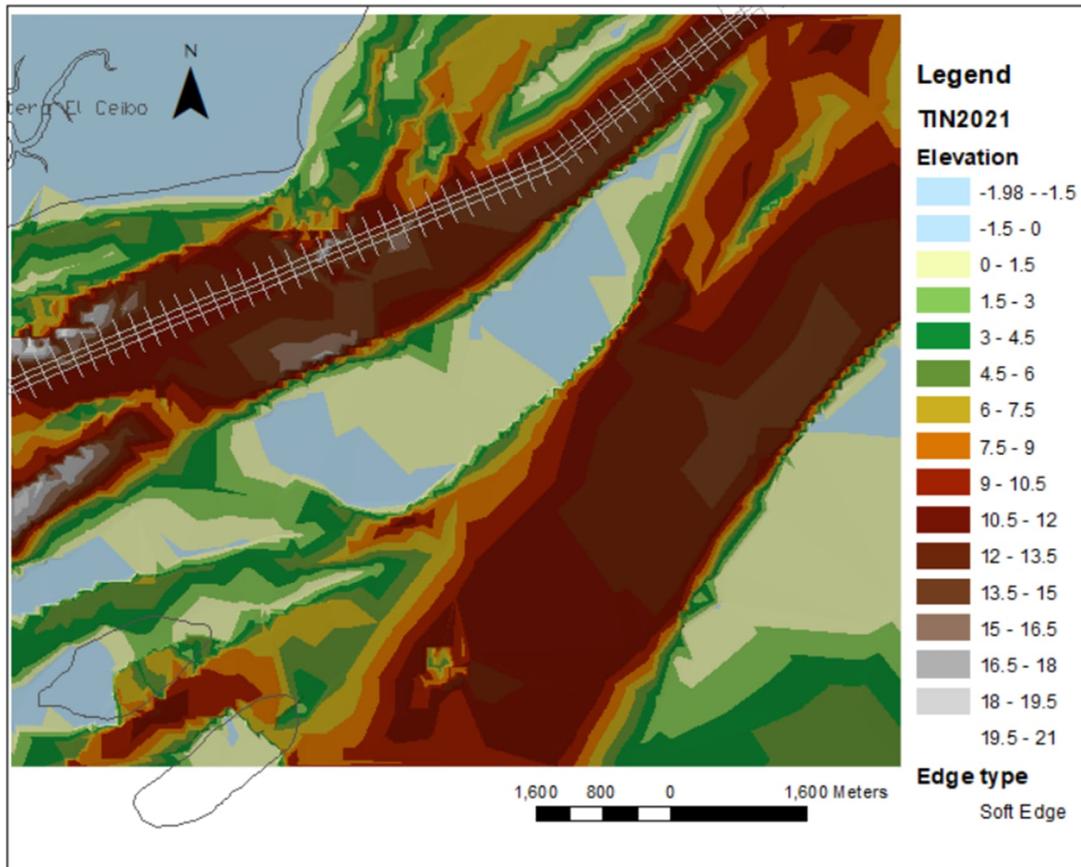


Figura 3.3. Modelo digital del Terreno, año 2021

Tabla 3.3. Área y volumen obtenido para las cotas 0m y -2m, para la batimetría del 2021.

| 2021 | Volumen m ³ | Área m ² |
|------|------------------------|---------------------|
| -2m | 16 854 580 | 7 782 161 |
| 0 m | 3 341 148 | 4 915 725 |

3.2. Determinación de tasa de acreción/erosión.

Se obtuvo en base a la cota -2.0 m, que desde el 2004 al 2009 se dio un proceso de erosión de más de 3 millones de m³, se considera que eventos anormales pudieron generar la erosión del primer periodo.

Posteriormente, en el periodo de 2009 al 2021, se dio una acreción de más de 7 millones de m³, lo cual resulto en un balance total de acreción, puesto que únicamente considerando el periodo de 2004 y 2021, se dio una acreción de más de 3.5 millones de m³.

Tabla 3.4. Acreción/Erosión neta por periodo.

| | Cota | 2004 vs 2009 | 2009 vs 2021 | 2004 vs 2021 | |
|---------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| Tasa de | -2m | -3 465 491 | 7 112 476 | 3 646 985 | erosión |
| (2004 – | 0 m | -1 798 334 | 2 916 958 | 1 967 005 | aproximada 2009): 693 |

mil m³/ año

Tasa de acreción aproximada (2009 – 2021): 592 mil m³/año

3.3. Distribución superficial actual de los bancos de sedimentos

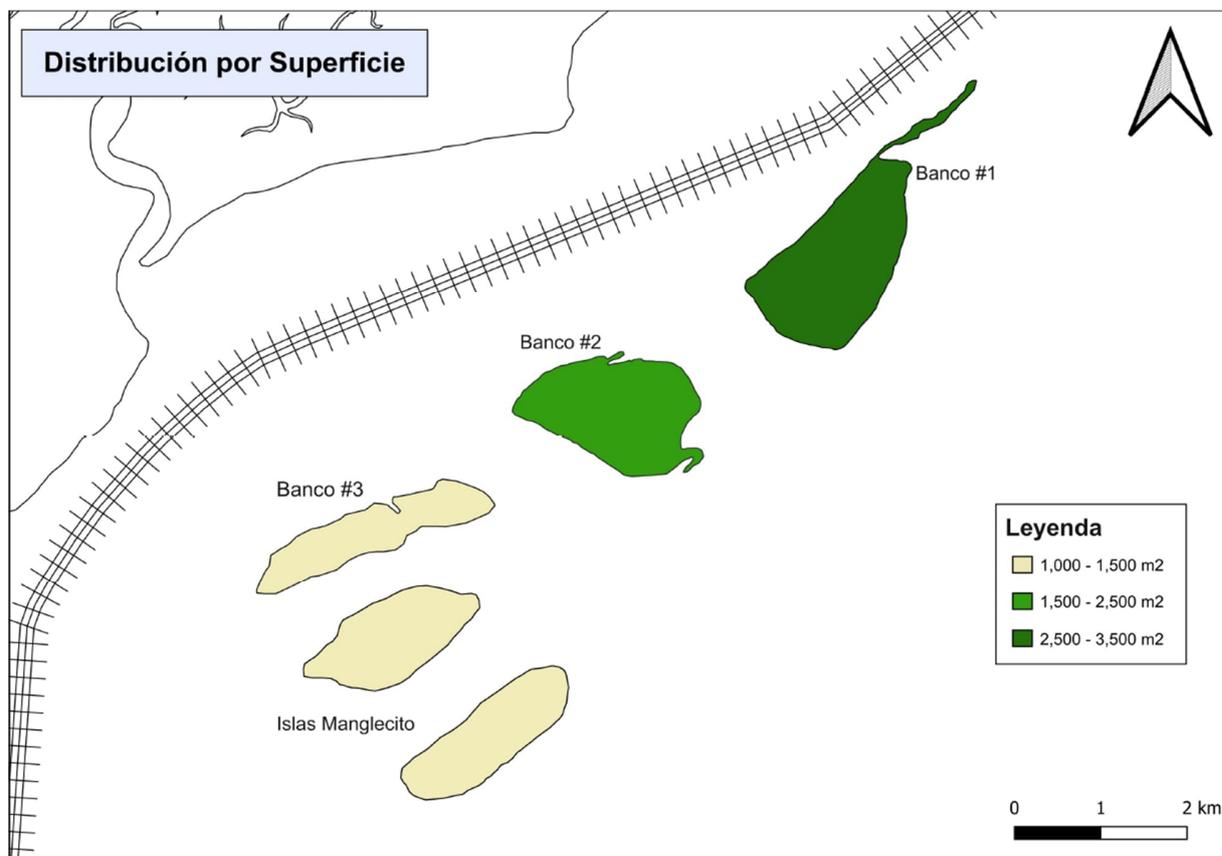


Figura 3.4. Distribución por superficie actual.

Como se puede observar en la Figura 3.4, actualmente el banco principal Banco # 1, como fue llamado para su análisis independiente, supera los 2500 m² de superficie desde la superficie visible obtenida por el procesamiento de las imágenes satelitales.

El Banco # 2 supera los 1500 m², sin embargo, no logra alcanzar los 2500 m² y finalmente el Banco # 3, el cual no se consideró para este trabajo debido a la insuficiente información batimétrica del mismo, superficialmente no logra alcanzar los 1500 m², teniendo una similar superficie a las Islas Manglecito, las cuales se encuentran muy cercanas al mismo.

3.4. Caracterización sedimentológica

La distribución de los sedimentos en los bancos objeto de estudio está distribuida de la siguiente manera:

Existe una mayor presencia de Arena Media, se tomaron 36 muestras en las que predominó esta clasificación y todas fueron tomadas en el banco principal, identificando una superficie consolidada, en la cual la arena predomina

Se tomaron 10 muestras en las que predominó la arena arcillosa, la cual se concentra en la esquina oeste del banco principal.

Y finalmente la arcilla fue encontrada en los dos bajos, no obstante, a pesar de los esfuerzos por muestrear completamente los bancos de sedimentos, se encontraron zonas no accesibles, en donde mayormente se encontró arcilla, la cual no fue muestreada debido a la complejidad en esa zona. Estas zonas no accesibles, también fueron delimitadas en el mapa de sedimentos a continuación.

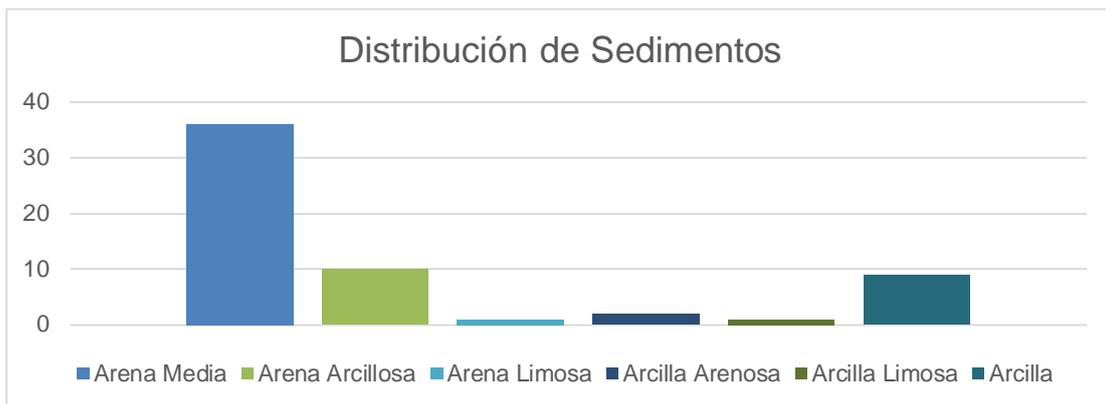


Tabla 3.5. Proporción general de tipo de sedimentos en el Sistema de bancos.

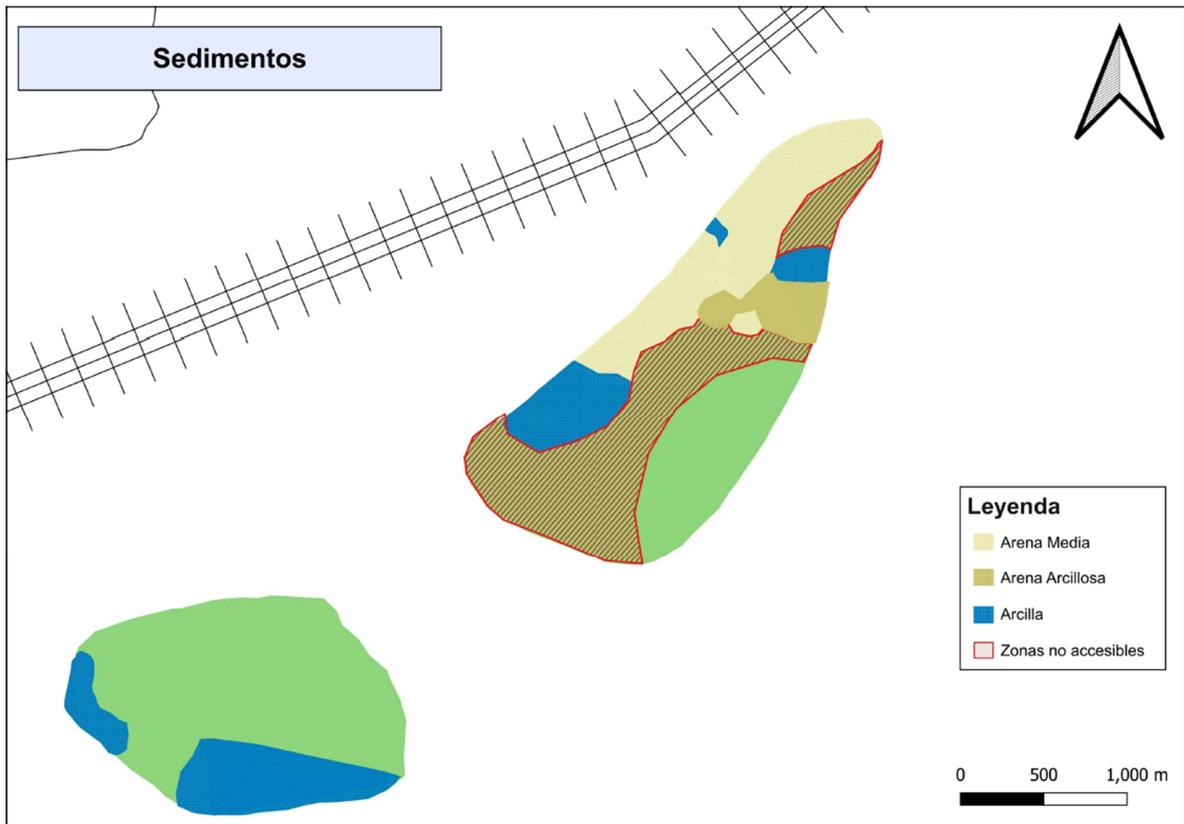


Figura 3.5. Mapa geomorfológico de distribución de sedimentos en el sistema.

3.5. Tendencia de acercamiento al canal de navegación

A partir de los contornos perfilando las batimetrías en el veril -10 m, se observa el límite del sistema de bancos de arena, el cual, para la batimetría del 2004, se encuentra a una distancia de 290 m y se aleja paulatinamente hasta en el 2021 encontrarse a una distancia de 500 m. Esto indica que este sistema no tiende a acercarse al canal de acceso.

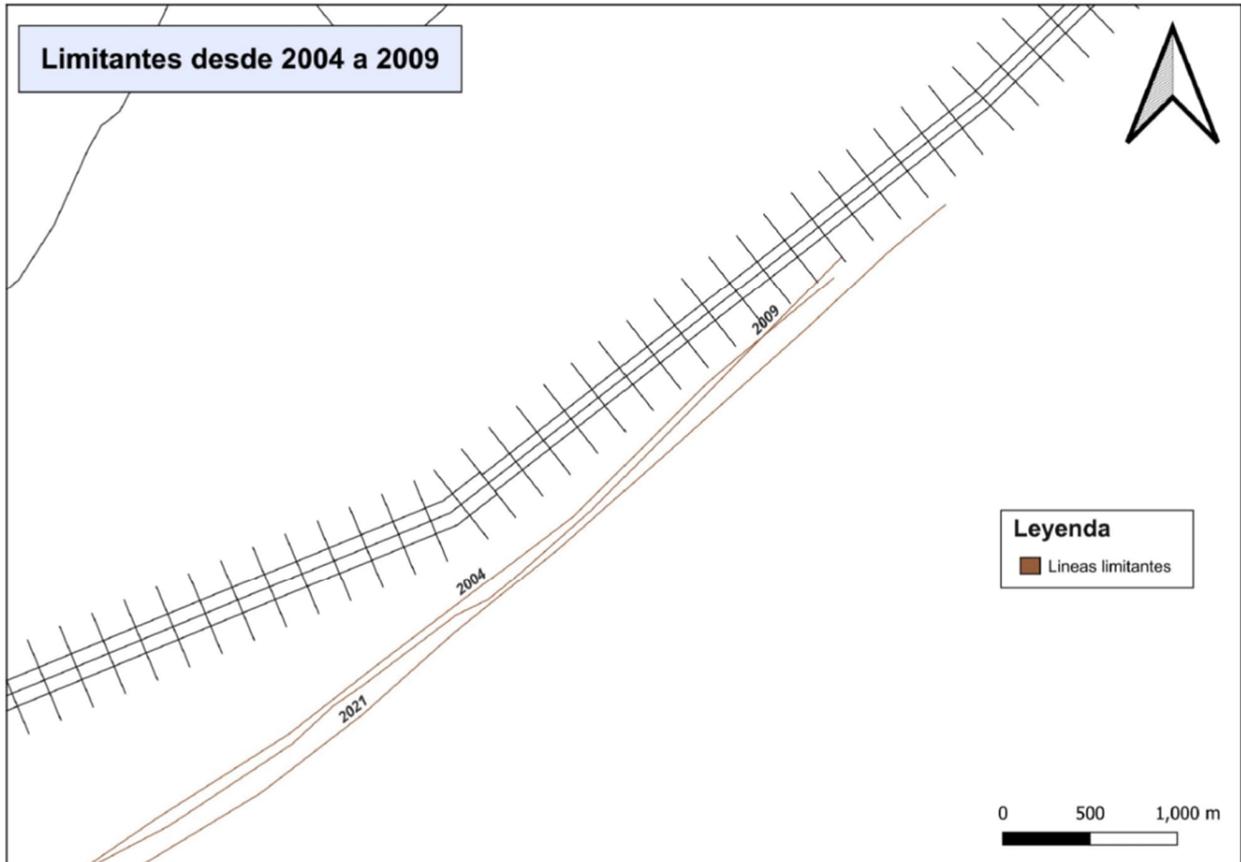
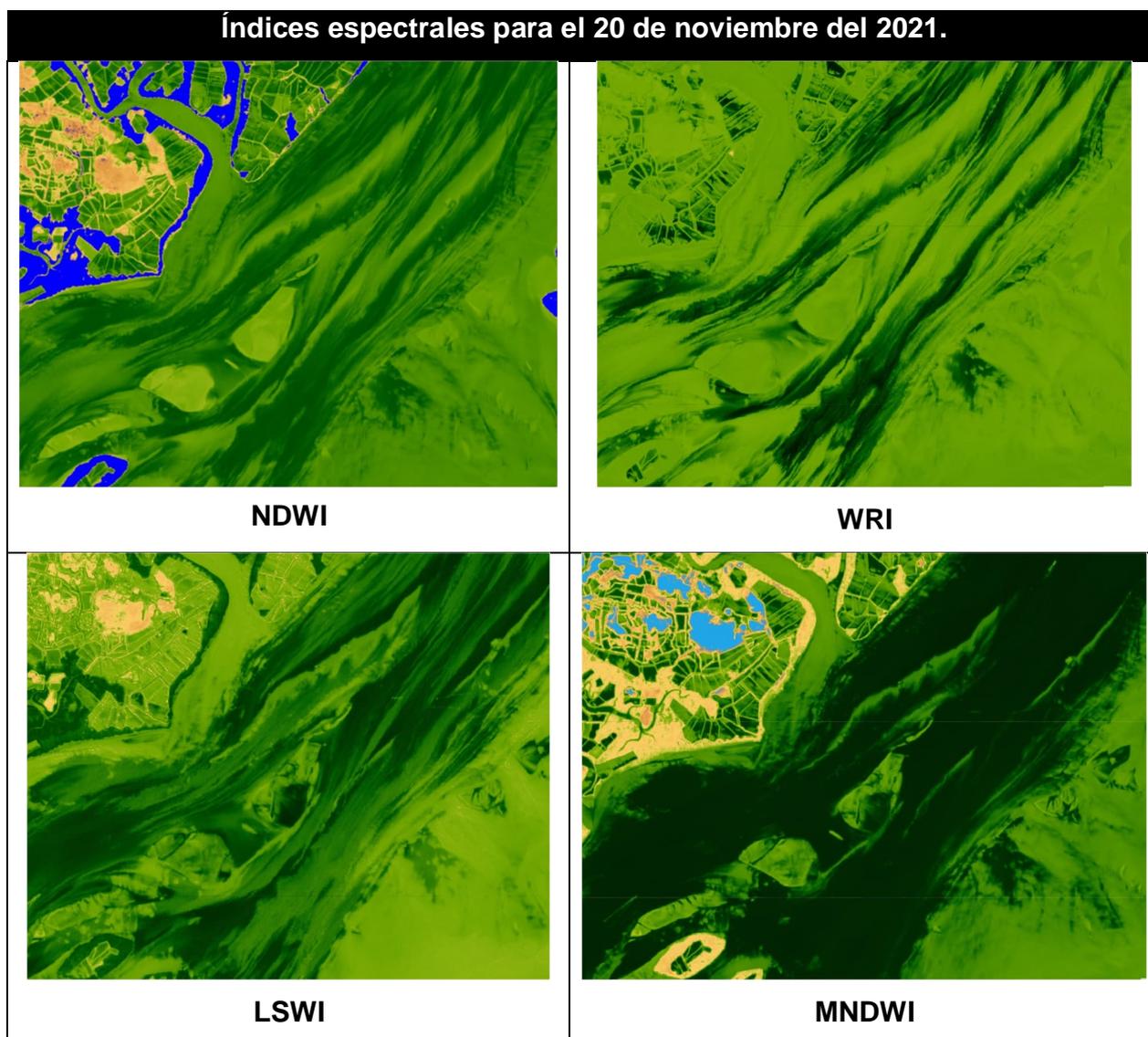


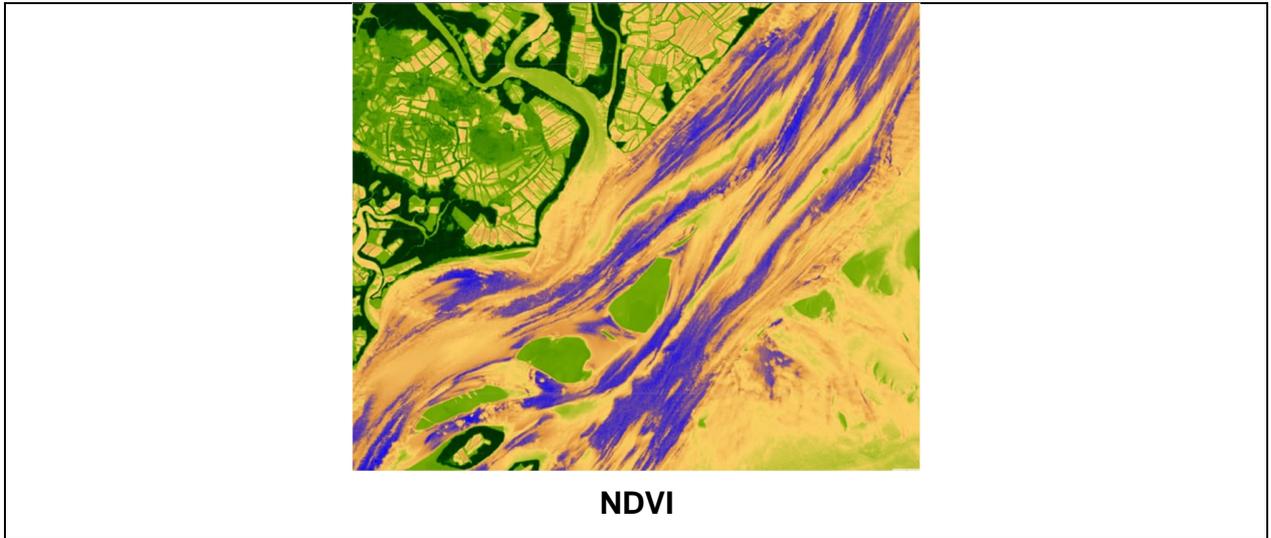
Figura 3.6. Transectas trazados a partir del veril -10m.

3.6. Cálculo de índices espectrales para validación

En la tabla 9 se presentan los resultados de la aplicación de los cinco índices espectrales para la imagen del 20 de noviembre del 2021, de esta manera se puede realizar una inspección visual del contorno del sistema de bancos de área y los resultados esperados de la operación entre bandas.

Tabla 3.6. Índices espectrales para la validación.





3.7. Resultados estadísticos

El índice que tuvo mejor desempeño fue el MNDWI, con el cual se obtuvo un índice de correlación de Pearson de -0.7752419 para los perfiles empleados, únicamente tomando en cuenta los datos que forman parte del contorno visible del bajo, más no fuera, ya que los índices no tienen la capacidad de detectar profundidades por debajo de la línea de agua. Asimismo, el índice NDVI también presentó una correlación media con un coeficiente de 0.61 .

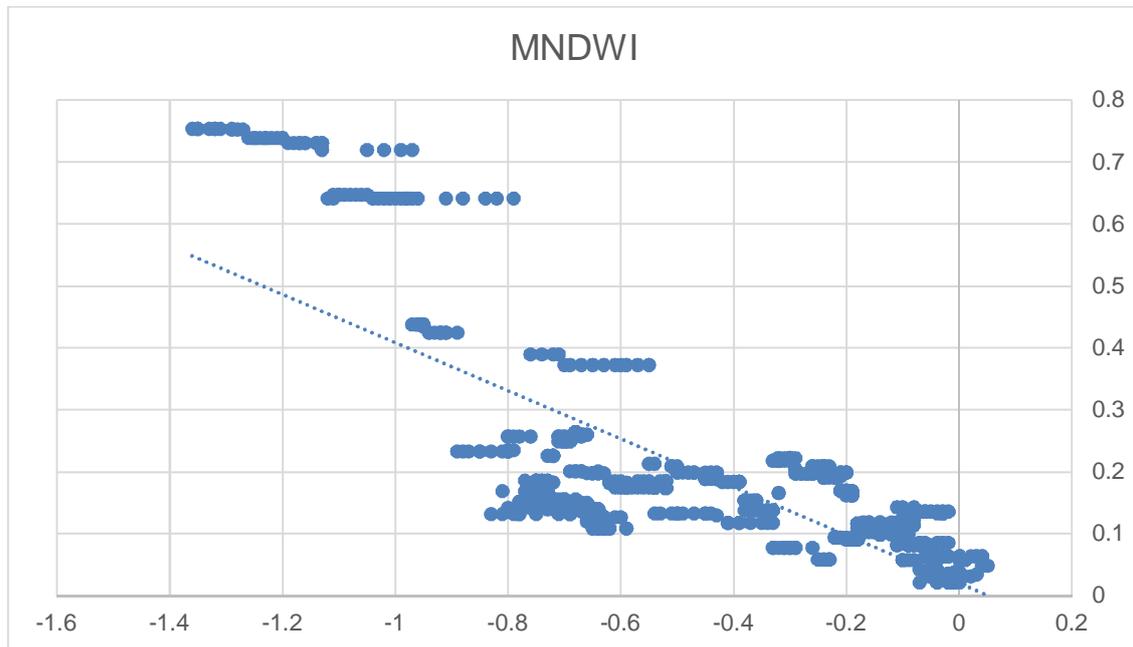


Figura 3.7. Correlación índice MNDWI vs. Batimetría 2021

3.8. Aplicación de los índices para el periodo 2018 al 2022

A partir de la aplicación del índice MNDWI en todas las imágenes recopiladas para el periodo 2018 - 2022, se observaron los siguientes patrones:

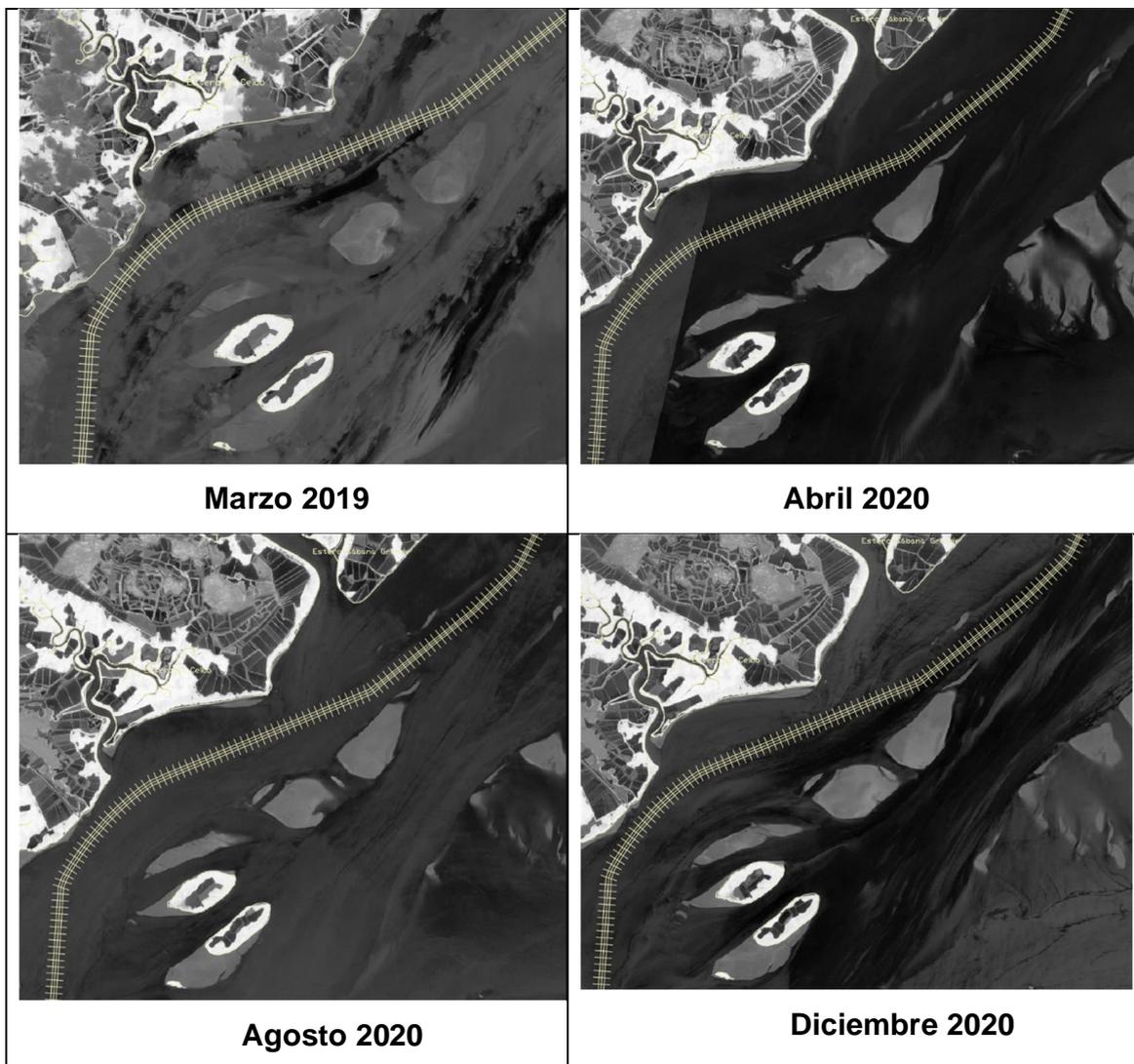
El contorno o perímetro de los bancos de arena mantuvo su forma. Pequeñas diferencias pueden ser observadas en cambios de altura de mareas.

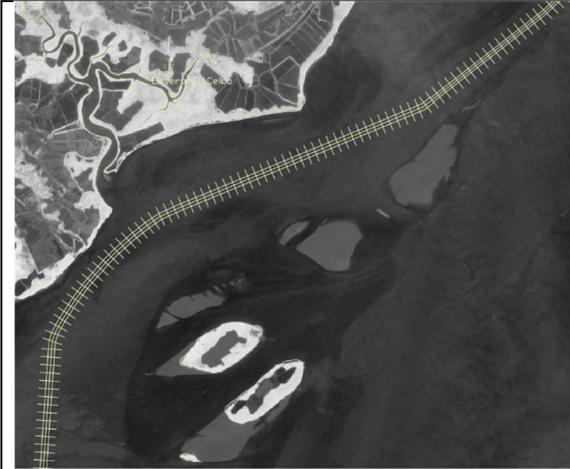
No se identifica un movimiento del sistema, es decir, los bancos de arena se mantienen en la misma posición. Incluso en distintas estaciones.

Se estima que la tendencia de crecimiento del sistema se daría verticalmente, lo cual se observaría empleando esta metodología de manera en que los bancos se identificarían como uno solo.

A continuación, se presenta en escala de grises la aplicación del índice MNDWI, para las imágenes seleccionadas.

Figura 3.8. Vista general del índice MNDWI del periodo seleccionado





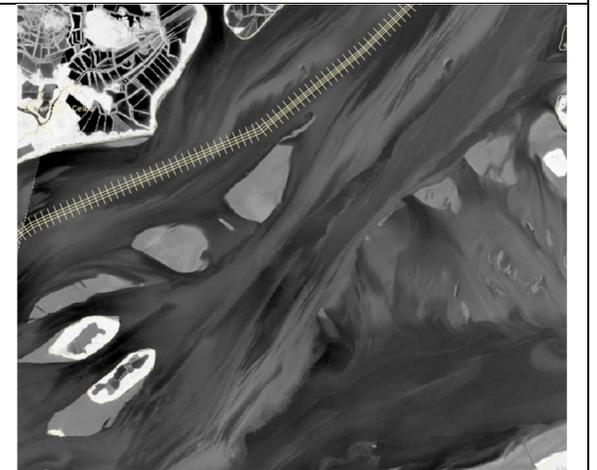
Abril 2021



Noviembre 2021



Enero 2022



Abril 2022

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- La metodología diseñada para el análisis de la evolución de los cambios geomorfológicos en este sistema de bancos de sedimentos puede ser aplicada con imágenes del satélite Sentinel-2, debido a su alta correlación en complemento con las batimetrías obtenidas.
- Se comprobó que el índice con mejor desempeño fue el *Modified Difference Water Index* MNDWI, el cual proporcionó mejores resultados en las zonas en las que los bancos de sedimentos se encuentran consolidados y predomina la arena media. Sin embargo, todos los índices empleados, no son capaces de determinar con exactitud la tendencia batimétrica de los bancos cuando se encuentra en áreas de material no consolidado (Arcilloso) y en aguas profundas.
- Al realizar el procesamiento de las imágenes satelitales se identificaron algunas desventajas del Landsat-7 a comparación del Sentinel-2, ya que estas presentaron bandeamiento generando líneas de ausencia de información, además la resolución resultaba más baja, llegando a 30 metros por píxel, dificultando el análisis de visualización de datos y el cálculo de los índices espectrales se dificultaba.
- Los bancos de arena presentan una zona profunda en su veril de -10, a una distancia de 500 metros del canal de navegación acreción de los bancos de arena no genera una posible afectación a la zona adyacente del canal marítimo, puesto que existe una zona profunda que rodea al canal, lo que implica que estas zonas profundas se mantienen de manera natural.
- Durante el periodo del 2004 al 2009 se identificaron patrones de erosión con una pérdida de más de 3 millones de m³.
- Durante el periodo entre el 2009 y 2021 se identificó una acreción de más de 7 millones de m³.
- Se logró definir una línea base, proponiendo una nueva metodología para el monitoreo futuro de los bancos de arena, además encontrando una relación en la vegetación, que permitiría un óptimo monitoreo empleando el índice NDVI.

- Durante la época lluviosa, se identificó una mayor presencia de sedimentos suspendidos, disminuyendo la capacidad del índice de identificar eficazmente el contorno de los bajos.

4.2. Recomendaciones

- Continuar el monitoreo de los bancos de arena en época seca y época lluviosa para determinar con mayor exactitud el comportamiento del sistema y la tendencia de estos.
- Implementar el cálculo de los índices espectrales con data de otros satélites para comparar resultados entre sí e identificar cual se asemeja a la información batimétrica del área de estudio.
- Realizar pruebas con diferentes unos índices que funcione para identificar zonas profundas en estuarios con alto transporte de sedimentos.
- Se recomienda aplicar los índices en imágenes satelitales con una resolución similar a la del Satélite Sentinel 2, debido a que el área de estudio es muy pequeña y demanda mayor resolución para una correcta visualización.

BIBLIOGRAFÍA

- Benites, S. (1975). *Morfología y sedimentos de la plataforma continental del Golfo de Guayaquil*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Departamento de Geología, Minas y Petróleo, Guayaquil, Ecuador.
- Blanco-Libreros, J. (2021). *Seminario de Estuarios y Manglares*. Universidad de Antioquia, Instituto de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Antioquia.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la teledetección*. Madrid, España: Ediciones Rialp, S.A.
- CONSULSUA. (2017). *Análisis técnico previo al dragado de profundización y mantenimiento del canal de acceso terminales portuarias de Guayaquil*. Guayaquil.
- Coutiño, L. (2021). *Análisis multitemporal de imágenes satelitales para conocer la calidad del agua en la presa: Valle de Bravo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Cruz, D. (2020). *EVALUACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT 8 OLI PARA EL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS EN EL CANAL DEL MORRO*. Guayaquil.
- DELFT HYDRAULICS LABORATORY. (1985). *Canales de acceso del Canal Marítimo de Guayaquil. Causas de sedimentación y recomendaciones en medidas de remediación*. Informe Investigativo, Ecuador.
- Goldberg, P., Mandel, R., & Holliday, V. (2017). *Site formation processes*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. doi:10.1016/B978-012373962-9.00285-5
- Hayes. (1975). *Circulation and salinity distribution in the Rio Guayas estuary, Ecuador*. Office of Naval Research, Geography Programs. New York: Academic Press.
- Kennish, M. (2016). *Enciclopedia de estuarios*. New Brunswick, New Jersey, USA: Springer Dordrecht.
- McFeeters, S. K. (1996). *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. Doi: 10.1080/01431169608948714

- Medina, F. (1990). *Un estudio interdisciplinario de la contaminación Marina en el Río Guayas y el Estero Salado*. ESPOL, CONUEP, Guayaquil.
- Mirabá, K. (2021). *Morfología en el humedal Don Goyo ubicado en el Delta – Estuario del Guayas, y evaluación de sus cambios en 1985 y 2016*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Guayaquil.
- NASA. (17 de septiembre de 1999). *Earth Data Nasa*. (NASA Applied Sciences Remote Sensing Training Program)
- Perillo, G. (1989). *Geomorphologic and sediment transport characteristics of the middle reach of the Bahía Blanca estuary*. Argentina: Journal of Geophysical Research - Oceans.
- Perillo, G. (1995). *Definition and geomorphologic classifications of estuaries*. Amsterdam: Elsevier Pub. Co.
- Piccolo, M., & Perillo, G. (1997). *Antecedentes históricos de las exploraciones en el mar y las características ambientales*. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP). Mar del Plata: (El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros, 1).
- Rada, F. (1986). *Morfología y sedimentación del sistema estuarino Estero Salado - Río Guayas*. Acta Oceanográfica del Pacífico, INOCAR, Guayaquil, Ecuador.
- Shen, L., & Li, C. (2010). *Water Body Extraction from Landsat ETM+ Imagery Using Adaboost Algorithm*. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing.
- STEVENSON, M. (1981). *Variaciones estacionales en el Golfo de Guayaquil-Un estuario tropical*. INP, CIAT. Guayaquil: Boletín científico y técnico.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). *Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Tarpley, J., Schneider, S., & R.L., M. (1983). *Global Vegetation Indices from the NOAA-7 Meteorological Satellite*. Washington: Journal of Climate and Applied Meteorology.

- Vaca, F. (2006). *Análisis de la variabilidad climática de costa ecuatoriana durante el periodo 1949-2004*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Guayaquil, Ecuador.
- Vera, T. (2003). *Manejo ambiental integrado de la acuicultura del camarón en el Golfo de Guayaquil apoyado en sistemas de información geográfica*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Guayaquil.
- Villa, P., Gómez, M., & Pacheco, A. (2016 - 2017). *Análisis morfológico en la confluencia de los ríos Daule y Babahoyo realizado en el año 2016*. Acto Oceanográfica del Pacífico Vol. 21 N° 1, INOCAR, Guayaquil.
- Xu, H. (2006). *Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery*. Fuzhou University, College of Environment and Resources. Fuzhou, China: International Journal of Remote Sensing.
- Yáñez, A., Twilley, R., & Lara, A. (1998). *Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global*. Madera y Bosques. doi:10.21829/myb.1998.421356

APÉNDICES

APÉNDICE A

Listado de imágenes objeto de análisis

| | | |
|---|--|--|
| ID | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/2 0181226T155219_20181226T155218_T 17MNT | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED /20181228T153611_20181228T15375 3_T17MNT |
| Fecha | 26/12/2018 | 28/12/2018 |
| Satélite | Sentinel-2B | Sentinel-2A |
| Colección | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C |
| Hora de captura local | 10:53:00 | 10:43:00 |
| Proyección | WGS 84 | WGS 84 |
| Bandas | 23 | 23 |
| Escala | 0.0001 | 0.0001 |
| Tamaño de píxeles (m) | 10, 20, 60 | 10, 20, 60 |
| Cloudy pixel porcentaje (%) | 38.575981 | 18.019384 |
| Porcentaje de sombra (%) | 0.613387 | 1.781463 |
| Porcentaje de píxeles sin data (%) | 0.613054 | 87.024117 |
| Estado de marea | Reflujo | Reflujo |
| Altura | 2.212 | 2.922 |
| Fecha Luna Llena | 22/12/2018 | 22/12/2018 |
| Fecha Luna Nueva | 7/12/2018 | 7/12/2018 |
| Temporada | LLUVIOSA | LLUVIOSA |

| | | |
|-----------------|--|--|
| ID | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/2 0190321T155221_20190321T155219_T1 7MNT | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZE D/20190820T153629_20190820T154 239_T17MNT |
| Fecha | 21/03/2019 | 20/08/2019 |
| Satélite | Sentinel-2A | Sentinel-2B |

| | | |
|---|---|---|
| Colección | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C |
| Hora de captura local | 10:53:00 | 10:44:00 |
| Proyección | WGS 84 | WGS 84 |
| Bandas | 23 | 23 |
| Escala | 0.0001 | 0.0001 |
| Tamaño de píxeles (m) | 10, 20, 60 | 10, 20, 60 |
| Cloudy pixel porcentaje (%) | 59.563923 | 0.415338 |
| Porcentaje de sombra (%) | 0.415685 | 0.191349 |
| Porcentaje de píxeles sin data (%) | 0.46677 | 86.927968 |
| Estado de marea | 0.78 | No data |
| Altura | Reflujo | No data |
| Fecha Luna Llena | 21/03/2019 | 15/08/2019 |
| Fecha Luna Nueva | 6/03/2019 | 1/08/2019 |
| Temporada | LLUVIOSA | SECA |

| | | |
|------------------------------------|--|--|
| ID | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200110T155219_20200110T155216_T17MNT | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200802T155231_20200802T155346_T17MNT |
| Fecha | 10/1/2020 | 2/8/2020 |
| Satélite | Sentinel-2B | Sentinel-2A |
| Colección | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C |
| Hora de captura local | 10:53:00 | 10:53:00 |
| Proyección | WGS 84 | WGS 84 |
| Bandas | 23 | 23 |
| Escala | 0.0001 | 0.0001 |
| Tamaño de píxeles (m) | 10, 20, 60 | 10, 20, 60 |
| Cloudy pixel porcentaje (%) | 25.14039 | 47.264474 |

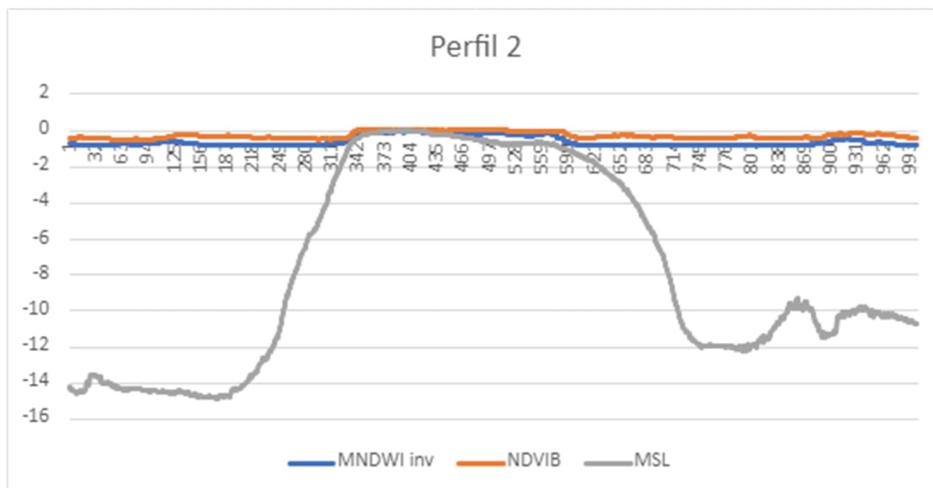
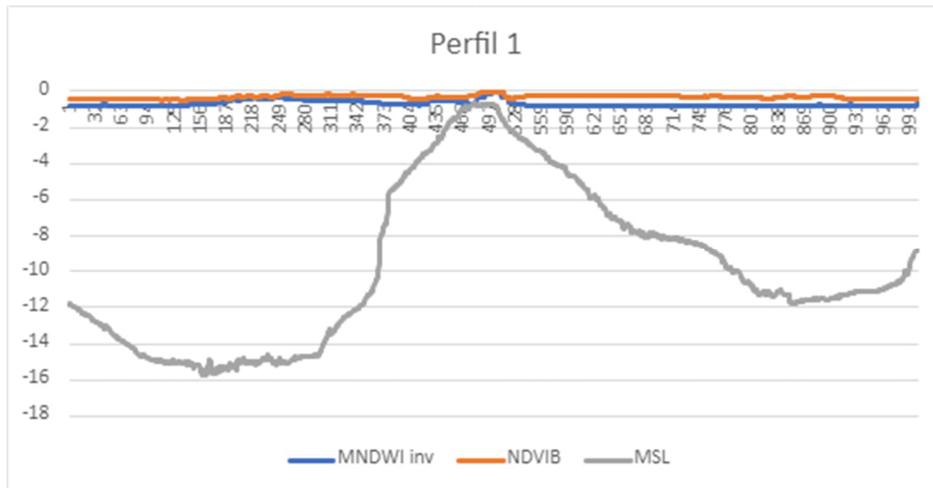
| | | |
|---|------------|------------|
| Porcentaje de sombra (%) | 1.18854 | 0.083693 |
| Porcentaje de pixeles sin data (%) | 0.367723 | 3.124008 |
| Estado de marea | Reflujo | Flujo |
| Altura | 0.4 | 0.509 |
| Fecha Luna Llena | 10/1/2020 | 3/8/2020 |
| Fecha Luna Nueva | 24/01/2020 | 18/08/2020 |
| Temporada | LLUVIOSA | SECA |

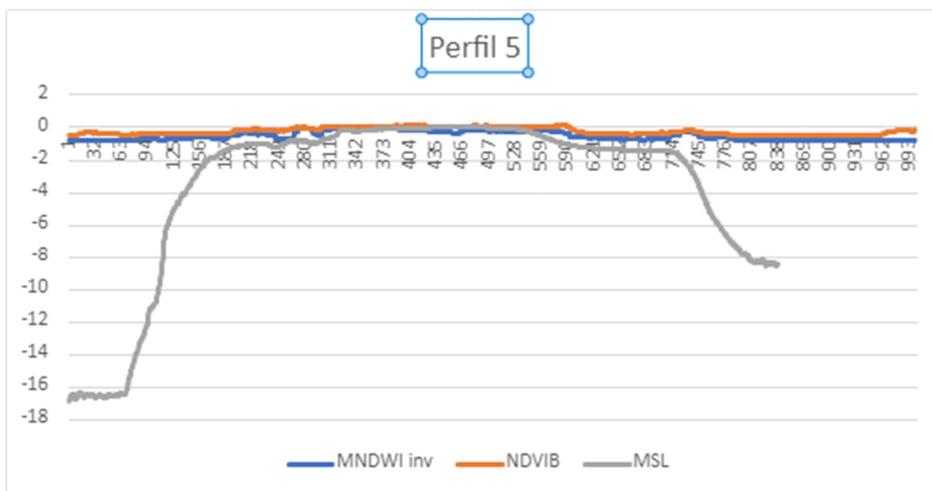
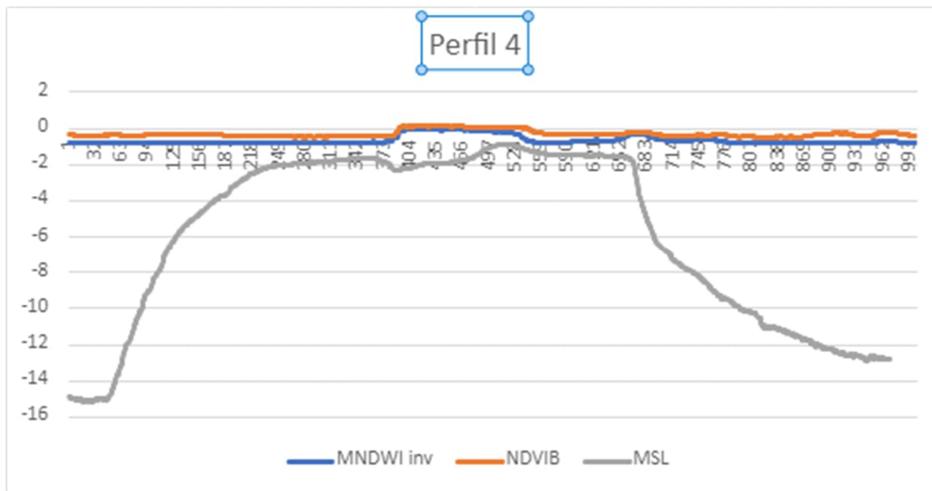
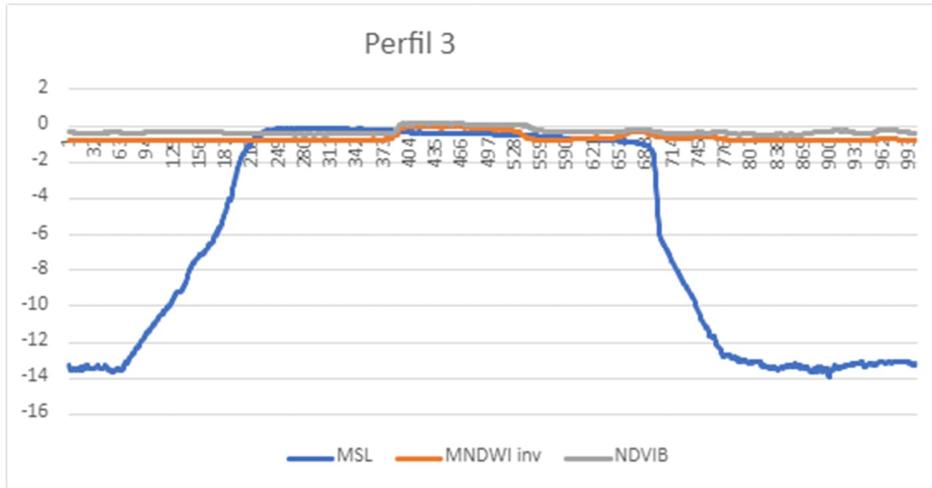
| | | |
|---|--|--|
| ID | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210424T155219_20210424T155216_T17MNT | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20211120T155219_20211120T155218_T17MNT |
| Fecha | 4/24/2021 | 11/20/2021 |
| Satélite | Sentinel 2B | Sentinel 2B |
| Colección | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C |
| Hora de captura local | 10:53:47 | 10:53:50 |
| Proyección | WGS 84 | WGS 84 |
| Bandas | 23 | 23 |
| Escala | 0.0001 | 0.0001 |
| Tamaño de pixeles (m) | 10, 20, 60 | 10, 20, 60 |
| Cloudy pixel porcentaje (%) | 30.56 | 31.99 |
| Porcentaje de sombra (%) | 0.66 | 1.31 |
| Porcentaje de pixeles sin data (%) | 0.32 | 0.56 |
| Estado de marea | Subiendo | Reflujo |
| Altura | 0.944 | 0.54 |
| Fecha Luna Llena | 4/26/2021 | 11/19/2021 |
| Fecha Luna Nueva | 4/11/2021 | 11/4/2021 |
| Temporada | LLUVIOSA | SECA |

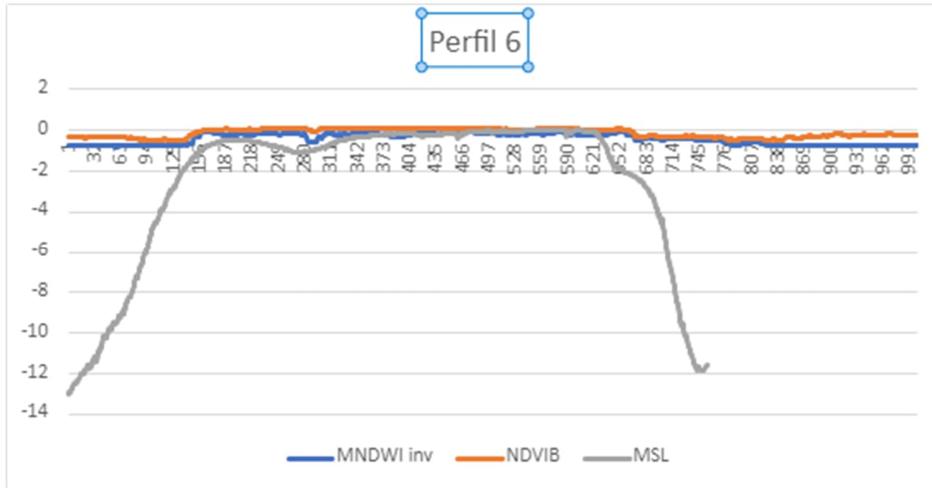
| | | |
|---|--|--|
| ID | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20220416T153619_20220416T153615_T17MNT | COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20220615T153619_20220615T154006_T17MNT |
| Fecha | 16/04/2022 | 15/06/2022 |
| Satélite | Sentinel-2B | Sentinel-2B |
| Colección | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C | Copernicus Harmonized Sentinel-2, Level 1-C |
| Hora de captura local | 10:43:00 AM | 10:44:00 AM |
| Proyección | WGS 84 | WGS 84 |
| Bandas | 23 | 23 |
| Escala | 0.0001 | 0.0001 |
| Tamaño de pixeles (m) | 10, 20, 60 | 10, 20, 60 |
| Cloudy pixel porcentaje (%) | 18.228349 | 33.087018 |
| Porcentaje de sombra (%) | 0.11689 | 3.4442 |
| Porcentaje de pixeles sin data (%) | 87.454188 | 85.832286 |
| Estado de marea | Reflujo | Reflujo |
| Altura | 0.7 | 1.291 |
| Fecha Luna Llena | 16/4/2022 | 14/06/2022 |
| Fecha Luna Nueva | 1/4/2022 | 28/06/2022 |
| Temporada | LLUVIOSA | SECA |

APÉNDICE B

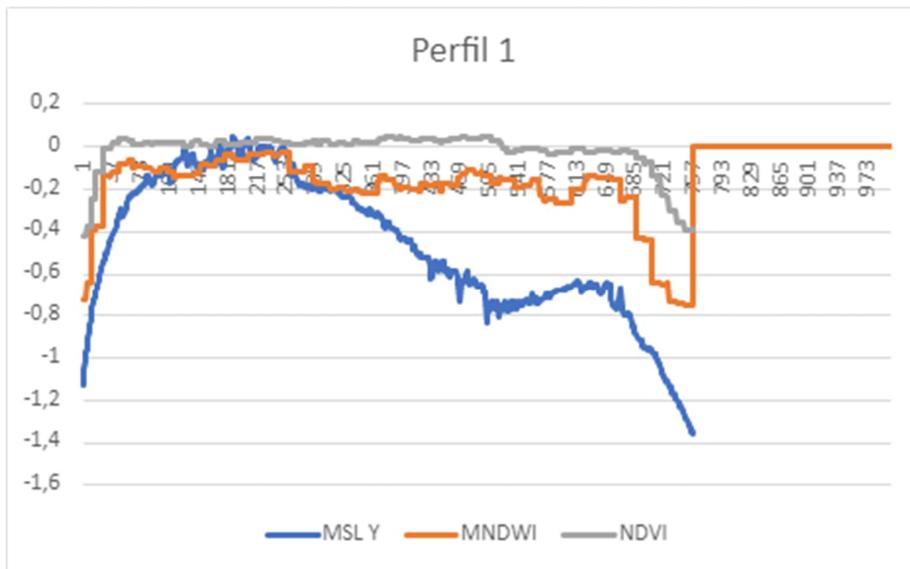
Cortes transversales indicados en la Figura 2.6 a lo largo del sistema. Índices MNDWI y NDVI vs Batimetría 2021.

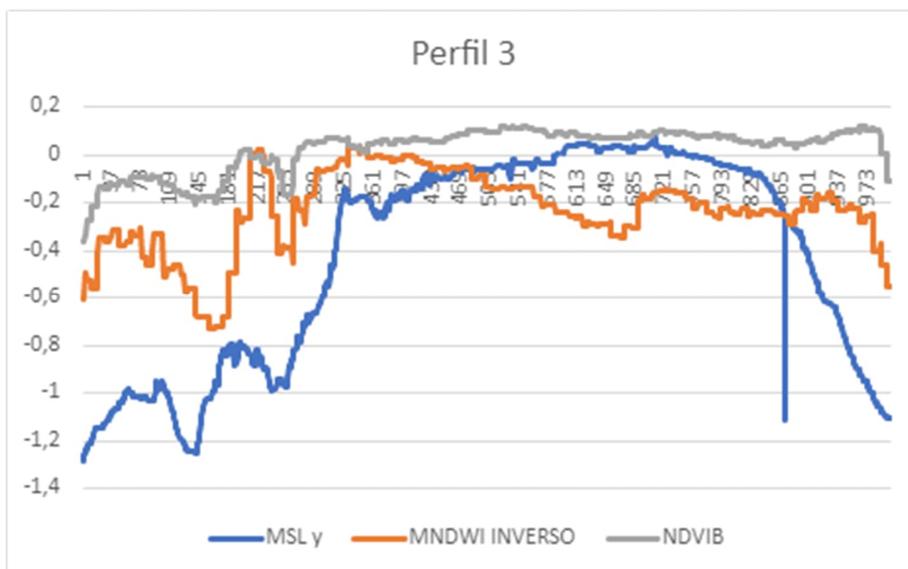
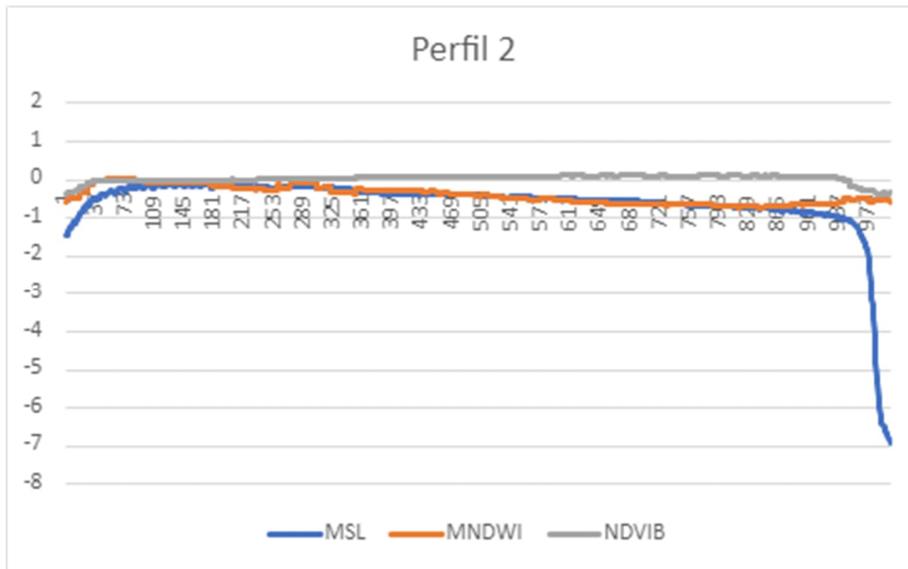






Cortes transversales respecto a la figura 2.7. Índices MDNWI y NDVI vs Batimetría 2021.





APÉNDICE C

Script para selección de imágenes satelitales a utilizar en el desarrollo de los índices espectrales.

```
// Llamamos a la colección de imágenes y filtramos fechas de análisis
var S2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
    .filterDate('2021-01-01', '2021-12-31')
    .filterBounds (geometry)
    .filterMetadata ('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 100)

print("Numero de imagenes = ", S2.size());

print(S2);
```

Script para visualización de Meta data y cálculo de índices espectrales para Sentinel-2 en GEE.

```
var geometry = ee.Geometry.Polygon(
    [[[-80.2882701933628,-2.7133639880752765],
    [-80.0300914824253,-2.7133639880752765],
    [-80.0300914824253,-2.4993523326577303],
    [-80.2882701933628,-2.4993523326577303],
    [-80.2882701933628,-2.7133639880752765]]], null, false);

var table = ee.FeatureCollection("users/andraczg96/2021");
```

```

var bajo =
ee.Image("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20211120T155219_20211120T155218_
T17MNT")

print('All metadata', bajo)

var properties = bajo.propertyNames()
print('Metadata properties:', properties)

var bandNames = bajo.bandNames()
print ('Band names', bandNames)

var b3scale = bajo.select('B3').projection().nominalScale()
print('band 3 scale:', b3scale)

var b3proj = bajo.select('B3').projection()
print('band 3 projection:', b3proj)

var b4scale = bajo.select('B4').projection().nominalScale()
print('band 4 scale:', b4scale)

var b4proj = bajo.select('B4').projection()
print('band 4 projection:', b4proj)

var b8scale = bajo.select('B8').projection().nominalScale()
print('band 8 scale:', b8scale)

var b8proj = bajo.select('B8').projection()
print('band 8 projection:', b8proj)

```

```
var b11scale = bajo.select('B11').projection().nominalScale()
print('band 11 scale:', b11scale)
var b11proj = bajo.select('B11').projection()
print('band 11 projection:', b11proj)
```

```
var cloudiness = bajo.get('CLOUD_COVER')
print('CLOUD_COVER',cloudiness)
```

```
var version = bajo.get('system:version')
print('Version:', version)
print('Version (as ingestion data)',
      ee.Date(ee.Number(version). divide(1000)))
```

```
print('Timestamp:', ee.Date(bajo.get('system:time_start')))
```

```
var ndvi= bajo.expression('float (NIR-Red) / float (NIR+Red)', {
  'NIR': bajo.select('B8'),
  'Red': bajo.select('B4')});
```

```
var mndwi = bajo.expression('float (Green-SWIR) / float (Green+SWIR)', {
  'Green': bajo.select('B3'),
  'SWIR': bajo.select('B11')});
```

```
var lswi = bajo.expression('float (NIR-SWIR1) / float (NIR+SWIR1)', {  
  'NIR': bajo.select('B8'),  
  'SWIR1': bajo.select('B11')});
```

```
var wri = bajo.expression('float (Green-Red) / float (NIR+SWIR)', {  
  'Green : bajo.select('B3'),  
  'Red': bajo.select('B4'),  
  'NIR': bajo.select('B8'),  
  'SWIR': bajo.select('B11')});
```

```
var ndwi = bajo.expression('float (Green-NIR) / float (Green+NIR)', {  
  'Green': bajo.select('B3'),  
  'NIR': bajo.select('B8')});
```

```
//ADD TO MAP
```

```
Map.centerObject(geometry);
```

```
Map.addLayer(ndvi,{min:-0.5, max:1, palette:['#0000ff', 'DF923D', 'F1B555',  
  'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401',  
  '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301']},'ndvi')
```

```
Map.addLayer(mndwi,{min:-0.5, max:1, palette:['#1fa6e8', 'DF923D', 'F1B555',  
  'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401',  
  '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301','#A65240']},'mndwi')
```

```

Map.addLayer(lswi,{min:-0.5, max:1, palette:['#0000ff', 'DF923D', 'F1B555',
      'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401',
      '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301', '#A65240']}, 'lswi')
Map.addLayer(wri,{min:-0.5, max:1, palette:['#0000ff', 'DF923D', 'F1B555',
      'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401',
      '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301', '#A65240']}, 'wri')
Map.addLayer(ndwi,{min:-0.5, max:1, palette:['#0000ff', 'DF923D', 'F1B555',
      'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401',
      '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301']}, 'ndwi')
Map.addLayer (bajo, {
  min: 0.0,
  max: 4000.0,
  gamma: 1,
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'], 'bajo');
Map.addLayer (table)
var bajoRGB = bajo.toUint16()
Export.image.toDrive({
  image: bajoRGB,
  description:'NOVEMBER_BAJO',
  scale: 10,
  region: geometry});
Export.image.toDrive({
  image: lswi,

```

```
description:'LSWINOVIEMBRE',  
scale: 10,  
region: geometry});  
Export.image.toDrive({  
image: ndvi,  
description:'NDVINOVIEMBRE',  
scale: 10,  
region: geometry});
```

```
Export.image.toDrive({  
image: wri,  
description:'WRINOVIEMBRE',  
scale: 10,  
region: geometry});
```

```
Export.image.toDrive({  
image: ndwi,  
description:'NDWINOVIEMBRE',  
scale: 10,  
region: geometry});
```

```
Export.image.toDrive({  
image: mndwi,  
description:'MNDWINOVIEMBRE',
```

scale: 10,

region: geometry}};