



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Detección de la Línea de  
Costa por medio de  
Imágenes Satelitales y  
Fotogrametría con Dron**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geomático**

**P R E S E N T A**

Elías David González López

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Francisco Javier Flores de Santiago



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025**



## Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a mi madre Rosa Angelica López Gutiérrez (QEPD) por todas las enseñanzas que me aportó durante su vida, por su amor incondicional y por haber estado siempre presente para mí, a mi abuela Celedonia Morales ya que pese a todas las dificultades siempre encontró una forma de ayudarme a salir adelante, darme todo su cariño y su apoyo incondicional y por haber sido una segunda madre para mí estando siempre en las buenas y en las malas y a mi hermana Itzel Montserrat González López por todo su cariño y su apoyo.

Quiero agradecer también, por parte de mi familia materna, a mis tías Edith López, Adriana López y Cecilia López que estuvieron a mi lado durante todo el proceso que fueron mis estudios universitarios aportando cada una su grano de arena, sin olvidar mencionar a mis tíos Carlos y Noé López que siempre procuraron por mí y por mi bienestar. Por parte de mi familia paterna quiero agradecer a todos mis abuelos, abuelas, tíos, principalmente a mi abuela Olga Guerrero que fue un apoyo fundamental para mis logros y a mis tíos Roberto González quien siempre me mostro su cariño y respeto apoyándome ininidad de veces en todo este trayecto, así como a mi tío Rodrigo González por siempre haber creído en mí.

Agradezco también a todos los que fueron mis profesores durante mi formación académica y al Dr. Francisco Javier Flores de Santiago por haber compartido su conocimiento, y haber despertado en mi esa llama de interés por lo que parecía muy lejano, agradezco sus críticas, sus regaños y sus felicitaciones ya que, sin eso, no habría logrado nada de lo que hoy soy y espero ser.

El camino no es sencillo, pero hay amigos que lo hacen más ameno, y por eso quiero agradecer a aquellos que fueron parte de mi día a día dentro de la facultad y fuera de ella, especialmente a Moisés Ibarra, Diego Prado, Samuel Carrada y Osvaldo Solano por su apoyo durante mi estadía dentro de la facultad. También quiero hacer un especial agradecimiento al Ing. Emmanuel Mejía, al Lic. Marco San Agustín y al Lic. Emilio Gálvez quienes desde un principio fueron un gran soporte durante la mayor parte de mi vida académica. De igual manera quiero agradecer a los ingenieros Pablo Orozco, Alfredo Villaseñor y al Lic. Kevin Martínez quienes demostraron que podía contar con ellos de manera incondicional.

Y por último quiero agradecerme a mí, por creer, por caer y levantarme, por esforzarme y nunca darme por vencido, por ser una persona con errores y aciertos y mostrarme fuerte ante cualquier adversidad, me agradezco simplemente por siempre ser yo.

El trabajo de campo se realizó gracias a los apoyos de los proyectos **PAPIIT-IA100521** y **PAPIIT IN226724** (*Caracterización multidecadal del bosque de manglar en Marismas Nacionales, Sinaloa-Nayarit: estrategias para priorizar recursos federales*).

# Contenido

## INDICE

Índice de ilustraciones.....	4
Índice de Tablas.....	5
RESUMEN .....	6
1. Introducción .....	7
2. Antecedentes .....	8
2.2. Línea de Costa .....	8
2.2. VANT (Vehículo Aéreo no Tripulado) .....	9
2.3. Sensores de los VANT .....	10
2.4. Google Earth (GeoEye, WorldView).....	11
2.5. Misiones Satelitales .....	11
2.5.1. Landsat 8 .....	12
2.5.2. MODIS (MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER).....	12
2.5.3. PlanetScope .....	13
2.5.4. Rapid-Eye.....	14
2.5.5. Sentinel-2.....	15
2.6. Índices Normalizados.....	16
3. ZONA DE ESTUDIO.....	17
3.1 Ubicación Geográfica .....	17
3.2 Características Físicas.....	17
4. OBJETIVOS .....	19
4.1. Objetivo General.....	19
5..2. Objetivo Especifico .....	19
5. HIPÓTESIS.....	19
6. JUSTIFICACIÓN.....	19
7. MATERIALES Y METODO .....	20
6.1. Materiales .....	20
6.1.1. Dron Phantom-4 ADVANCED.....	20
6.1.2. Misiones Satelitales.....	21
6.1.3. Descarga de Imágenes de los diferentes sensores.....	22
6.1.4. ArcMap (Software de procesamiento) .....	22
6.1.5. Índice NDWI.....	23

6.1.6.	Sistema de Análisis de Cambio de la Línea de Costa (DSAS) .....	24
6.2.	Método .....	25
6.2.1.	Procesamiento de Imágenes .....	25
6.2.2.	Vectorización .....	26
6.2.3.	Análisis de Costa .....	27
7.	RESULTADOS .....	28
8.	CONCLUSIONES .....	34
9.	REFERENCIAS .....	36
10.	Anexos .....	38
	Proceso de vectorización de píxeles .....	38
	Análisis de Costa mediante DSAS .....	38
	Elaboración de Transctos .....	47

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Línea de Costa .....	8
Ilustración 2 NDI .....	16
Ilustración 3 Mapa de Ubicación de la Isla de la Piedra al sur de Mazatlán. ....	17
Ilustración 4 Visualización DSAS.....	27
Ilustración 5 Relación Google Earth .....	28
Ilustración 6 Relación Landsat-8 .....	29
Ilustración 7 Relación MODIS.....	30
Ilustración 8 Relación PlanetScope .....	31
Ilustración 9 Relación RapidEye .....	32
Ilustración 10 Relación Sentinel-2.....	33
Ilustración 11 Vectorización .....	38
Ilustración 12 Datos Agregados.....	39
Ilustración 13 Elaboración de Base de Datos contenedora de la información .....	40
Ilustración 14 Creación de Clases a utilizar en DSAS.....	41
Ilustración 15 Nomenclatura de Clase .....	42
Ilustración 16 Georeferenciación de las clases elaboradas .....	42
Ilustración 17 Tolerancia .....	43
Ilustración 18 Campos básicos de las clases creadas .....	43
Ilustración 19 Campos agregados con DSAS - Shoreline Attribute Automator.....	44
Ilustración 20 Selección de capa para edición Marea Media (Dron) .....	45
Ilustración 21 Selección de capa para edición (Satélite).....	46
Ilustración 22 Tabla de contenido capa Marea Media (Dron) .....	46
Ilustración 23 Tabla de Contenido Satélite .....	47
Ilustración 24 Selección de parámetros base (Marea Media) y Orientación de la línea base .....	47
Ilustración 25 Selección de atributos de las líneas Satelitales .....	48
Ilustración 26 Tabla de Transectos y Visualización .....	49

## Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de los VANT de acuerdo con el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) .....	9
Tabla 2. Especificaciones de los datos ópticos de teledetección recogidos para el lugar del estudio. ....	21
Tabla 3. Bandas Green/NIR por satélite utilizadas.....	24
Tabla 4 Media de Errores por Sensor .....	33

## RESUMEN

La identificación instantánea de la línea de costa mediante datos satelitales plantea un reto debido a diversos factores, como la geomorfología de la costa y la selección del sensor satelital adecuado con su resolución espacial inherente. Aun así, la identificación de la línea de costa mediante datos de teledetección tiene un inmenso potencial para proporcionar información fiable y oportuna sobre el entorno costero. El objetivo de esta tesis consistió en evaluar, si existen diferencias espaciales en la línea de costa obtenida mediante diferentes sensores remotos satelitales y un vuelo fotogramétrico. Se utilizó el índice de agua NDWI con una vectorización por píxeles para obtener la línea de costa de seis satélites diferentes, con datos obtenidos a la fecha más cercana al vuelo de un dron. Las imágenes utilizadas fueron de los satélites MODIS Terra, LANDSAT 8, SENTINEL-2, RapideEye, PlanetScope así como las imágenes disponibles en Google Earth (Worldview-2). Posteriormente se compararon con una línea de costa base obtenida a partir de un vuelo fotogramétrico con dron durante marea media, se utilizó el programa ArcMap para la visualización de datos y finalmente DSAS para la obtención de los transectos y el cálculo del error medio. Los resultados indican que las imágenes que más se relacionan con el vuelo fotogramétrico fueron las de Google Earth (WorldView-2), con un error de estimación de la línea de costa de 6.7 m, mientras que el sensor con mayor error fue el de MODIS Terra con un error promedio de 451 m. Con base en lo mencionado, los resultados nos ayudaran en la elección del sensor con menor error para realizar un trabajo de medición de línea de costa utilizando técnicas de percepción remota reduciendo tiempos a la hora de seleccionar el sensor para el trabajo requerido.

## 1. Introducción

La costa es un entorno dinámico y complejo que experimenta constantes cambios como resultado de procesos naturales y antropogénicos. La comprensión de la dinámica costera es crucial para la gestión sostenible de los recursos costeros y la mitigación de los riesgos asociados con eventos extremos y el cambio climático. En este contexto, la Isla de la Piedra en Mazatlán, Sinaloa, emerge como un sitio de interés para el estudio de la dinámica costera debido a su importancia ecológica, su relevancia económica y su vulnerabilidad a la erosión y la degradación costera.

Numerosos estudios han destacado la necesidad de investigar la evolución de la línea de costa y los procesos que la influyen para comprender mejor los cambios a largo plazo y su impacto en los ecosistemas costeros y las comunidades humanas. Como señala Church (2006), "La comprensión de la dinámica costera es esencial para la planificación y el manejo efectivo de las zonas costeras, especialmente en un contexto de cambio climático y aumento del nivel del mar."

El uso de técnicas de teledetección, como el análisis de imágenes satelitales y el uso de sistemas de información geográfica (SIG), permite monitorizar y analizar los cambios en la línea de costa en el tiempo. Los métodos utilizados para la medición de la línea de costa incluyen técnicas topográficas, fotogrametría, y el uso de instrumentos como GPS y estaciones totales. Sin embargo, la exactitud de estas mediciones puede estar influida por factores como la resolución espacial de los datos, la exactitud del equipo utilizado y la interpretación propia.

En este sentido, el presente trabajo se enfoca en analizar la dinámica costera de la Isla de la Piedra en Mazatlán utilizando una combinación de técnicas de teledetección y análisis geoespacial. Esta investigación tiene como objetivo principal caracterizar los errores en las imágenes respecto a un vuelo de dron en campo.

Al abordar estos objetivos, se espera contribuir al conocimiento científico sobre la dinámica costera de la Isla de la Piedra y proporcionar información relevante para la toma de decisiones en la gestión ambiental y el desarrollo sostenible de las zonas costeras. El estudio exhaustivo de la dinámica costera es fundamental para la formulación de estrategias eficaces de adaptación y mitigación ante los peligros costeros, asegurando la preservación de los ecosistemas litorales y la seguridad de las comunidades costeras.

## 2. Antecedentes

### 2.2. Línea de Costa

La línea de costa, según la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (1982), se define como "la línea que une en un mapa o carta náutica los puntos más bajos de las mareas en las costas bajas y los puntos más altos de las mareas en las costas escarpadas, que se mantienen durante un período continuo de tiempo suficiente para que la observación de estas mareas pueda ser considerada como la expresión de las condiciones medias de la marea en esa región" (Artículo 11, párrafo 2).

Esta definición implica que la línea de costa no es estática, sino que puede variar debido a los cambios en las mareas, la erosión costera, las deposiciones y otros procesos geomorfológicos. Es fundamental para la delimitación de las aguas territoriales y la zona económica exclusiva de un estado costero, así como para la gestión ambiental y la planificación costera.

La línea de costa se determina mediante estudios topográficos detallados y mediciones periódicas, utilizando tecnología de posicionamiento global (GPS), fotografías aéreas y datos batimétricos, con el fin de definir con exactitud los límites de la zona terrestre y la interfaz con el mar.

*Ilustración 1 Línea de Costa*



*Fuente Elaboración Propia, Isla de la Piedra, Mazatlán, Visualización espacial de ArcMap, 22/06/2024*

## 2.2. VANT (Vehículo Aéreo no Tripulado)

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), conocidos comúnmente como drones, son aeronaves que operan de forma autónoma o semiautónoma, sin la necesidad de un piloto a bordo. Estos dispositivos han revolucionado diversos campos, desde el ámbito militar hasta aplicaciones civiles como la fotografía aérea, la vigilancia y la entrega de paquetes.

Un dron se define como un vehículo aéreo no tripulado que puede operar de manera autónoma mediante sistemas de navegación y control integrados, o ser dirigido de forma remota por un operador humano utilizando tecnologías de comunicación inalámbrica.

Estos dispositivos son diseñados para ejecutar diversas funciones, desde misiones de observación y recolección de datos hasta operaciones de vigilancia y aplicación militar, sin la necesidad de contar con tripulación a bordo. Esta visión amplía el enfoque hacia la versatilidad de los drones como herramientas que van más allá del ámbito militar, destacando su utilidad en diversas aplicaciones comerciales y de investigación.

En el ámbito militar, los drones han transformado las estrategias de combate al proporcionar "capacidades mejoradas de vigilancia, reconocimiento y ataque sin exponer a las tripulaciones aéreas a riesgos potenciales" (Wilson, 2017). Esta capacidad de realizar misiones de manera remota y precisa ha redefinido las operaciones militares modernas, permitiendo una mayor flexibilidad y eficiencia táctica.

Desde una perspectiva civil, los drones han encontrado aplicaciones en fotografía aérea, mapeo topográfico, vigilancia, y aplicaciones dentro del ámbito estructural, agricultor y servicios de emergencia. Estos usos demuestran la versatilidad y la adaptabilidad de los drones en entornos no militares, donde su capacidad para acceder a áreas difíciles de alcanzar y proporcionar datos detallados se ha vuelto invaluable.

Los VANT se clasifican de acuerdo con su estructura de acuerdo con el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)

*Tabla 1 Clasificación de los VANT de acuerdo con el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)*

Ala Fija	Forma de aeroplano, velocidades altas y requiere el uso de catapultas para el despegue
Ala Rotatoria	Alto grado de maniobrabilidad, aterrizaje y despegue vertical, varían en el número de hélices
Dirigibles	Ligeros, pueden volar durante varias horas, viajan a baja velocidad
De Aleteo	Alas flexibles

La percepción remota y el análisis de costas son áreas donde los drones han demostrado ser herramientas extremadamente útiles.

1. **Monitoreo de Ecosistemas Costeros:** Los drones son utilizados para el monitoreo ambiental de ecosistemas costeros, los drones nos permiten evaluar la salud de los ecosistemas costeros mediante las imágenes de alta resolución obtenidas. Esto incluye la vigilancia de cambios en la línea costera, la erosión, y la calidad del agua.
2. **Estudios de Biodiversidad Marina:** Según un estudio de Gail Schofield, "los drones son cruciales para realizar estudios de biodiversidad marina en áreas costeras inaccesibles desde tierra o por barco" (Schofield, 2018). Estos dispositivos permiten capturar imágenes detalladas de hábitats marinos, identificar especies y monitorear patrones de migración.
3. **Vigilancia de Infraestructuras y Amenazas Naturales:** Los drones son utilizados para la inspección de infraestructura costera ya que proporcionan información precisa y en tiempo real, de esta forma es posible prevenir daños y prepararse ante amenazas naturales

### 2.3. Sensores de los VANT

Los sensores utilizados en los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) son fundamentales para una amplia gama de aplicaciones, proporcionando capacidades de percepción remota precisas y detalladas. Aquí te proporciono información sobre algunos tipos comunes de sensores utilizados en drones, respaldada con citas textuales:

1. **Cámaras Multiespectrales:** Las cámaras multiespectrales instaladas en drones posibilitan la captura de imágenes en múltiples rangos espectrales, ofreciendo datos precisos sobre la salud de los cultivos y la vegetación. Este tipo de sensores es crucial para aplicaciones agrícolas y de monitoreo ambiental, donde se requiere el análisis de la salud de los cultivos y la detección temprana de enfermedades.
2. **LIDAR (Light Detection and Ranging):** El LIDAR montado en drones permite crear modelos detallados en 3D del terreno y estructuras, útiles para cartografía, planificación urbana y gestión forestal. Este sensor utiliza pulsos láser para medir distancias con precisión y obtener datos detallados de la superficie terrestre.
3. **Cámaras Termográficas:** Las cámaras termográficas integradas en drones posibilitan la identificación y seguimiento de variaciones térmicas anómalas en infraestructuras, redes de energía y zonas industriales, contribuyendo a optimizar la efectividad operativa y fortalecer los estándares de seguridad. Este tipo de sensor es esencial para aplicaciones de inspección y mantenimiento en infraestructuras críticas.
4. **Sensores de Video de Alta Resolución:** Los sensores de vídeo de alta resolución instalados en drones se emplean para la vigilancia y seguridad, ofreciendo imágenes nítidas y minuciosas desde altitudes elevadas, con aplicaciones en la ejecución de la ley y la seguridad pública. Estos sensores permiten la captura de imágenes de alta calidad que pueden utilizarse para la vigilancia en tiempo real y la recolección de evidencia.

#### 2.4. Google Earth (GeoEye, WorldView)

Google Earth es una plataforma desarrollada por Google que permite a los usuarios visualizar imágenes tridimensionales del globo terráqueo. Esta herramienta combina fotografías satelitales, datos geoespaciales y modelos tridimensionales para ofrecer una representación detallada de la superficie terrestre. Para proporcionar imágenes de alta resolución, Google Earth se nutre de diversas fuentes, entre las cuales destacan los satélites GeoEye-1 y la serie WorldView, operados por la empresa DigitalGlobe (ahora parte de Maxar Technologies).

El satélite GeoEye-1 fue lanzado el 6 de septiembre de 2008 y cuenta con una resolución pancromática de 41 centímetros (cm), lo que le permite capturar imágenes en blanco y negro con un nivel de detalle excepcional. Además, posee una resolución multiespectral de 1.65 metros (m), lo que le permite obtener información en varias bandas del espectro electromagnético, facilitando estudios sobre uso del suelo, vegetación y cuerpos de agua. La altitud orbital de GeoEye-1 es de 681 kilómetros (km), y su tiempo de revisita varía entre 1.7 días para una resolución de 1 m y 4.6 días cuando se captura con un ángulo de visión de 25° (0.59 m de resolución).

La serie WorldView está compuesta por varios satélites diseñados para la captura de imágenes de alta resolución. WorldView-1, lanzado el 18 de septiembre de 2007, es un satélite exclusivamente pancromático con una resolución de 50 cm y un tiempo de revisita de 1.7 días.

WorldView-2, lanzado el 8 de octubre de 2009, mejoró la capacidad de observación al incorporar una resolución pancromática de 46 cm y una resolución multiespectral de 1.85 m, con ocho bandas espectrales adicionales para mejorar la detección de características del terreno. Su altitud orbital es de 770 km y su tiempo de revisita es de aproximadamente 1.1 días.

El satélite más avanzado de la serie, WorldView-3, fue lanzado el 13 de agosto de 2014 y ofrece la mejor resolución disponible en el mercado comercial, con imágenes pancromáticas de 31 cm y multiespectrales de 1.24 m. Su altitud orbital es de 617 km, y su tiempo de revisita promedio es de 1 día, lo que permite monitorear cambios en la superficie terrestre con una alta tasa de actualización. Una de sus características más innovadoras es la incorporación de un sensor de infrarrojo de onda corta (SWIR).

#### 2.5. Misiones Satelitales

Una misión satelital del tipo sensorial se define como "un proyecto diseñado para adquirir datos y mediciones específicas utilizando sensores embarcados en un satélite artificial en órbita" (Smith et al., 2020, p. 45). Estas misiones están dirigidas a capturar información sobre algunos fenómenos tanto físicos, químicos o biológicos en la tierra y algunos otros cuerpos celestes mediante instrumentos de medición especializados. La operación eficiente de los sensores y la transmisión de datos son aspectos críticos para la obtención de resultados científicos y aplicaciones prácticas en diversos campos, incluyendo la meteorología, la cartografía, y la monitorización ambiental.

### 2.5.1. Landsat 8

La misión satelital LANDSAT 8 es parte del programa Landsat de la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Lanzado el 11 de febrero de 2013, LANDSAT 8 es el octavo satélite de la serie Landsat, que ha sido fundamental para la observación de la Tierra desde el espacio durante décadas. La principal misión de LANDSAT 8 es recopilar datos multiespectrales de la superficie terrestre, proporcionando imágenes detalladas que permiten monitorear cambios en la cobertura terrestre, realizar estudios ambientales, gestionar recursos naturales y apoyar la toma de decisiones en áreas como agricultura, silvicultura y planificación urbana. La constante recopilación de datos de LANDSAT 8 contribuye significativamente a la comprensión global de los cambios ambientales y sus impactos. Entre las características notables del satélite se encuentran sus sensores avanzados, como el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), que permiten la captura de imágenes en una amplia gama de longitudes de onda, desde el visible hasta el infrarrojo térmico. En el caso de Landsat-8, la resolución temporal se determina por el tiempo que tarda en completar una órbita alrededor de la Tierra y la frecuencia con la que pasa sobre una ubicación determinada.

Revisita cada 16 días: Landsat-8 completa una órbita alrededor de la Tierra aproximadamente cada 99 minutos. Esto significa que el satélite pasa sobre el mismo punto en la Tierra aproximadamente cada 16 días.

Órbita polar sun-synchronous: Landsat-8 sigue una órbita polar sun-synchronous, lo que significa que pasa sobre la Tierra a la misma hora local solar en cada órbita. Esta característica es crucial para mantener la consistencia en la iluminación solar en las imágenes capturadas.

Capacidad de programación de tomas: Los usuarios tienen la capacidad de programar tomas específicas a través de solicitudes de observación a la USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos). Esto permite la captura de imágenes en momentos específicos o en respuesta a eventos naturales o cambios en la cobertura terrestre.

Posibilidad de adquisición acelerada: En algunas regiones del mundo, la capacidad de adquisición de imágenes se ha mejorado, lo que significa que Landsat-8 puede proporcionar imágenes con mayor frecuencia en áreas de interés específicas.

La resolución temporal de Landsat-8, combinada con su resolución espacial y espectral, hace que este satélite sea valioso para una variedad de aplicaciones, como el monitoreo de cambios en el uso del suelo, la detección de eventos naturales y la gestión de recursos naturales. El preprocesamiento de imágenes de Landsat-8 es una etapa crucial para mejorar la calidad y utilidad de los datos antes de realizar análisis o aplicar algoritmos de procesamiento de imágenes. Algunas de las tareas comunes en el preprocesamiento de imágenes de Landsat-8 incluyen:

### 2.5.2. MODIS (MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER)

Las misiones satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) han sido fundamentales en la observación de la Tierra desde el espacio, proporcionando datos

cruciales para una amplia gama de investigaciones científicas y aplicaciones en áreas como la meteorología, la climatología, la monitorización ambiental y la gestión de recursos naturales. Desarrolladas por la NASA en colaboración con otras instituciones, estas misiones han revolucionado nuestra capacidad para obtener información precisa y global sobre la superficie terrestre y atmosférica.

VIEWING WUATH WIDTH (anchura de barrido) 2,330 Km y cubre toda la superficie terrestre cada 2 días, cuenta con detectores en 36 bandas que miden entre 0.405 y 14.385 micrómetros y estos obtienen 3 resoluciones espaciales, 250m, 500m y 1000m.

Resolución Espacial: MODIS tiene diferentes bandas con diferentes resoluciones espaciales. Por ejemplo, la resolución espacial de las bandas espectrales visibles es de 250 metros, 500 metros y 1 kilómetro.

Cobertura Espectral: MODIS cubre un amplio rango espectral que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo térmico. Puede proporcionar información sobre la reflectancia de la superficie terrestre, la temperatura de la superficie del mar, la cobertura de nubes, entre otros.

Frecuencia de Observación: MODIS realiza observaciones diarias de la Tierra, lo que permite obtener datos a lo largo del tiempo y evaluar cambios a lo largo de las estaciones y años.

Aplicaciones: MODIS se utiliza en una variedad de aplicaciones, como monitoreo climático, estudios de cambio climático, detección de incendios, seguimiento de fenómenos atmosféricos, y más.

Productos de Datos: MODIS genera una amplia gama de productos de datos, incluyendo imágenes, índices de vegetación, productos atmosféricos, productos de océanos, etc.

Estas bandas permiten observar varias características del océano, incluyendo la temperatura superficial del mar, la presencia de fitoplancton (clorofila), y otras propiedades del agua y la atmósfera que son cruciales para estudios oceanográficos y climatológicos.

### 2.5.3. PlanetScope

La misión satelital PlanetScope es una iniciativa liderada por la empresa Planet, anteriormente conocida como Planet Labs. PlanetScope es parte de la constelación de CubeSats de Planet, que se compone de pequeños satélites diseñados para capturar imágenes de la Tierra con una alta frecuencia y resolución. Aquí hay información sobre la misión PlanetScope y algunas fuentes que podrías explorar para obtener más detalles:

Características Principales:

Constelación de CubeSats: PlanetScope utiliza pequeños satélites CubeSat, que son dispositivos compactos y modulares. Estos satélites operan juntos para dar cobertura global y alta frecuencia de revisita.

La resolución temporal de PlanetScope, la constelación de microsátélites de Planet Labs, es notable por su capacidad de visitar una ubicación específica con alta frecuencia. Hasta mi última actualización en enero de 2022, la resolución temporal de PlanetScop era de

aproximadamente un día. Esto significa que los satélites de la constelación podían capturar imágenes de la misma área al menos una vez al día. Esta alta resolución temporal es beneficiosa para aplicaciones que requieren un monitoreo frecuente de la superficie terrestre, como la gestión agrícola, la monitorización ambiental, la respuesta a desastres y otras áreas donde la detección de cambios rápidos es crucial.

#### 2.5.4. Rapid-Eye

La misión satelital RapidEye fue un proyecto desarrollado por la empresa alemana BlackBridge AG, con el objetivo de proporcionar imágenes de alta resolución y multispectrales de la Tierra para diversos usos, incluyendo aplicaciones agrícolas, medioambientales y de monitorización de cambios en el paisaje. Aquí hay información detallada sobre la misión RapidEye:

**Lanzamiento y Constelación:** RapidEye fue lanzada el 29 de agosto de 2008 desde el cosmódromo de Baikonur en Kazajistán. La constelación estaba compuesta por cinco satélites idénticos, colocados en una órbita sincrónica al sol (SSO), lo que permitía obtener imágenes en una variedad de condiciones de iluminación y con una alta frecuencia de revisita.

**Características Técnicas:** Cada satélite estaba equipado con un sistema óptico avanzado que capturaba imágenes en cinco bandas espectrales: azul, verde, rojo, rojo lejano e infrarrojo cercano. Esto permitía una mejor discriminación de diferentes tipos de cobertura terrestre y proporcionaba información valiosa para aplicaciones agrícolas, forestales, y de gestión de recursos naturales.

**Resolución Espacial:** La resolución espacial de las imágenes de RapidEye era de aproximadamente 5 metros, lo que garantizaba la captura detallada de características en la superficie terrestre.

**Ciclo de Revisita Rápida:** La constelación de RapidEye tenía la capacidad de visitar un mismo lugar en la Tierra todos los días, lo que resultaba beneficioso para el monitoreo de cambios rápidos, como en aplicaciones agrícolas donde la frecuencia de revisita es crítica.

**Aplicaciones:** La misión RapidEye se diseñó principalmente para aplicaciones en agricultura de precisión, monitoreo del uso del suelo, gestión de recursos hídricos, y evaluación medioambiental. Su capacidad para proporcionar imágenes regularmente actualizadas permitía un seguimiento efectivo de cambios en el entorno terrestre.

**Cambio de Propiedad y Fin de la Misión:** En 2015, la empresa BlackBridge AG, propietaria de la constelación RapidEye, fue adquirida por Planet Labs, y, en consecuencia, los satélites fueron integrados a la constelación de CubeSats de Planet Labs. Esto marcó el fin de la misión como RapidEye y su transición hacia un nuevo capítulo bajo la administración de Planet Labs.

El preprocesamiento de las imágenes de RapidEye es una etapa crítica para garantizar la calidad y utilidad de los datos antes de realizar análisis específicos. Este proceso implica una serie de pasos que abordan diversas correcciones y mejoras para eliminar artefactos, ajustar la radiometría y preparar las imágenes para aplicaciones específicas. A

continuación, se describen los principales pasos de preprocesamiento típicos para las imágenes de RapidEye:

Unión de imágenes individuales para formar mosaicos que abarquen áreas más grandes. Esto facilita la visualización y el análisis de regiones extensas, así como la comparación entre diferentes fechas.

#### 2.5.5. Sentinel-2

Sentinel-2 es una serie de satélites de observación de la Tierra desarrollados por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa Copernicus, que es la iniciativa europea para el monitoreo ambiental y la gestión de recursos. Sentinel-2 consta de dos satélites idénticos, Sentinel-2A y Sentinel-2B, lanzados en 2015 y 2017, respectivamente. Estos satélites proporcionan datos de observación de la Tierra con una alta frecuencia de revisita y una resolución espacial excepcional, lo que los hace valiosos para diversas aplicaciones.

**Instrumentos a bordo:** Los satélites Sentinel-2 están equipados con el instrumento Multispectral Instrument (MSI), que consta de 13 bandas espectrales en el rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Esto permite captar imágenes de alta resolución espectral, fundamental para el monitoreo de la vegetación, cuerpos de agua, suelos y otros aspectos del medio ambiente.

**Resolución espacial:** Sentinel-2 ofrece diferentes niveles de resolución espacial, con una resolución de hasta 10 metros para algunas bandas espectrales. Esto proporciona imágenes detalladas y precisas que son útiles para una variedad de aplicaciones, incluyendo la agricultura, la gestión del agua y la detección de cambios en el uso del suelo.

**Frecuencia de revisita:** Debido a la combinación de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, se logra una alta frecuencia de revisita en cualquier ubicación de la Tierra. Esto permite realizar un seguimiento regular de cambios en el paisaje, la vegetación y otros fenómenos.

**Cobertura global:** La misión Sentinel-2 proporciona cobertura global, lo que significa que puede utilizarse para monitorizar una amplia variedad de entornos, desde áreas urbanas hasta regiones remotas y ecosistemas naturales.

**Aplicaciones:** Sentinel-2 es utilizado en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la monitorización de la agricultura (detección de cultivos, evaluación de la salud vegetal), gestión forestal, vigilancia de zonas costeras, seguimiento de desastres naturales, cartografía del uso del suelo y cambio climático.

**Datos abiertos y gratuitos:** Los datos recopilados por los satélites Sentinel-2 están disponibles de forma gratuita y son accesibles a través del programa Copernicus, permitiendo a investigadores, científicos y profesionales de todo el mundo utilizar esta valiosa información para sus estudios y aplicaciones.

**Composición de bandas:** Para facilitar ciertos tipos de análisis, se pueden crear imágenes compuestas que combinan varias bandas espectrales. Esto puede resaltar características específicas del paisaje, como la vegetación, el agua o el suelo desnudo.

**Formato de salida:** Finalmente, los datos preprocesados se organizan en formatos específicos, como GeoTIFF, que son comunes en aplicaciones de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG).

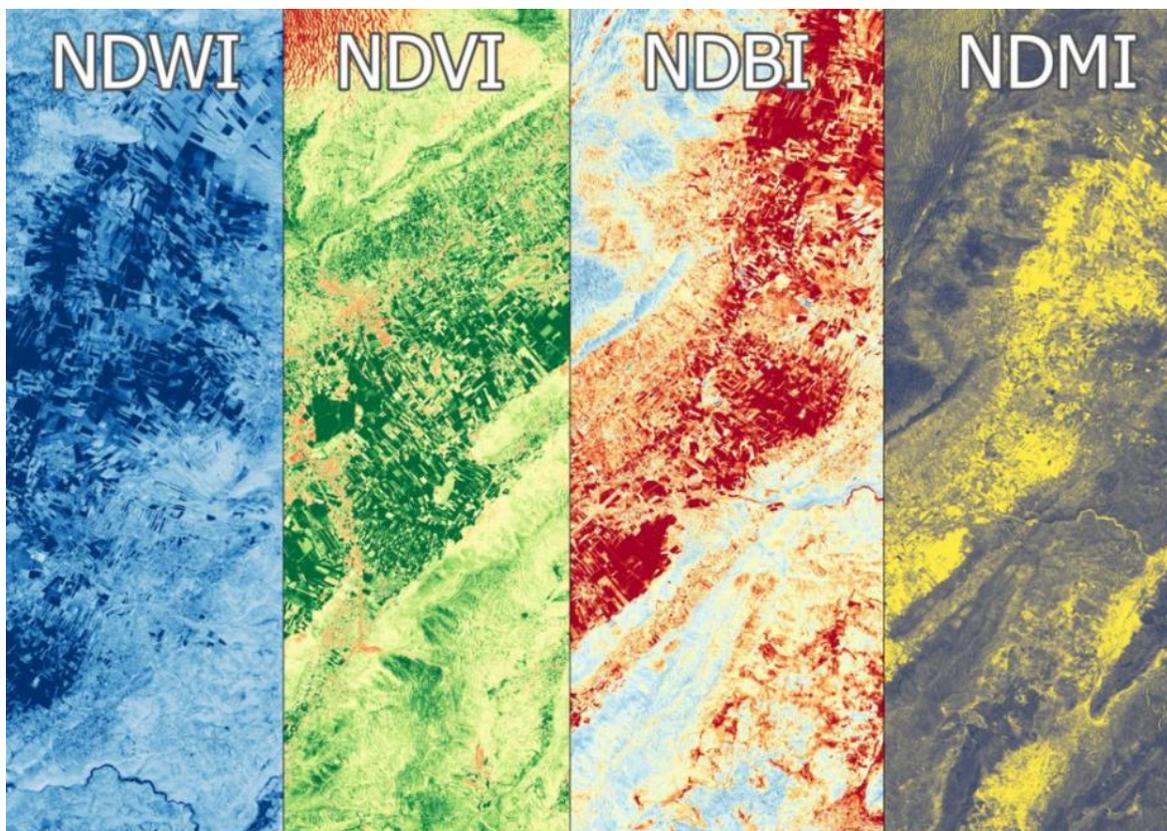
## 2.6. Índices Normalizados

Los NDI (Normalized Difference Indices) son índices utilizados en teledetección y estudios ambientales para cuantificar y comparar diferencias en la reflectancia de la luz en diferentes longitudes de onda. Estos índices normalizados permiten evaluar aspectos como la salud vegetal, la cobertura del suelo y la calidad del agua, proporcionando información clave para el monitoreo y la gestión de recursos naturales y agrícolas.

Según Thenkabail estos son: "relaciones matemáticas entre las bandas espectrales de una imagen multispectral que permiten mejorar la discriminación de características específicas del terreno, vegetación u otros objetos mediante la amplificación de las diferencias espectrales relevantes" (Thenkabail et al., 2000).

Estos índices se calculan típicamente utilizando combinaciones de bandas espectrales de imágenes satelitales, tales como el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) que utiliza la reflectancia en el infrarrojo cercano y el rojo, o el índice de agua normalizado (NDWI) que emplea bandas de absorción de agua y no agua en el infrarrojo cercano y el verde.

Ilustración 2 NDI



Fuente Tounsi, G. (2023, 12 septiembre). What is the difference between NDVI NDBI NDWI NDMI ? Gilles TOUNSI | Analyste Information Géospatiale - Geospatial Information Analyst. <https://www.limko.cm/gis-geomatics/2023/06/what-is-the-difference-between-ndvi-ndbi-n>

### 3. ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 Ubicación Geográfica

##### Isla de la Piedra, Mazatlán

Se trata de una extensa playa que se encuentra al sur del puerto de Mazatlán (cruzando el canal de navegación). La isla cuenta con varios kilómetros de playas vírgenes con algunas plantaciones de cocoteros. En cuestión turística al norte cuenta con varios restaurantes de comida típica de la zona con ambientes agradables.

Se localiza en la costa sur de Mazatlán, situada en el estado de Sinaloa, México. Geográficamente, se encuentra entre las coordenadas Latitud, 23°08'22.6515", Longitud, 106°20'25.5306."

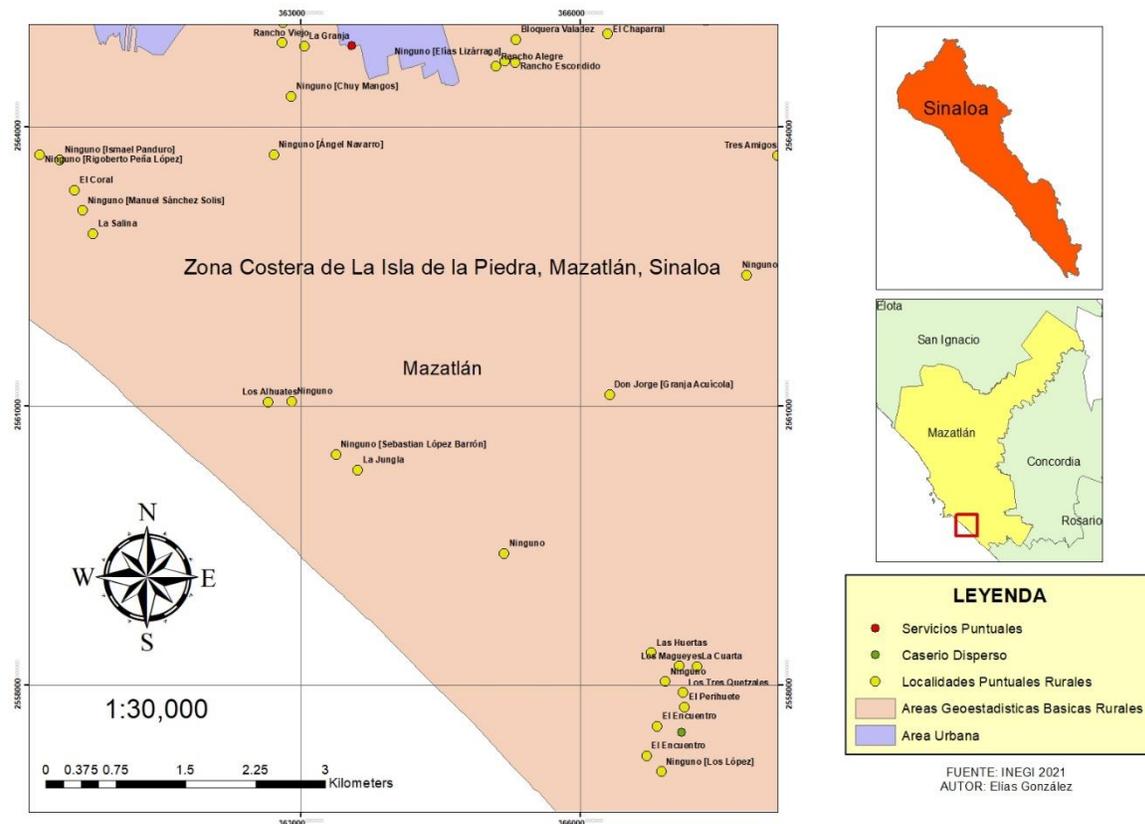


Ilustración 3 Mapa de Ubicación de la Isla de la Piedra al sur de Mazatlán.

#### 3.2 Características Físicas

La Isla de la Piedra, ubicada en el litoral del municipio de Mazatlán, Sinaloa, México, presenta características físico-ambientales propias de las regiones costeras del Pacífico mexicano. Geográficamente, se localiza en una zona de transición entre el océano Pacífico y el continente, lo que influye en sus condiciones climáticas, ecológicas y oceanográficas. El clima predominante es cálido semiárido, con una temperatura media anual que varía entre los 22°C y 30°C, y una precipitación media anual de aproximadamente 800 mm. Este

régimen pluviométrico se distribuye en dos estaciones claramente definidas: una seca, que se extiende de noviembre a mayo, caracterizada por una escasa precipitación y días mayormente soleados, y una lluviosa, que abarca de junio a octubre, durante la cual se concentra la mayor parte de las lluvias, frecuentemente asociadas a fenómenos meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes. La humedad relativa es elevada, particularmente en la temporada de lluvias, lo que contribuye a un ambiente cálido y húmedo.

En cuanto a la vegetación, la Isla de la Piedra alberga una cobertura vegetal adaptada a las condiciones costeras y salinas. Destacan los matorrales espinosos, los manglares en las áreas adyacentes al Estrecho del Infiernillo y las palmeras cocoteras (*Cocos nucifera*), estas últimas predominantes en las zonas de uso turístico. Los manglares, en particular, constituyen un ecosistema de gran relevancia ecológica, ya que funcionan como hábitat para numerosas especies de aves, peces y crustáceos, además de desempeñar un papel fundamental en la protección contra la erosión costera y la regulación de los flujos de nutrientes entre los ecosistemas terrestres y marinos.

Respecto a las condiciones oceanográficas, el oleaje en la Isla de la Piedra presenta variaciones significativas según su exposición al océano Pacífico. En las playas protegidas por el Estrecho del Infiernillo, el oleaje es generalmente suave, con olas de baja altura, lo que favorece actividades recreativas como la natación y el esparcimiento. Por el contrario, en las zonas expuestas directamente al océano, el oleaje puede ser más intenso, especialmente durante la temporada de lluvias, cuando los vientos y las corrientes marinas incrementan su fuerza. Las mareas en la región son de tipo mixto, con una amplitud promedio que oscila entre 1 y 2 metros, lo que influye en la dinámica sedimentaria de las playas y en la estabilidad de los ecosistemas costeros.

El suelo de la isla es predominantemente arenoso, con una textura que limita la retención de humedad y, por ende, el desarrollo de vegetación densa. Sin embargo, esta característica edáfica favorece la formación de playas extensas y de pendiente suave, que constituyen uno de los principales atractivos turísticos de la zona. En conjunto, estas condiciones físicas y ambientales confieren a la Isla de la Piedra un valor ecológico y paisajístico significativo, aunque también la exponen a desafíos como la erosión costera, la presión antropogénica derivada del turismo y la vulnerabilidad ante fenómenos meteorológicos extremos.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo General

Determinar el error en la detección de la línea de costa, a partir de imágenes obtenidas por diferentes sensores Satelitales.

### 5..2. Objetivo Especifico

Comparar cada una de las líneas de costa provenientes de: LANDSAT8, SENTINEL2, MODIS, PLANETSCOPE, Google Earth y RapideEye con la línea de costa base obtenida con fotografías aéreas

## 5. HIPÓTESIS

El error de extracción de la línea de costa será directamente proporcional al tamaño del píxel del sensor satelital.

## 6. JUSTIFICACIÓN

La correcta delimitación de la línea de costa es fundamental para diversas aplicaciones en ingeniería costera, gestión ambiental y planificación territorial. Sin embargo, la variabilidad en la exactitud de los sensores utilizados para extraer esta línea puede generar discrepancias significativas en los resultados, lo que afecta la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas adecuadas de manejo costero.

En este contexto, surge la necesidad de investigar y determinar la fuente de error predominante en la extracción de la línea de costa para un sitio específico. Esto se basa en la relevancia de contar con datos precisos y confiables sobre la posición exacta de la costa, ya que esto impacta en la evaluación de riesgos costeros, la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la preservación de ecosistemas costeros sensibles.

## 7. MATERIALES Y METODO

### 6.1. Materiales

#### 6.1.1. Dron Phantom-4 ADVANCED

El dron Phantom 4 Advanced es un dispositivo altamente avanzado que ofrece una amplia gama de características y funcionalidades ideales para la captura de datos geoespaciales y la investigación en campos como la cartografía, la topografía, la monitorización ambiental y la gestión de recursos naturales. A continuación, se presentan algunas de sus características principales desde una perspectiva técnica:

- **Cámara de alta resolución:** El Phantom 4 Advanced está equipado con una cámara integrada de alta resolución que permite capturar imágenes de hasta 20 megapíxeles. Esta cámara utiliza un sensor CMOS de 1 pulgada y un lente de campo de visión (FOV) ajustable para obtener imágenes nítidas y detalladas desde diferentes alturas y ángulos.
- **Tiempo de vuelo prolongado:** Gracias a su batería de alta capacidad y eficiencia energética, el Phantom 4 Advanced puede alcanzar tiempos de vuelo de hasta 30 minutos con una sola carga, lo que proporciona una mayor autonomía y productividad durante las operaciones de campo.

En el plan de vuelo se generó un polígono rectangular de 5.5 kilómetros paralelo a la línea de costa para garantizar una cobertura completa de la zona. Con el fin de capturar suficientes imágenes para un ortomosaico, el plan de vuelo requería múltiples vuelos, por lo que se crearon cuatro transectos paralelos de 5.5 kilómetros cada uno, que cubrían una superficie total de 8 ha. Se recogieron diez puntos de control terrestre (PCT) para la corrección geométrica de la ortoimagen durante la campaña de campo. La ubicación de cada punto de muestreo se registró mediante un GPS con un error inferior a 1 m.

Todas las imágenes individuales se sometieron a calibración radiométrica mediante objetivos en blanco y negro previos al vuelo sobre el terreno. A continuación, las imágenes se procesaron mediante la técnica fotogramétrica estereoscópica multivista Structure from Motion (SfM) con imágenes cercanas al punto de nadir en el software Agisoft Metashape. El proceso automatizado comenzó con la alineación de las imágenes y creó una densa nube de puntos. El software analizó el ajuste del haz, los parámetros internos de la cámara y la orientación externa de la imagen, así como los puntos característicos de la imagen y su movimiento en todo el conjunto de datos. A continuación, se empleó la opción Agresivo para interpolar la nube de puntos y generar un modelo digital de superficie. Por último, se produjo un ortomosaico para cada vuelo.

### 6.1.2. Misiones Satelitales

Analizamos la zona de estudio mediante diversos sensores de satélite comúnmente disponibles (Tabla 2)

*Tabla 2. Especificaciones de los datos ópticos de teledetección recogidos para el lugar del estudio.*

Sensor	Resolución espacial ME (m)	Resolución temporal (días)	Fecha de adquisición y hora local de adquisición en GMT-7
Dron	0.037	N/A	Septiembre 13 (12:00)
Google Earth (GE, WV)	1.8	N/A	Septiembre 10 (N/A)
PlanetScope	4	1	Septiembre 10 (11:20)
RapidEye	5	6	Diciembre 3 (11:16)
Sentinel-2	10	5	Septiembre 13 (11:39)
Landsat 8	30	16	Septiembre 13 (11:30)
MODIS Terra	250	1	Septiembre 12 (11:50)

### 6.1.3. Descarga de Imágenes de los diferentes sensores

Para descargar imágenes de Landsat 8, MODIS, PlanetScope, RapidEye y Sentinel-2, primero accedemos a las respectivas plataformas. Para Landsat 8, visitamos el sitio web de USGS Earth Explorer, iniciamos sesión, especificamos ubicación y fechas, visualizamos, seleccionamos y descargamos las imágenes configurando las opciones necesarias. Para MODIS, utilizamos el sitio de NASA Earthdata, nos registramos, definimos criterios de búsqueda, filtramos y descargamos las imágenes deseadas. En PlanetScope, creamos una cuenta en Planet Labs, exploramos la plataforma, seleccionamos área y fechas, visualizamos, añadimos al carrito o descargamos directamente ajustando las configuraciones. Para RapidEye, seguimos un proceso similar al de PlanetScope en la plataforma de Planet Labs. Finalmente, para Sentinel-2, usamos el Copernicus Open Access Hub, nos registramos, buscamos por ubicación y fechas, visualizamos miniaturas, añadimos al carrito y descargamos las imágenes eligiendo el formato adecuado y aceptando los términos de uso. Este procedimiento nos permite obtener imágenes satelitales de diversas fuentes de manera organizada y eficiente.

### 6.1.4. ArcMap (Software de procesamiento)

ArcMap es una herramienta central utilizada para la manipulación, análisis y visualización de datos geospaciales. ArcMap es uno de los componentes principales de ArcGIS Desktop, un conjunto de aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollado por Esri. A continuación, se describen las características, funcionalidades y aplicaciones de ArcMap que lo hacen esencial para el estudio.

#### *Características de ArcMap*

ArcMap es una aplicación robusta y versátil diseñada para trabajar con datos geográficos. Sus características principales incluyen:

- **Interfaz de Usuario Intuitiva:** Proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI) que facilita la visualización y edición de datos geospaciales mediante mapas interactivos.
- **Soporte para Múltiples Formatos de Datos:** ArcMap es compatible con una amplia variedad de formatos de datos geospaciales, incluyendo shapefiles, geoJSON, KML, y bases de datos geográficas como geodatabases.
- **Capacidades de Edición:** Permite la creación y edición de datos vectoriales (puntos, líneas, polígonos) y rásteres, facilitando el ajuste y corrección de datos geográficos.

#### *Funcionalidades de ArcMap*

ArcMap ofrece una amplia gama de funcionalidades que son esenciales para el análisis geoespacial avanzado:

##### 1. Análisis Espacial:

- **Superposición de Capas:** Permite combinar múltiples capas de datos para realizar análisis complejos, como la intersección y unión de polígonos.
- **Buffering:** Creación de zonas de influencia alrededor de puntos, líneas o polígonos para evaluar impactos y relaciones espaciales.

- **Análisis de Proximidad:** Evaluación de la distancia entre diferentes características geográficas y análisis de accesibilidad.
2. **Geoprocesamiento:**
- **Herramientas de Geoprocesamiento:** ArcMap incluye un conjunto de herramientas para tareas de geoprocesamiento como la recorte (clip), unión (merge), disolución (dissolve) y conversión de formatos.
3. **Visualización de Datos:**
- **Simbología Personalizada:** Permite la personalización de la simbología de los datos para mejorar la comprensión visual de los mapas.
  - **Etiquetado Dinámico:** Genera y ajusta etiquetas automáticamente para las características del mapa, mejorando la claridad y legibilidad.
4. **Análisis Ráster:**
- **Análisis de Superficies:** Permite realizar análisis de terrenos como la generación de modelos digitales de elevación (DEM), curvas de nivel y análisis de pendientes.
  - **Clasificación de Imágenes:** Ofrece herramientas para la clasificación de imágenes satelitales y el análisis de la cobertura del suelo.

#### 6.1.5. Índice NDWI

El índice NDWI (Normalized Difference Water Index, por sus siglas en inglés) es un índice utilizado para identificar y monitorear la presencia de agua líquida en cuerpos de agua, vegetación y suelos. Lo propuso Gao en 1996 y se calcula con imágenes de satélite, principalmente las obtenidas por sensores como Landsat y MODIS.

En esta ocasión Utilizamos el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) para realizar el trazado de la línea de costa dentro de las imágenes satelitales, este es un índice comúnmente utilizado en teledetección para detectar cuerpos de agua y monitorear la humedad del suelo y la vegetación.

Formula:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Donde:

Green es la reflectancia de la banda verde

NIR es la reflectancia del infrarrojo cercano

La diferencia y la suma de estas bandas permiten resaltar el contenido de agua, ya que el agua absorbe más el rango del SWIR y refleja más el NIR donde un valor alto de NDWI representa una mayor presencia de agua.

Bandas por satélite (NIR, Green)

Tabla 3. Bandas Green/NIR por satélite utilizadas

SATÉLITE SENSOR	GOOGLE EARTH	MODIS	LANDSAT 8	PLANET SCOPE	RAPID EYE	SENTINEL-2
NIR	B7	B2	B5	B4	B4	B8
GREEN	B3	B4	B3	B3	B3	B3

### 6.1.6. Sistema de Análisis de Cambio de la Línea de Costa (DSAS)

El Sistema de Análisis de cambio de la Línea de Costa (DSAS, por sus siglas en inglés: Digital Shoreline Analysis System) es una herramienta de software desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que se utiliza para calcular las tasas de cambio de las líneas de costa a lo largo del tiempo. DSAS es especialmente útil en estudios de erosión costera, sedimentación y cambios morfológicos de la línea de costa, proporcionando una metodología sistemática y precisa para el análisis espacial y temporal de estos fenómenos.

#### Descripción y Funcionalidades

DSAS se implementa como una extensión para el software ArcGIS, un Sistema de Información Geográfica (SIG) ampliamente utilizado. Entre las funcionalidades principales de DSAS se incluyen:

1. **Creación de Transectos:** DSAS genera automáticamente una serie de transectos perpendiculares a una línea de base definida por el usuario. Estos transectos se extienden hasta las líneas de costa en diferentes momentos en el tiempo.
2. **Cálculo de Tasas de Cambio:** Utilizando los transectos generados, DSAS calcula las tasas de cambio de la línea de costa mediante métodos estadísticos como la tasa de cambio lineal (LRR), la tasa de cambio de media ponderada (WLR), y otros métodos avanzados. Estas tasas de cambio son esenciales para entender la dinámica costera y predecir tendencias futuras.
3. **Visualización y Análisis Espacial:** La herramienta permite la visualización y el análisis de los datos resultantes directamente en el entorno de ArcGIS. Los usuarios pueden superponer las líneas de costa históricas, transectos y otros datos geoespaciales para obtener una comprensión integral de los patrones de cambio.
4. **Generación de Informes:** DSAS puede producir informes detallados y gráficos que resumen las tasas de cambio y otros datos relevantes, facilitando la interpretación y presentación de los resultados.

#### Requisitos y Configuración

Para utilizar DSAS, se requiere el siguiente equipamiento y software:

- **Software:** ArcGIS Desktop (preferiblemente versiones recientes para asegurar compatibilidad) y la extensión DSAS, que puede descargarse del sitio web del USGS.
- **Datos:** Líneas de costa históricas en formato vectorial (shapefiles) georreferenciadas correctamente. Es fundamental contar con líneas de costa obtenidas a partir de imágenes satelitales, fotos aéreas o levantamientos topográficos con fechas precisas.

- **Configuración:** Los datos deben estar proyectados en un sistema de coordenadas adecuado para el análisis costero, generalmente en coordenadas UTM para asegurar exactitud espacial.

## 6.2. Método

### 6.2.1. Procesamiento de Imágenes

El procesamiento de imágenes es un paso crucial para convertir los datos brutos en información útil y comprensible. Este proceso incluye varias etapas:

1. **Corrección Radiométrica:** Ajusta las diferencias en la respuesta del sensor y corrige los efectos de la atmósfera, la iluminación y la geometría de la escena.
2. **Corrección Geométrica:** Ajusta las distorsiones geométricas debidas al movimiento del satélite, la curvatura de la Tierra y otros factores, alineando las imágenes con coordenadas geográficas precisas.
3. **Calibración Espectral:** Asegura que los valores de los píxeles reflejen correctamente las propiedades espectrales de la superficie terrestre.
4. **Eliminación de nubes y sombras:** La presencia de nubes y sombras puede afectar negativamente la interpretación de las imágenes. Se aplican métodos para detectar y eliminar o minimizar la influencia de nubes y sombras en los datos.
5. **Aplicación de índices espectrales:** Se pueden calcular y aplicar índices espectrales específicos, como el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), que es útil para evaluar la salud vegetal y otros aspectos ambientales.
6. **Reproyección:** Alinear todas las imágenes a una proyección y resolución espacial común para facilitar la comparación y análisis entre diferentes conjuntos de datos.
7. **Recorte o Subconjunto:** Selección de regiones específicas de interés y eliminación de áreas no deseadas para optimizar el tamaño de los conjuntos de datos y facilitar análisis específicos.

### 6.2.2. Vectorización

La vectorización de píxeles en el caso de imágenes satelitales es el proceso técnico mediante el cual se transforman datos ráster, compuestos por una matriz de píxeles que representan valores de reflectancia en distintas bandas espectrales, en datos vectoriales estructurados en forma de puntos, líneas y polígonos. Este proceso implica la aplicación de algoritmos de clasificación para segmentar la imagen en clases temáticas, como agua, vegetación, y suelo desnudo, seguido de técnicas de detección de bordes para delinear las transiciones entre estas clases. Posteriormente, se emplean métodos de trazado de contornos para convertir estas transiciones en entidades vectoriales, lo cual facilita su integración en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para análisis espacial avanzado, monitoreo ambiental y planificación territorial, análisis de costa, etc.,. Esto mejora la manejabilidad y exactitud de los datos geoespaciales, permitiendo una interpretación y manipulación más eficiente en estudios de dinámica terrestre y gestión de recursos naturales.

### 6.2.3. Análisis de Costa

**Preparación de datos:** Recopilamos datos de diferentes fuentes, empleando imágenes MODIS, LANDSAT8, SENTINEL2, RAPIDEYE, PLANETSCOPE, GOOGLE EARTH y una imagen obtenida mediante un vuelo fotogramétrico con dron.

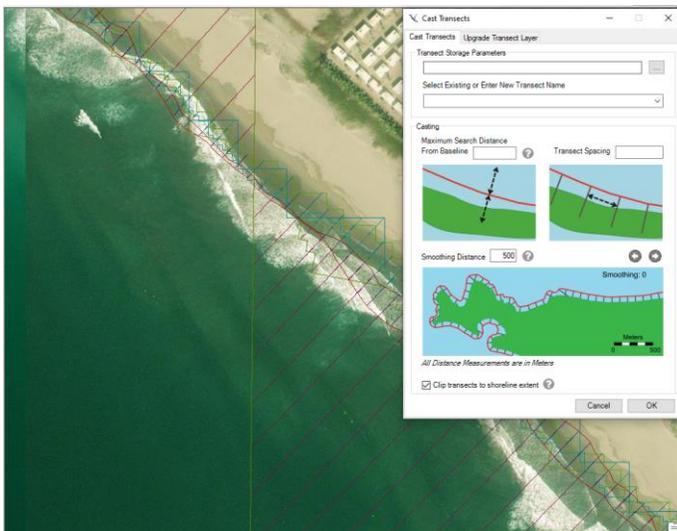
**Georreferenciación:** Georreferenciamos todos los conjuntos de datos para asegurar su exactitud espacial y alineación con un sistema de coordenadas común. Asignamos coordenadas geográficas a cada punto de datos, utilizando UTM Zona 13N en todas las imágenes, lo que facilita la comparación entre diferentes fuentes.

**Análisis comparativo:** Comparamos las líneas de costa extraídas de cada fuente de datos (por la vectorización apoyada del índice NDWI) para identificar similitudes y diferencias.

**Validación y ajuste:** Realizamos ajustes necesarios para corregir discrepancias entre las líneas de costa extraídas de diferentes fuentes.

**Análisis del error:** Con las líneas obtenidas y los transectos resultantes, procedemos a calcular el error promedio comparando las imágenes con la obtenida mediante el dron, obteniendo así un error promedio para cada una.

*Ilustración 4 Visualización DSAS*



*Fuente Elaboración Propia*

## 7. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de las líneas de costa en relación Dron-Satélite que se obtuvieron mediante el análisis mediante DSAS y algunas tablas resumidas de los datos contenidos dentro de la capa "Transectos" y finalmente el error entre cada una de las relaciones.

Para Google Earth observamos que el error medio es muy leve siendo este de apenas 6.69 m aproximadamente, observamos que existen zonas donde el error aumenta mientras que en otra podría ser casi imperceptible o inexistente.

Diferencia Costa Dron-Google Earth

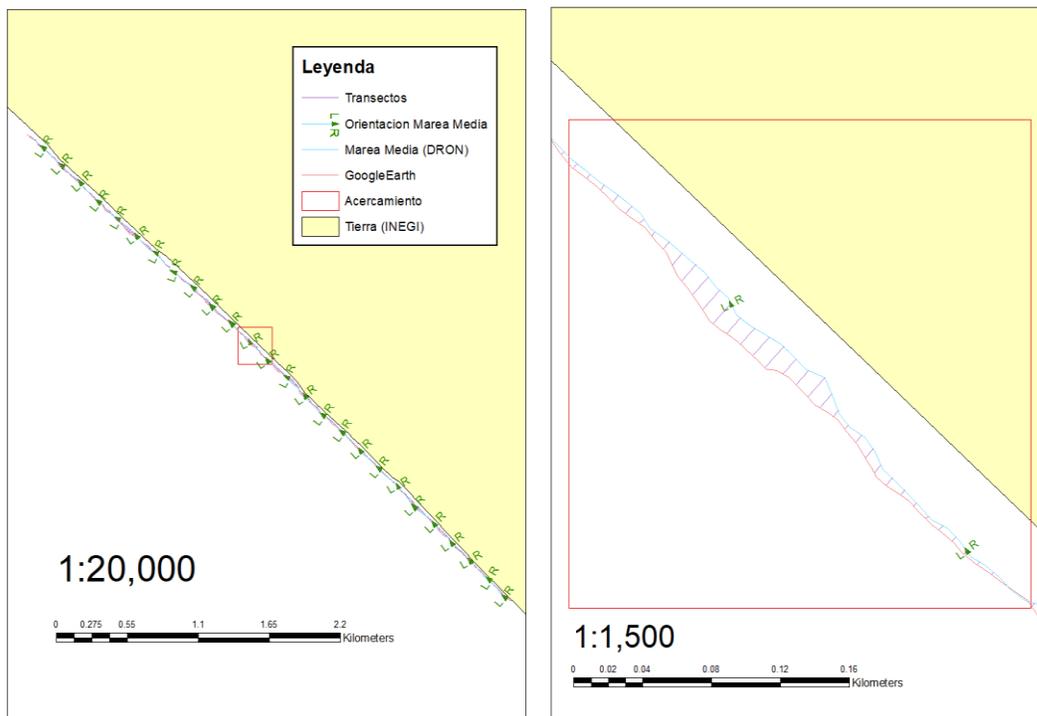


Ilustración 5 Relación Google Earth

Para Landsat 8 el error comienza a variar significativamente observamos picos en la línea del satélite que corresponden a los pixeles utilizados para la vectorización, en algunos puntos cruza la línea de costa del dron mientras que en otros no se acerca.

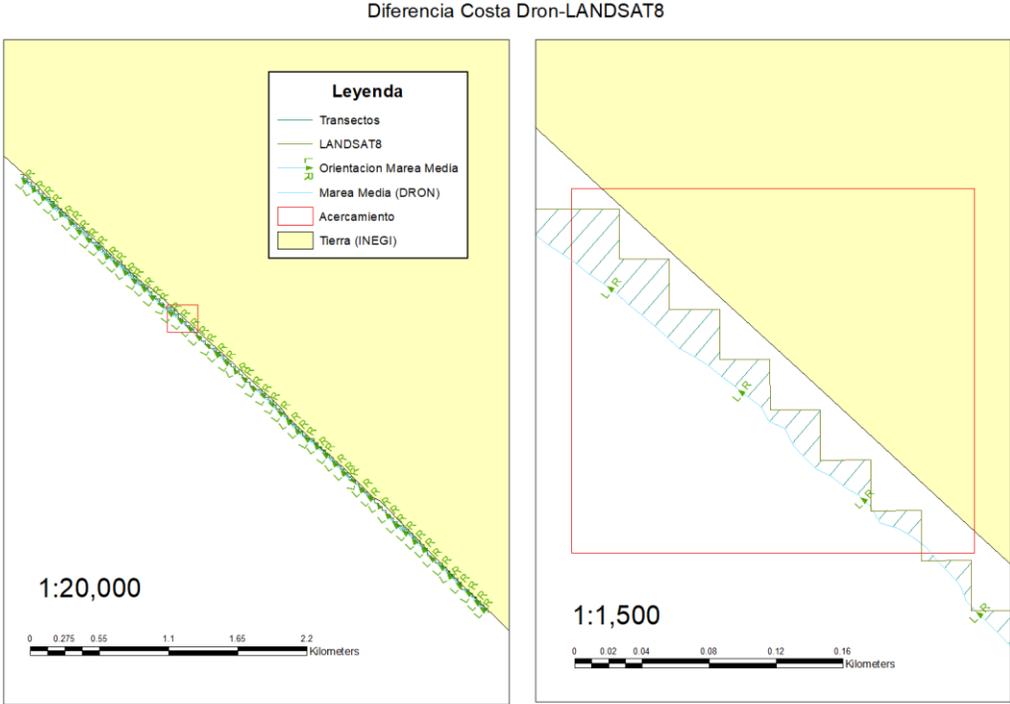
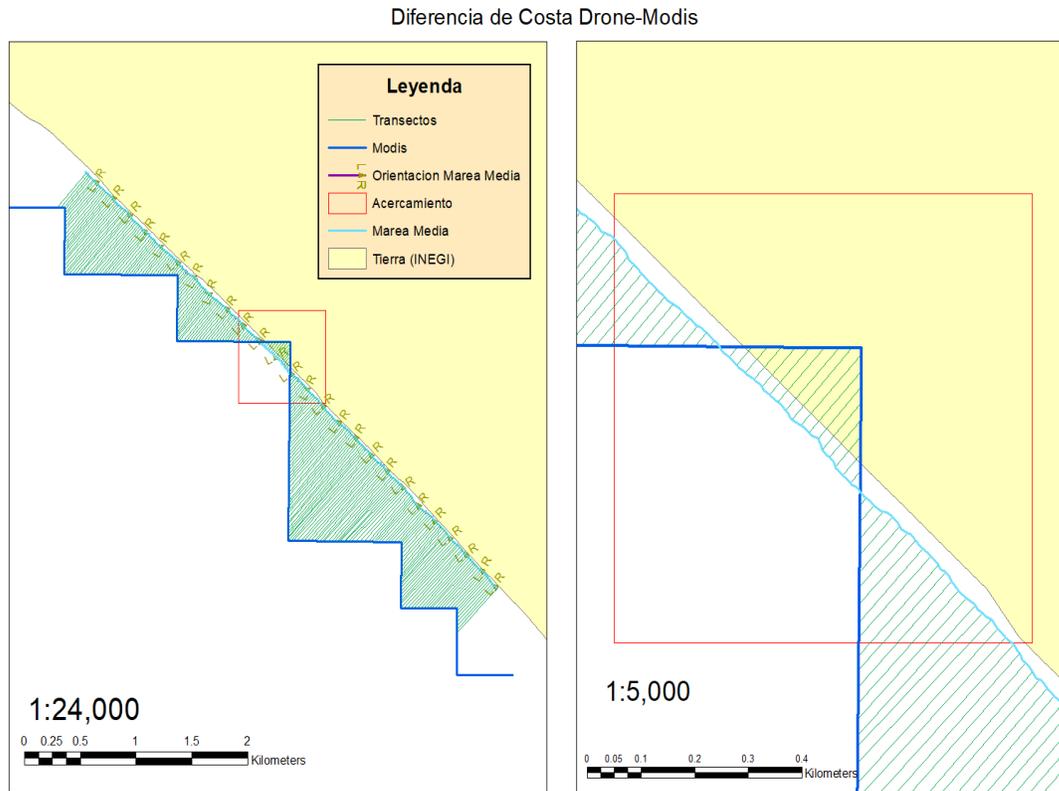


Ilustración 6 Relación Landsat-8

En MODIS observamos que contiene el error más grande, este sobrepasando los 400 m debido al tamaño de píxel de MODIS no es una sorpresa, en la imagen observamos que aun desde una escala grande son visibles los transectos.



*Ilustración 7 Relación MODIS*

Para PlanetScope observamos en la imagen que los pixeles no son tan grandes como lo fueron en Landsat lo que permite que la relación respecto a la línea de costa sea más armoniosa de visualizar, de igual forma existen picos que sobrepasan la línea, pero el error medio es mucho menor.

### Diferencia Costa Dron-PLANETSCOPE

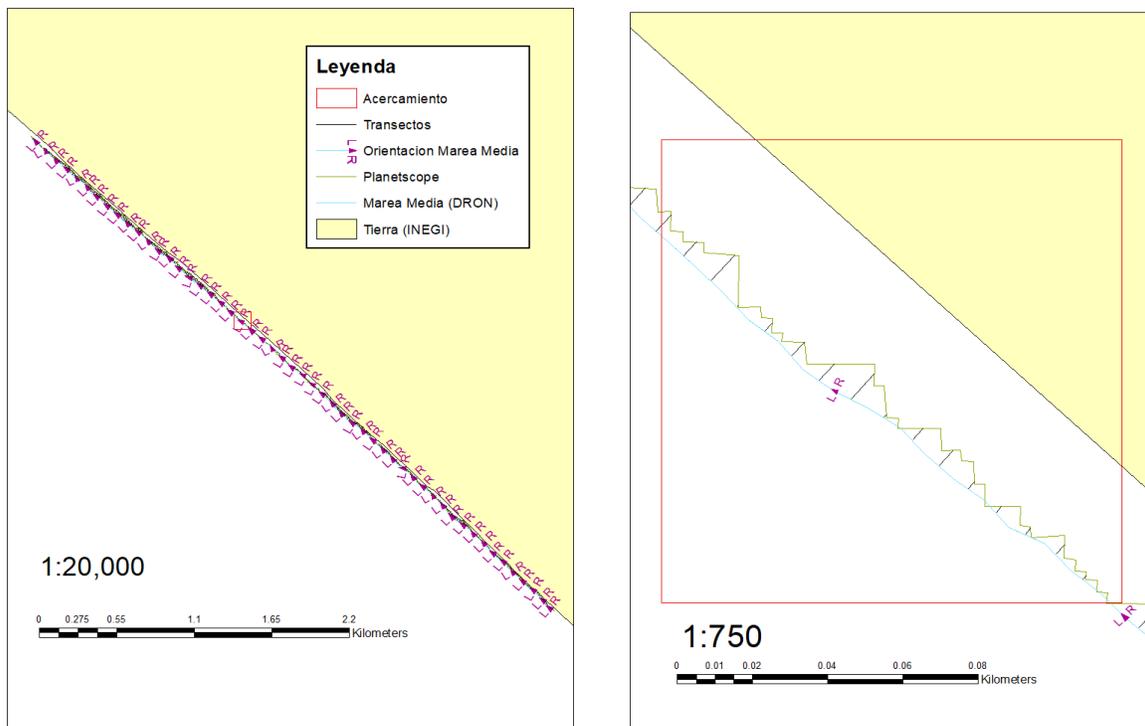


Ilustración 8 Relación PlanetScope

RapideEye muestra una similitud con PLANETSCOPE los pixeles más pequeños permiten una armonía con la línea satelital aún mejor, existiendo picos en la línea que se acercan mucho o tocan la línea media y de la misma manera el error no es excesivo.

Diferencia Costa Dron-RapideEye

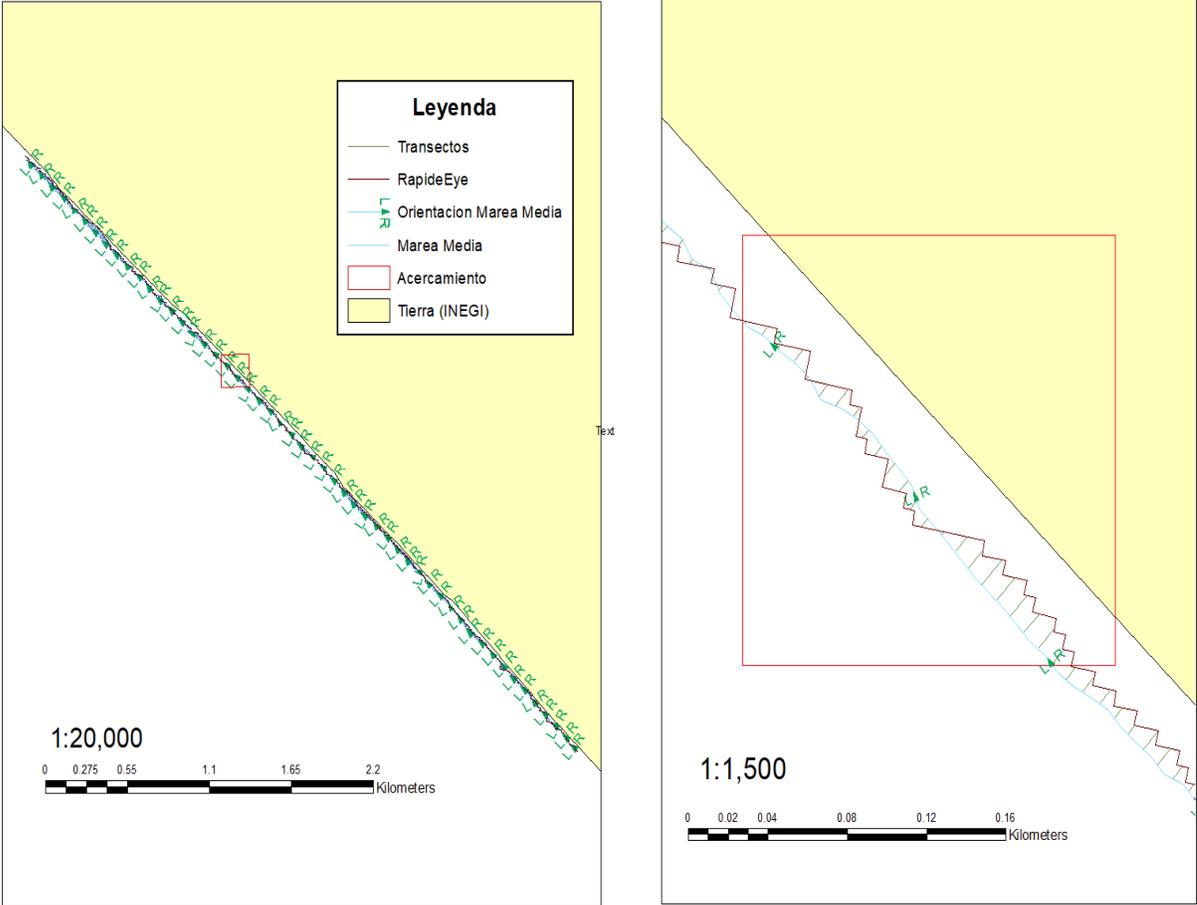
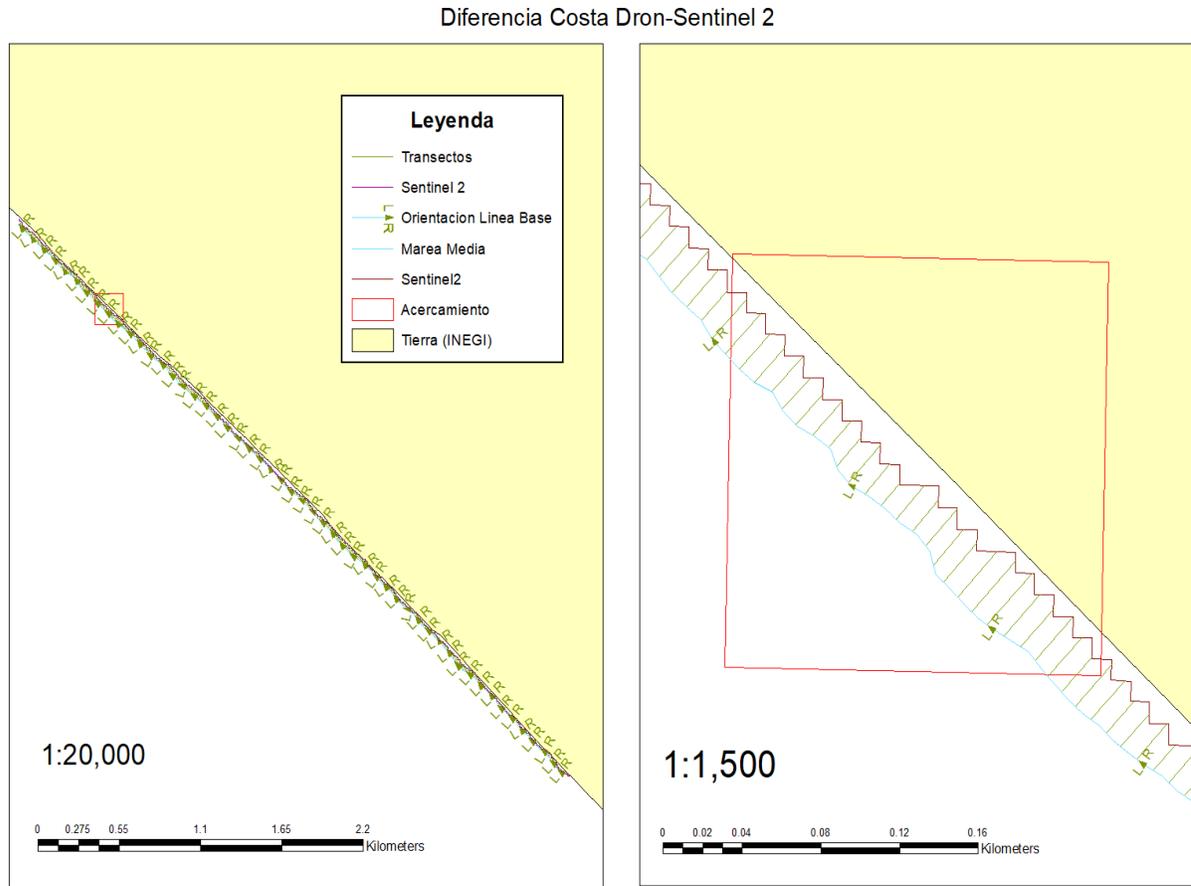


Ilustración 9 Relación RapideEye

Para Sentinel 2 observamos que el tamaño del píxel es más pequeño en comparativa con LANDSAT-8 pero esta se encuentra en su mayoría lejos de la línea media existiendo puntos cercanos a ella, pero ninguno que la toque.



*Ilustración 10 Relación Sentinel-2*

Errores promedio obtenidos mediante la elaboración de los transectos para cada sensor.

*Tabla 4 Media de Errores por Sensor*

SATELITE	Distancia Media con respecto a la Línea base (m)
Google Earth	6.7 m
MODIS	451.4 m
LANDSAT8	18.4 m
PLANETSCOPE	11.3 m
RAPIDEYE	10.3 m
SENTINEL2	16.7 m

## 8. CONCLUSIONES

La presente tesis permitió evaluar la exactitud de diferentes sensores satelitales en la detección de la línea de costa en comparación con un vuelo fotogramétrico con dron. Para ello, se implementó un procedimiento basado en el índice NDWI y la vectorización de píxeles, seguido de un análisis mediante el software DSAS para la extracción de transectos y el cálculo de errores.

Basado en el análisis llevado a cabo, se determina que el sensor con mayor exactitud comparativa en la captura mediante drones es el de Google Earth (WorldView-2), presentando un margen de error no superior a 7 metros, en relación con los otros sensores evaluados. PlanetScope y RapidEye exhiben resultados comparables, con errores de 11.3 m y 12.3 m respectivamente. Similarmente, Sentinel-2 y Landsat 8 muestran errores de 16.7 m y 18.5 m, respectivamente. En contraste, debido al tamaño del píxel superior a 400 m, el sensor MODIS no resulta viable para el análisis de líneas costeras.

Concluimos, por tanto, que Google Earth (WorldView-2) demostró un rendimiento sobresaliente en el análisis costero y puede emplearse con confianza para dicho propósito, siempre considerando el grado de error aceptable para las exigencias específicas del trabajo realizado.

En relación con trabajos a futuro, se recomienda la implementación de redes neuronales y algoritmos de aprendizaje automático para optimizar la identificación de los píxeles correspondientes a tierra y agua. Además, el análisis puede ampliarse mediante estudios temporales que permitan evaluar la evolución de la erosión y sedimentación de la línea de costa en la zona de estudio. Asimismo, la integración de sensores hiperespectrales y radares de apertura sintética (SAR) podría complementar la detección de la línea de costa en regiones donde las condiciones ópticas presentan limitaciones, como alta nubosidad o turbidez del agua.



## 9. REFERENCIAS

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2018). Manglares de México: Extensión, distribución y monitoreo. Ciudad de México: CONABIO.
- Costa, M. J. (2020). "The Role of Drones in Coastal Ecosystem Monitoring". *Journal of Coastal Research*, 36(4), 789-802.
- Documentos y manuales de usuario proporcionados por las agencias espaciales y empresas que operan los satélites, como la NASA (para MODIS y LANDSAT) y la Agencia Espacial Europea (para SENTINEL).
- DJI, Phantom 4 Advanced, China, 2024. <https://www.dji.com/mx/phantom-4-adv>
- ESRI, ArcGIS, 2024 <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Fuentes: Gao, B. C. (1996). NDWI- A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. {doi:10.1016
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Anuario estadístico y geográfico de Sinaloa. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx>
- Johnson, M. (2019). "Applications of Satellite Sensors in Earth Observation." In L. White (Ed.), *Advances in Satellite Technology* (pp. 70-85). City: Publisher.
- Kleinschmidt, A. M. (2019). "Drone Applications in Coastal Infrastructure Assessment". *Coastal Engineering*, 142, 101-115.
- Kontoes, C., et al. (2020). "The Role of Drones in Thermal Imagery Applications: A Review". *Remote Sensing*, 12(4), 671.
- Li, J., Lin, C., & Zhang, H. (2019). "Applications of UAV-based LiDAR in Forest Resources: A Review". *Remote Sensing*, 11(8), 906.
- Martínez, L., & López-Portillo, J. (2003). Los manglares de México: Una revisión. *Madera y Bosques*, 9(1), 27-51.
- Maxar Technologies. (s.f.). *WorldView Satellite Constellation*. Recuperado de <https://www.maxar.com/constellation/worldview>
- Maxar Technologies. (s.f.). *GeoEye-1 Satellite*. Recuperado de <https://www.maxar.com/constellation/geoeye-1>
- "Geographic Information Systems and Science" de Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire y David W. Rhind.
- "Geomorfología y dinámica costera de la Isla de la Piedra, Mazatlán, México", por Guillermo Ponce Álvarez, José Luis Palacio Aponte y Víctor Manuel Peña López.

- Schofield, G. (2018). "Unmanned Aerial Vehicles in Marine Biodiversity Research". *Marine Ecology Progress Series*, 601, 249-264.
- Sitios web de las plataformas de imágenes satelitales, como USGS Earth Explorer para LANDSAT y MODIS, y el Portal Copernicus para SENTINEL.
- Smith, A., Brown, B., & Jones, C. (2020). "Sensorial Satellite Missions: Concepts and Applications." *International Journal of Remote Sensing*, 25(3), 40-55.
- Torres-Orozco, R., & Pérez-Lezama, E. (2012). Caracterización geomorfológica de las playas de Mazatlán, Sinaloa. *Investigaciones Geográficas*, (78), 45-58.
- Valdez-Holguín, J. E., & Álvarez-Borrego, S. (1994). Oceanografía física del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 20(4), 561-594.
- Zhang, C., Kovacs, J. M., & Theiler, J. (2018). "Applications of Small Unmanned Aerial Systems for Multispectral Remote Sensing in Agriculture: A Review". *Remote Sensing*, 10(7), 1237.
- Zhang, C., Kovacs, J. M., & Theiler, J. (2018). "Applications of Small Unmanned Aerial Systems for Multispectral Remote Sensing in Agriculture: A Review". *Remote Sensing*, 10(7), 1237.

## 10. Anexos

### Proceso de vectorización de píxeles

1. Una vez dentro del programa ArcMap introducimos los archivos raster que deseamos vectorizar.
2. Posteriormente dentro de la caja de herramientas “ArcToolBox” seleccionamos herramientas de conversión y elegimos la función “From Raster” y posteriormente seleccionamos “Raster to Polygon.”

Una vez dentro de la herramienta en la opción “Input Raster” seleccionamos el raster que deseamos vectorizar, en este caso es la línea de costa que trazamos.

Elegimos la ruta de guardado de nuestro nuevo polígono en “Output Polygon Features” así como el nombre que tendrá, finalmente ejecutamos con “Ok.”

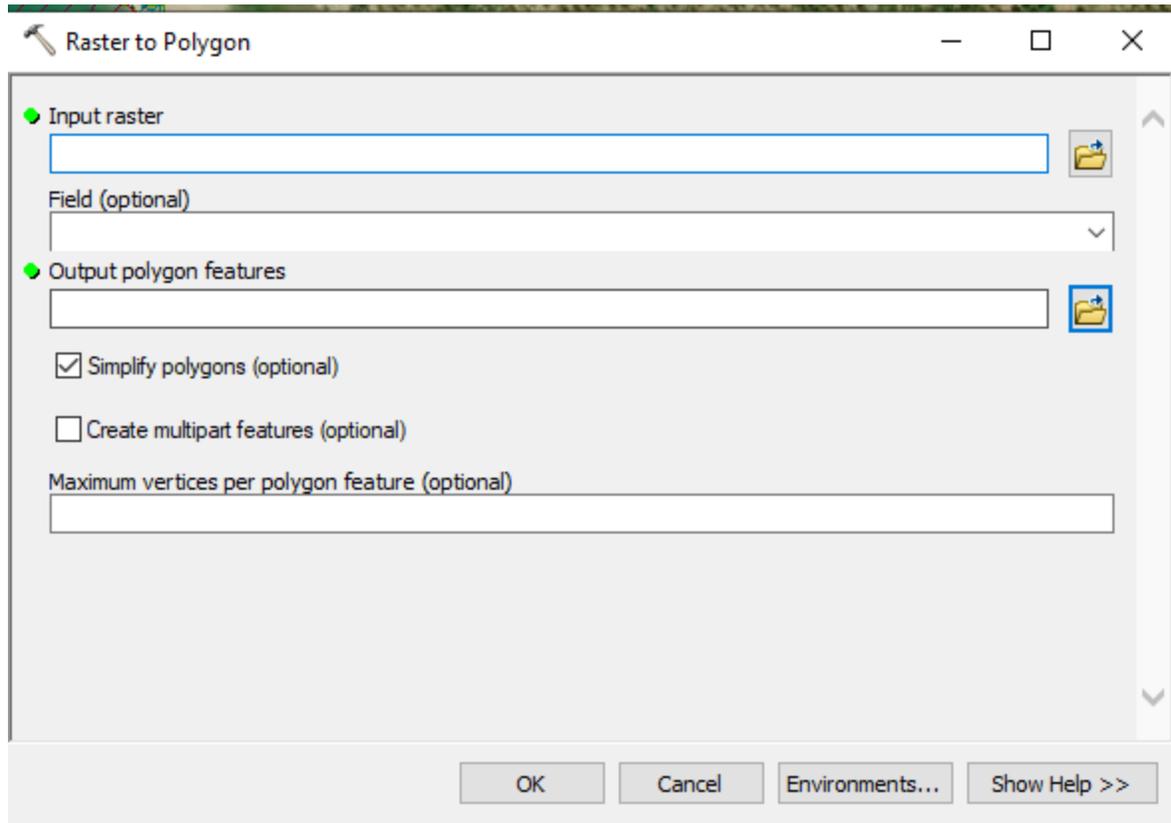
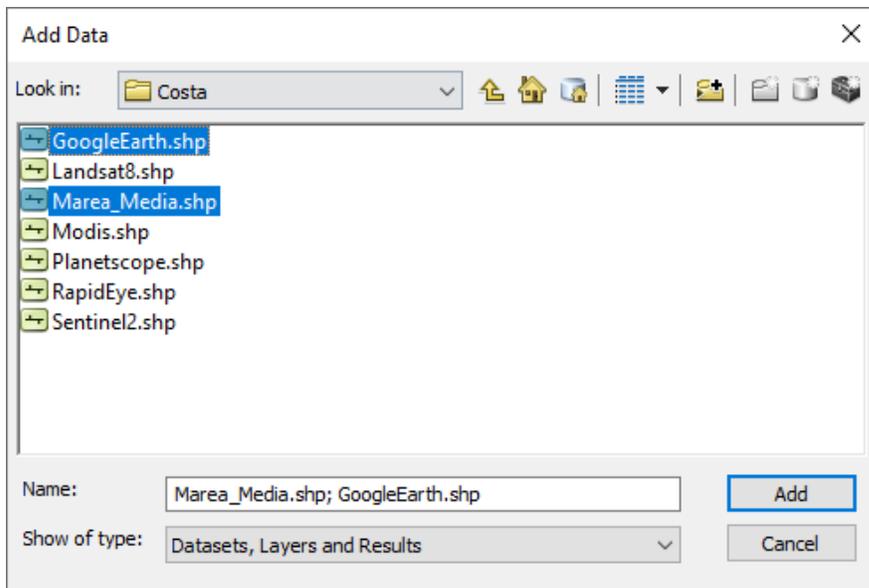


Ilustración 11 Vectorización

### Análisis de Costa mediante DSAS.

Comenzamos agregando la información de las capas una por una junto a la marea media obtenidas con el dron



*Ilustración 12 Datos Agregados*

Elaboramos una base de datos personal a fin de contar con la información de una manera más accesible.

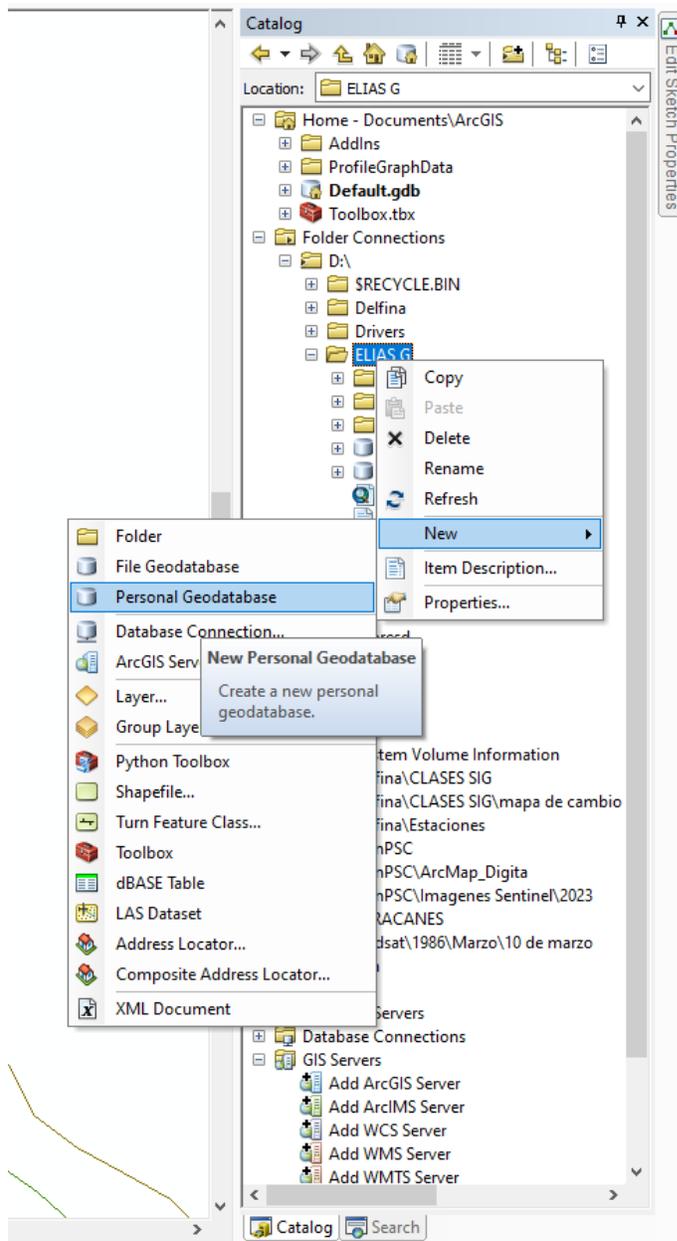


Ilustración 13 Elaboración de Base de Datos contenedora de la información

Elaboramos una clase nueva del tipo línea a fin de incluir las líneas de costa obtenidas con cada una de las imágenes ya vectorizadas y el dron.

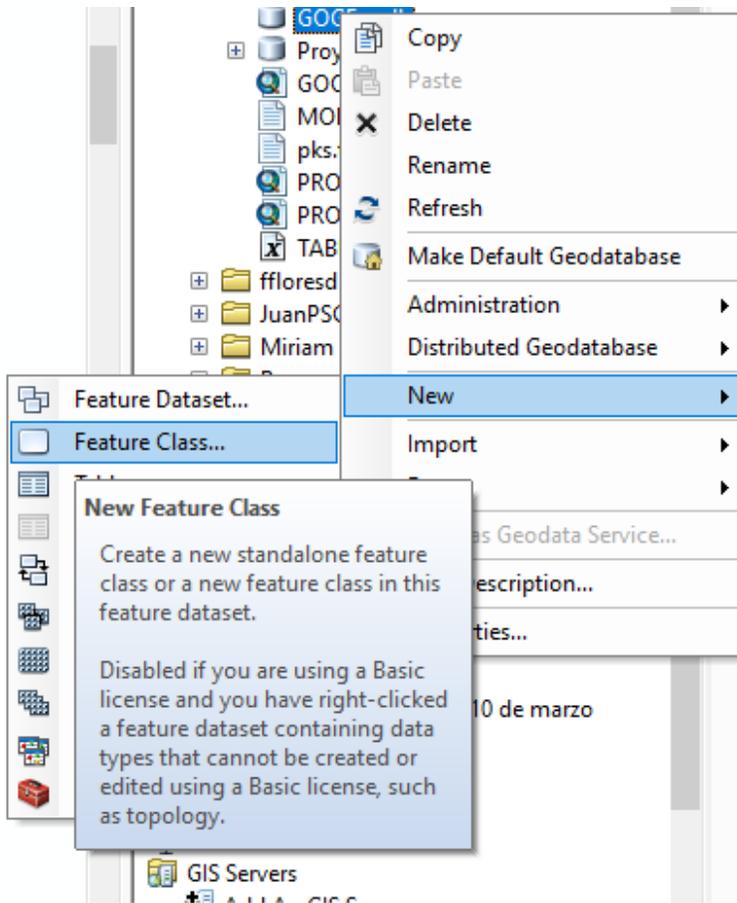


Ilustración 14 Creación de Clases a utilizar en DSAS

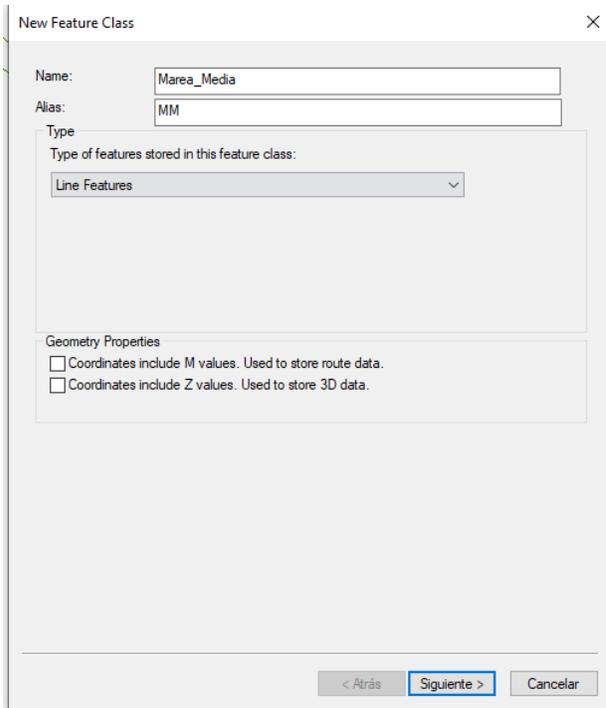


Ilustración 15 Nomenclatura de Clase

Para este caso ubicamos las clases dentro del sistema de coordenadas WGS 1984 Zona 13N

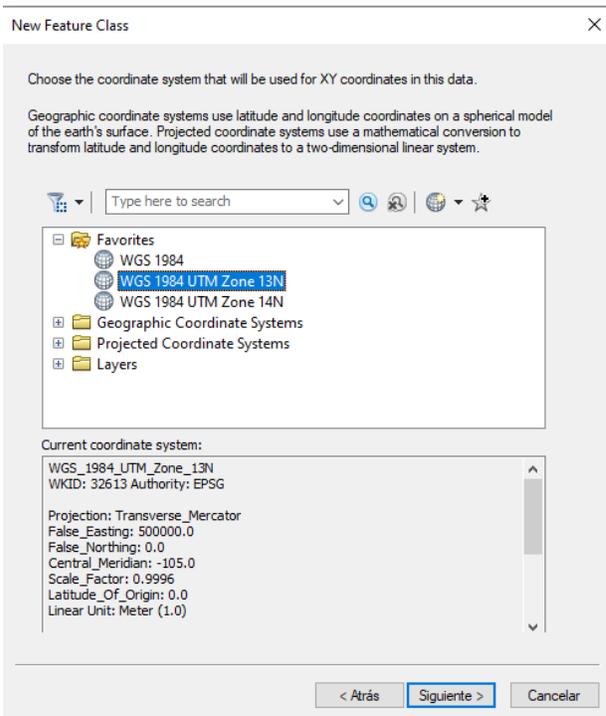


Ilustración 16 Georeferenciación de las clases elaboradas

Y agregamos finalmente la tolerancia.

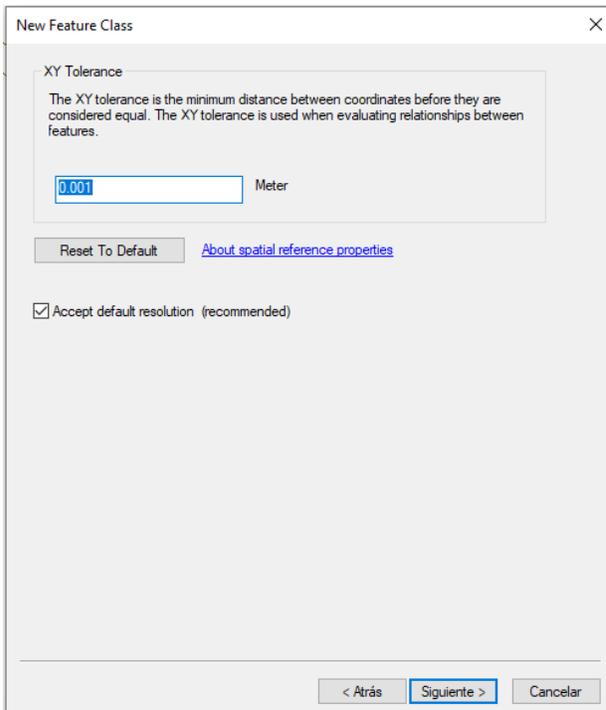


Ilustración 17 Tolerancia

Posteriormente observamos que nuestras clases solo cuentan con un par de campos.

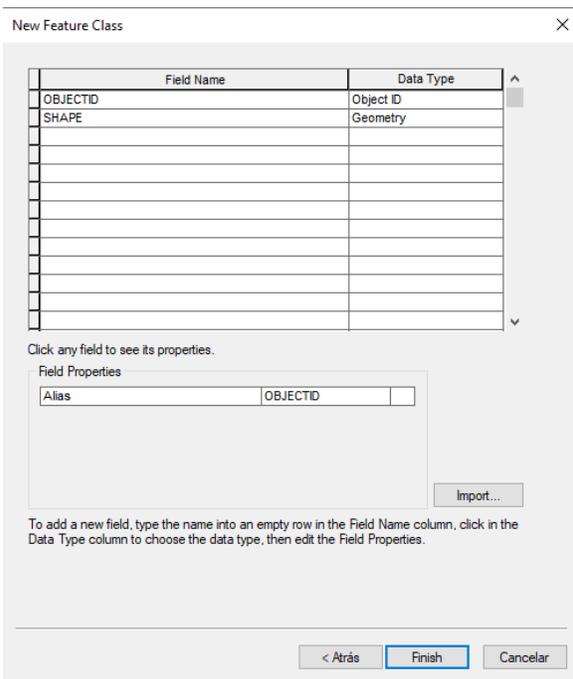
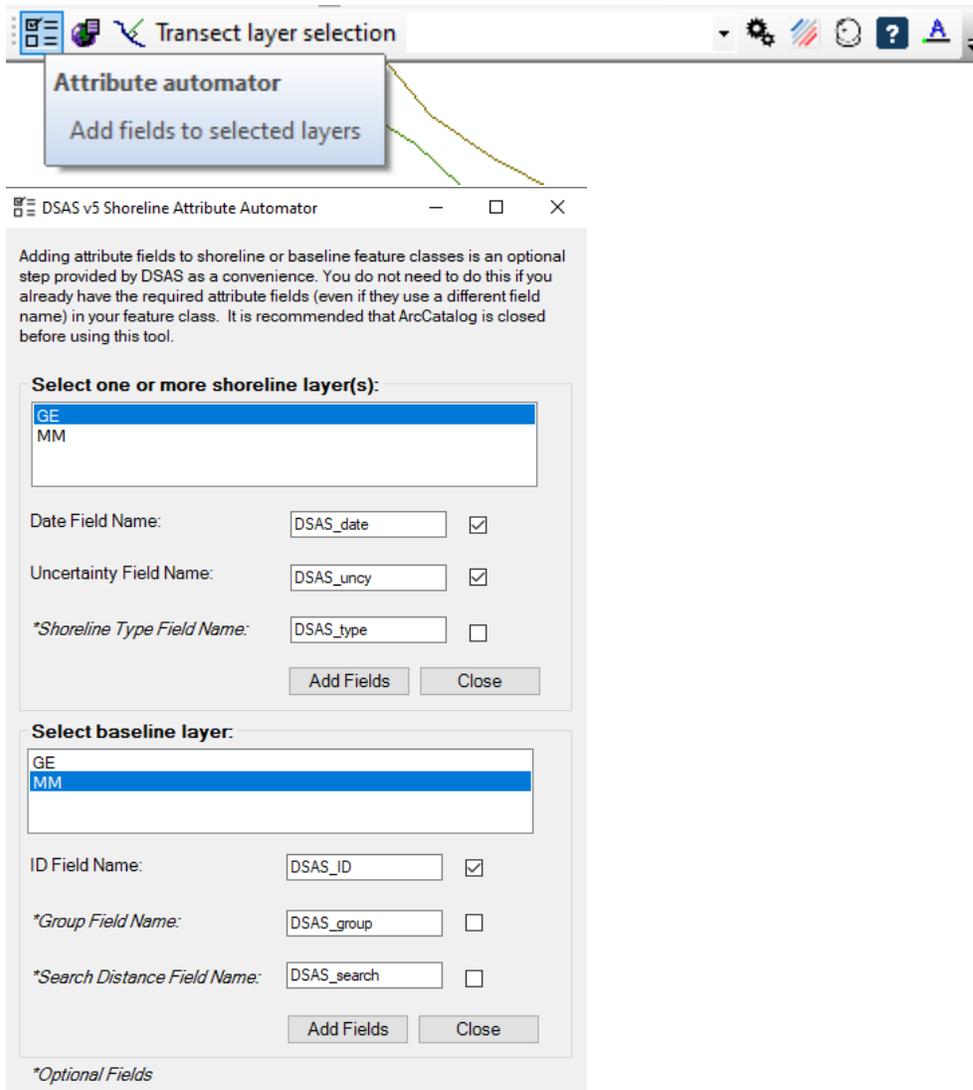


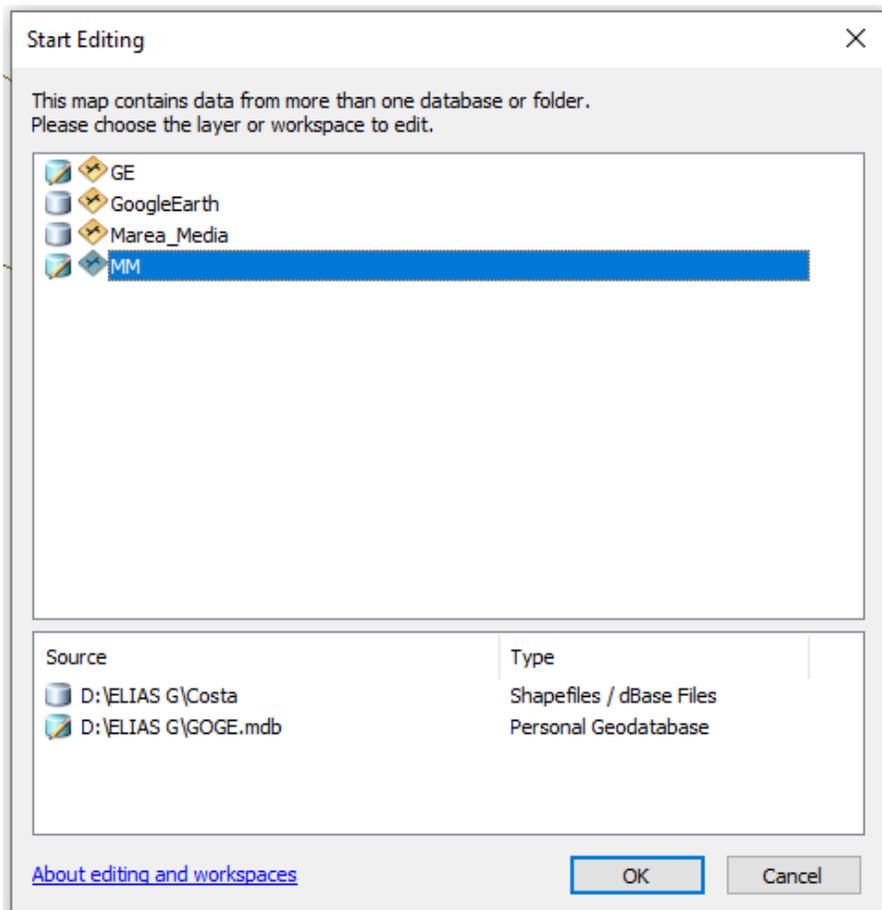
Ilustración 18 Campos básicos de las clases creadas

Para corregir esto último utilizaremos el DSAS con la función "Attribute Automator" en donde agergaremos los campos obligatorios para cada una de las clases creadas, donde observamos que para las imágenes nos solicita fecha, y el grado de incertidumbre.



*Ilustración 19 Campos agregados con DSAS - Shoreline Attribute Automator*

Posteriormente agregamos nuestros vectores a las clases elaboradas y editadas mediante DSAS ya que será con las que trabajaremos por la información que cuentan.



*Ilustración 20 Selección de capa para edición Marea Media (Dron)*

Repetimos el proceso, pero ahora con las capas satelitales.

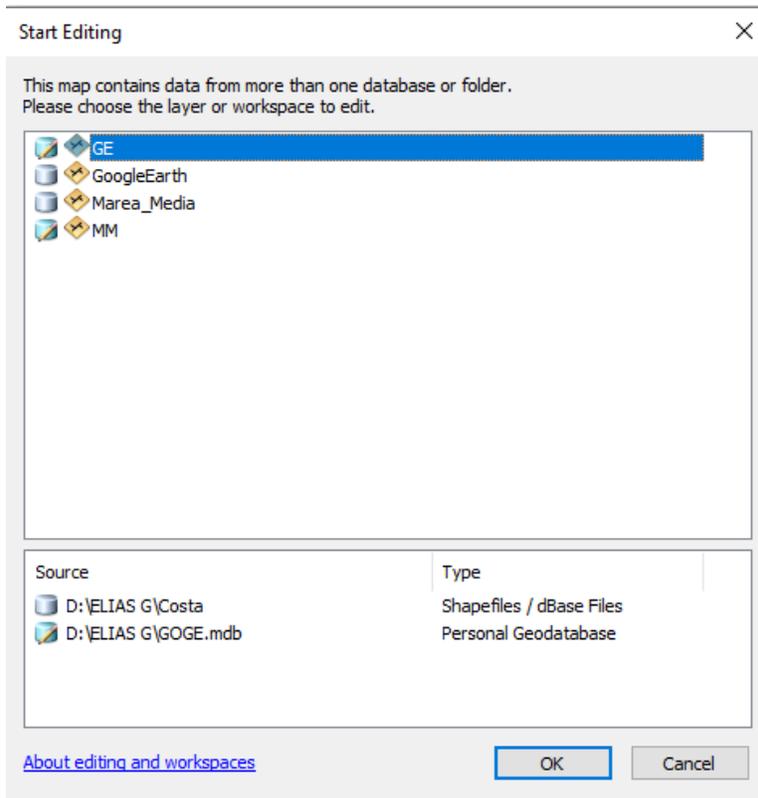


Ilustración 21 Selección de capa para edición (Satélite)

Corroboramos la información dentro de las capas creadas con el fin de observar que sean correctos.

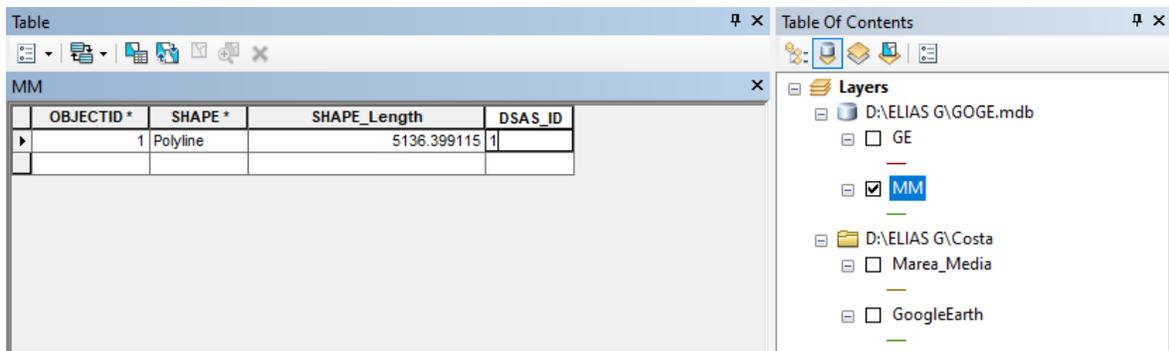


Ilustración 22 Tabla de contenido capa Marea Media (Dron)

SHAPE *	SHAPE_Length	DSAS_date	DSAS_uncy
Polyline	5226.28142	24/04/2024	1

Ilustración 23 Tabla de Contenido Satélite

### Elaboración de Transctos

Continuamos agregando los parámetros con los que trabajaremos el DSAS utilizando la línea base (Marea Media) en el apartado “Baseline Sttings.”

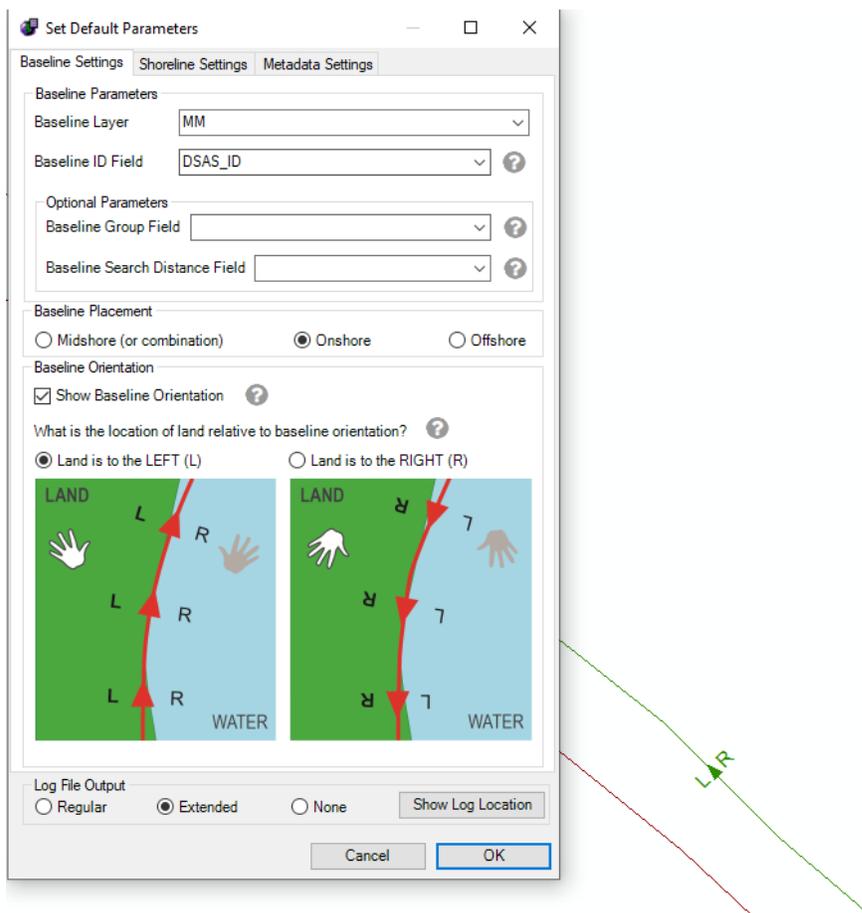


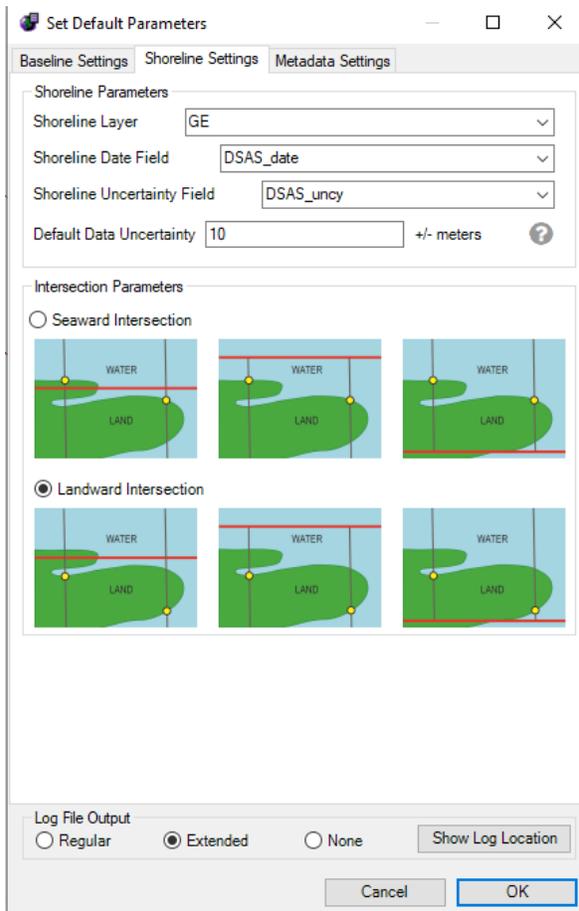
Ilustración 24 Selección de parámetros base (Marea Media) y Orientación de la línea base

Con la opción Show Baseline observamos la relación de la línea obtenida por el satélite con respecto a la obtenida con datos oceanográficos.

En este caso, la línea de costa del lado de la tierra con respecto a la MM, adicionalmente sabemos que el posicionamiento de la línea base esta sobre la tierra.

En el apartado “Shoreline Settings” agregaremos los datos de la linea de costa obtenida con la respectiva imagen satelital.

Aquí seleccionamos la intersección en la tierra para tener una mejor precisión.



*Ilustración 25 Selección de atributos de las líneas Satelitales*

De esta forma obtenemos los transectos de cada una de las imágenes para proseguir con los resultados y el análisis de resultados.

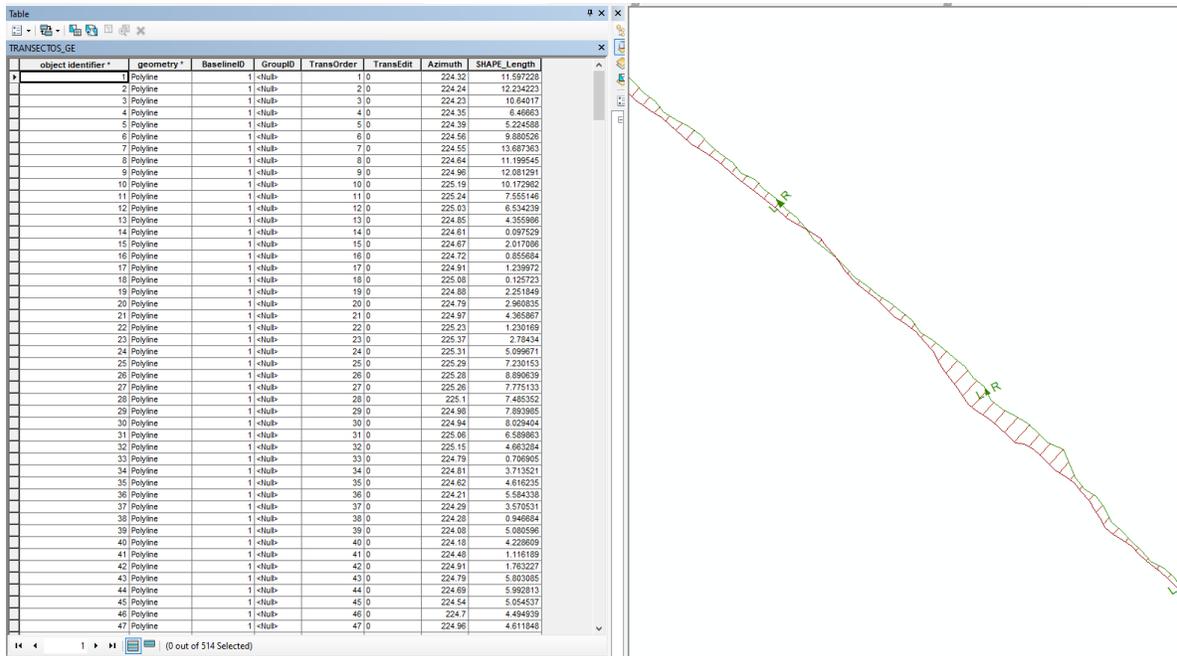


Ilustración 26 Tabla de Transectos y Visualización