



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE GEOGRAFÍA



**“DESARROLLO DE UN MÓDULO EN SIG PARA LA DELIMITACIÓN DE LA
LÍNEA DE COSTA EN CANCÚN-PLAYA DEL CARMEN, EN UNA
TEMPORALIDAD DE 25 AÑOS (1993, 1995, 2000, 2016 Y 2018)”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOINFORMÁTICA

PRESENTA:

MAYRA PERLA ALEJANDRO CONTRERAS

GENERACIÓN: 2012-2017

ASESORA:

MTRA. EN GEO. LIDIA ALEJANDRA GONZÁLEZ BECERRIL

REVISORES:

ING. SANDRA LUCÍA HERNÁNDEZ ZETINA

DRA. XANAT ANTONIO NÉMIGA

TOLUCA DE LERDO, ESTADO DE MÉXICO

OCTUBRE DE 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por cada una de las bendiciones en mi vida.

A mis padres, María de la Luz y Joaquín, por todo su amor, apoyo y paciencia incondicional que me permite seguir adelante.

A mi hermana, Flor Yadira y a mis hermanos, Eleazar y Marco Antonio, por su cariño, paciencia y por ser mis mejores amigos y compañeros de vida.

A mi asesora, la Mtra. L. Alejandra González Becerril, principal colaboradora, quien con su dirección, conocimiento, apoyo, paciencia y confianza permitió no solo el desarrollo de este trabajo, sino también, terminar mi formación profesional de manera satisfactoria.

A mis revisoras la Ing. Sandra Lucía Hernández Zetina y la Dra. Xanat Antonio Némiga por sus valiosas observaciones y sugerencias.

Al Mtro. Enrique Estrada Bastida por su tiempo, enseñanza y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Y a todos los profesores, amigas y amigos de la Facultad de Geografía que colaboraron en mi formación.

¡Muchas Gracias!

ÍNDICE GENERAL

Resumen	7
Introducción.....	8
Capítulo 1. Antecedentes.....	9
1.1 Investigaciones internacionales	9
1.2 Investigaciones nacionales.....	11
1.3 Planteamiento del problema.....	14
1.4 Justificación	16
1.5 Objetivos de la investigación	17
1.5.1. Objetivo general	17
1.5.2. Objetivos específicos.....	17
Capítulo 2. Marco Teórico.....	18
2.1 Desarrollo de Software	18
2.1.1 Etapas de la metodología <i>Rational Unified Process</i>	18
2.2 Ciclo de vida	21
2.3 Estructuras de programación.....	22
2.4 Teledetección	23
2.4.1 Principios físicos de la teledetección	24
2.4.2 Espectro electromagnético	26
2.4.3 Satélite Landsat	28
2.4.4 Índice de agua de diferencia normalizada.....	30
2.5 Sistemas de Información Geográfica	31
2.5.1 Tipos de Datos.....	33
2.5.2 ArcGIS	33
2.6 Línea de costa	34
Capítulo 3. Área de estudio	35
3.1 Localización de la zona de estudio	35
3.2 Aspectos físicos	36
3.2.1 Suelos	36
3.2.2 Vegetación.....	37
3.2.3 Hidrología.....	38

3.3 Aspectos sociales	40
3.3.1 Población.....	40
3.3.2 Infraestructura	40
Capítulo 4. Metodología.....	43
4.1 Insumos y pre-procesamiento	43
4.2 Ciclo de vida iterativo e incremental	46
Capítulo 5. Desarrollo	48
5.1 Pre-procesamiento de las imágenes de satélite	48
5.2 Desarrollo del módulo en ArcMap	56
5.2.1 Inicio.....	57
5.2.2 Elaboración.....	58
5.2.3 Construcción.....	61
5.2.4 Transición.....	65
5.2.5 Producción.....	65
Capítulo 6. Resultados.....	66
Conclusiones y recomendaciones	77
Referencias bibliográficas	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de caso de uso.....	19
Figura 2. Diagrama de análisis.	19
Figura 3. Diagrama conceptual del modelo de implementación.	20
Figura 4. Diagrama conceptual del modelo de pruebas.....	20
Figura 5. Relación de la actividad, método y notación.	21
Figura 6. Diagrama de un módulo.	23
Figura 7. Componentes de un sistema de teledetección.	24
Figura 8. Elementos para adquirir información con teledetección.	24
Figura 9. Esquema de una onda electromagnética.	25
Figura 10. Espectro electromagnético.	26
Figura 11. Firmas espectrales típicas.....	27
Figura 12. Partes de un sistema de información geográfica.	32
Figura 13. Datos de tipo raster.....	33
Figura 14. Datos de tipo vector.	33
Figura 15. Línea de costa.....	34
Figura 16. Sitio web de USGS	43
Figura 17. Imágenes satelitales área Cancún y Playa del Carmen.	44
Figura 18. Flujo de trabajo en el pre-procesamiento de imágenes satelitales.	45
Figura 19. Ciclo de vida iterativo e incremental.	46
Figura 20. Flujo de trabajo del módulo.	47
Figura 21. Caso de uso generar línea de costa.....	57
Figura 22. Prototipo de la interfaz del caso de uso generar línea de costa.	58
Figura 23. Diagrama de tres dimensiones correspondiente a la arquitectura MVC.....	59
Figura 24. Diagrama mostrando traslape en los estereotipos de los objetos.	59
Figura 25. Borde, entidad y control del módulo.....	60
Figura 26. Flujo de trabajo.	61
Figura 27. Movimiento de la línea de costa en una temporalidad de 25 años.....	75
Figura 28. Puntos de muestreo.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de Landsat 5 <i>Thematic Mapper</i>	29
Tabla 2. Características de Landsat 7 <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>	29
Tabla 3. Características de Landsat 8 OLI and TIRS.	30
Tabla 4. Huracanes que han impactado en el estado de Quintana Roo.	39
Tabla 5. Categoría de hoteles.	42
Tabla 6. Imágenes de satélite adquiridas.	44
Tabla 7. Descripción del caso de uso generar línea de costa.....	57
Tabla 8. Descripción de la interfaz con base al caso de uso generar línea de costa.	58

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio.	35
Mapa 2. Tipo de suelo del área de estudio.	37
Mapa 3. Tipo de vegetación del área de estudio.....	38
Mapa 4. Red de carreteras del área de estudio.	41
Mapa 5. Líneas de costa en un área de Cancún.	74
Mapa 6. Líneas de costa en un área de Playa del Carmen.....	74
Mapa 7. Puntos de muestro en Cancún.....	75

Resumen

El objetivo del presente proyecto fue desarrollar un módulo que permita delimitar la línea de costa implementado dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), automatizando el índice de agua de diferencia normalizada propuesto por McFeeters, 1996, siendo un método que delinea las características del agua, utilizando longitudes de onda visibles –banda verde– y longitudes de onda de infrarrojo cercano –banda NIR– diferenciando entre la tierra y el agua. La metodología empleada para la generación del módulo es el proceso unificado racional (*Rational Unified Process – RUP*), retomando el ciclo de vida iterativo e incremental el cual está dividido en cinco fases: inicio, elaboración, construcción, transición y producción. El caso de estudio se llevó a cabo en el área de Cancún a Playa del Carmen por ser una región caribeña en donde los fenómenos hidro-meteorológicos son más extremos, teniendo como resultados la delimitación de la línea de costa de las imágenes procesadas para los años de 1993, 1995, 2000, 2016 y 2018.

Introducción

Uno de los principales efectos que se pueden derivar de la actividad antrópica y los fenómenos hidro-meteorológicos extremos es la afectación a la dinámica de la línea de costa ya que influyen directamente en su morfología provocando la susceptibilidad a sufrir cambios en un lapso corto de tiempo. Es por ello que diferentes instituciones realizan estudios constantes para analizar su evolución, haciendo uso de la geotecnologías entre ellas la teledetección y los SIG.

Al mismo tiempo, las aplicaciones y servicios geoinformáticos están ofreciendo soluciones en distintas áreas del conocimiento y en diferentes campos de aplicación, impulsando la creación, uso, diseño y desarrollo de herramientas geotecnológicas que faciliten y mejoren paulatinamente los múltiples procesos.

El presente proyecto de investigación aborda el desarrollo de un módulo geoinformático que permita delimitar la línea de costa a través de imágenes de satélite cubriendo una de las necesidades de instituciones que se dedican al estudio de la dinámica de ésta.

Los aspectos teóricos y metodológicos que sustentan el proyecto se retoma de las disciplinas de ingeniería de software y los principios de la teledetección ya que la primera ofrece diversos métodos para el desarrollo de un software (módulo) y la segunda apoya en el tratamiento de las imágenes de satélite. El método empleado para el desarrollo del módulo es el proceso unificado racional el cual utiliza el ciclo de vida iterativo e incremental dividido en cinco fases: inicio, elaboración, construcción, transición y producción automatizando el índice de agua de diferencia normalizada propuesto por McFeeters (1996) en XU (2006), mientras que en el tratamiento de las imágenes se eliminaron las partículas de la atmosfera y corrigieron errores de desplazamiento de las líneas de escaneo.

El área de estudio es la región del Cancún a Playa del Carmen debido a que se trata de una zona turística donde los fenómenos naturales tienen un impacto mayor debido a que la infraestructura de la zona provoca una recuperación lenta y de esta manera la dinámica de la línea de costa es más evidente. Con ayuda del módulo se redujo el tiempo y trabajo del usuario al obtener la línea de costa apoyando de esta manera a la toma de decisiones.

Capítulo 1. Antecedentes

El cambio constante de la línea de costa como consecuencia de fenómenos naturales, representan la acumulación de procesos que han empezado desde hace décadas, quizás siglos, y que éstos pueden estar relacionados con otros efectos antrópicos, tales como la reducción o inhibición de suministro de sedimentos a las costas. A nivel nacional e internacional se llevan a cabo estudios para conocer los cambios y las alteraciones de la línea de costa, los cuales incluyen a las nuevas geotecnologías para determinar estos cambios, de forma precisa y apegada a la realidad con el apoyo de la teledetección y los SIG.

A continuación se presentan diversos estudios que abordan instituciones educativas y gubernamentales, que han desarrollado propuestas para determinar la línea de costa.

1.1 Investigaciones internacionales

Pardo, *et. al.* (2008) realizan el trabajo titulado “Detección automática de cambios en la línea de costa a partir de imágenes de satélite de resolución media”, el cual tiene como objetivo generar un algoritmo que les permita conocer la línea de costa a partir de imágenes satelitales de resolución media, obteniendo así una cobertura amplia en distintos periodos de tiempo, dando pauta a obtener información suficiente para generar una tasa de cambio.

El algoritmo se desarrolló mediante dos fases: la primera extrae línea de costa a escala de pixel, categorizando la imagen en clasificación de 0 y 1 (tierra/mar) de esta manera evalúan los histogramas de cada clase, posteriormente aplicaron una serie de filtros morfológicos, logrando así una primera aproximación a la línea de costa.

En la segunda fase se utiliza el primer producto, buscando una posición a escala subpixel, definiendo un modelo matemático que permita conocer el valor de cada pixel, emplearon un binomio de quinto grado para evaluar los diferentes perfiles, manejando la relación de la distribución y coherencia en la línea de costa. Usaron imágenes del satélite QuickBird de alta resolución, las cuales se degradaron en distintos tamaños de pixel; con un valor mínimo de 2.4 m a 28.8 m el tamaño de pixel, simulando de esta manera sensores de resolución media.

Los resultados, arrojaron un error menor en relación a los estudios realizados de manera manual con respecto a la variación de la anchura de la playa, en ese mismo año, ya sea con

imágenes de alta resolución o de resolución media, existen diferencias mínimas, pero los resultados fueron igual de positivos.

Concluyendo, que el algoritmo posee gran potencial para extraer línea de costa de manera semiautomatizada, además es importante considerar las características de la zona de estudio y evaluar el tipo de sensor a utilizar.

Por otro lado, Ojeda, *et. al.* (2013) en el trabajo “Línea de costa y Sistemas de Información Geográfica: Modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa Andaluza”, proponen una metodología de modelos de datos diferentes: uno vinculado al proceso de producción y otro más complejo, el modelo de explotación.

El modelo de producción fue diseñado para hacer la digitalización más ágil mediante el uso de relaciones topológicas, bases de datos espaciales, y fotointerpretación con criterios geomorfológicos y fisiográficos, buscando normalizar y detectar errores, haciendo uso de las herramientas de ESRI para la edición y eficiencia de los datos.

Mientras que el modelo de explotación utiliza el producto del modelo de producción, maximizando la capacidad analítica sobre los datos que se introducen a partir del modelo de producción. De esta manera, el modelo de explotación almacena la base de datos para facilitar posibles actualizaciones, logrando así que se pueden utilizar insumos a diferentes escalas y de distintos lugares.

Concluyendo que el modelo es de gran utilidad para la digitalización, así como el uso de los Sistemas de Información Geográfica para el desarrollo de metodologías eficientes.

Rodríguez (2001) en su estudio “Comparación de técnicas basadas en el tratamiento digital de imágenes de satélite para la obtención de la línea de costa del delta del Ebro”, examina cinco métodos basados en el tratamiento digital de imágenes con el objetivo de determinar cuál de ellos proporciona los mejores resultados para la delimitación de la línea de costa.

El primero, analiza la banda infrarroja estudiando el componente espectral del agua mediante la interpretación de los histogramas permitiendo así determinar el valor máximo y a partir de estos conseguir una imagen binaria que posteriormente es vectorizada para obtener la línea de costa.

El segundo método está basado en los resultados del estudio de aplicación de imágenes Landsat para delimitar zonas inundadas de Philipson y Hafker (1981) en Rodríguez (2001) quienes concluían que para una simple interpretación visual bastaba con el análisis de la banda infrarrojo cercano, sin embargo para una mayor precisión se realizaba la combinación de esta banda con la banda verde, teniendo como resultado una imagen binaria que igualmente fue vectorizada.

Para el tercer método utilizó el índice de vegetación, argumentando que la utilidad del índice es mejorar la discriminación entre dos cubiertas con componentes reflectivos muy distintos, una vez determinado el valor del agua, procedió a su binarización.

En el cuarto método realiza una clasificación supervisada para determinar mejor las clases que representan y así obtener el agua y la tierra en 0 y 1. En el último método analiza los diferentes componentes para poder elegir uno que le permita diferenciar las zonas cubiertas de agua y la tierra de una forma sencilla.

Los resultados mostraron que en cada uno de los métodos, la línea de costa queda perfectamente delimitada, pero a la vez cada uno de ellos presenta una serie de inconvenientes que se deben tener en cuenta a la hora de decidir un método.

El trabajo “Cálculo del retroceso glaciario en la Isla Livingston y de su línea de costa para actualización cartografía” realizado por Copé (2014) obtiene la línea de costa como un segundo producto a partir de imágenes de satélite, las cuales deben ser georreferenciadas para la posterior digitalización de la línea de costa, una vez obtenida, se analizó el *status* multitemporal de la zona.

1.2 Investigaciones nacionales

A nivel nacional, son pocos los estudios que se tiene en materia de delimitación de línea de costa de forma automatizada, sin embargo, instituciones gubernamentales y educativas han realizado esfuerzos utilizando la teledetección y los SIG como apoyo a estudios físicos y sociales en las zonas costeras, algunos de ellos se muestran a continuación:

Márquez, *et. al.* (2010) en el estudio “Cambio en la línea de costa en la rivera maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, ¿Consecuencia del cambio global climático global?”, tienen como objetivo conocer los principales efectos de los fenómenos

hidrometeorológicos en la línea de costa de la rivera maya, cuantificando la tasa de erosión y evaluando tendencias a futuro.

Utilizaron fotografías aéreas, escala 1:50,000 e imágenes de satélites Ikonos a 4 m de resolución. El éxito del análisis del litoral se dio en gran medida a una correcta georreferenciación del material, con una mínima distorsión entre las imágenes satelitales y las fotografías aéreas, resultado de la homogeneización de las proyecciones.

El trabajo se desarrolló en ArcGIS 9.2 y Ermapper 7.1, dando como resultado la existencia de un crecimiento en diferentes puntos de la zona de estudio, evidenciando la erosión de playa, el grado de acumulación. Finalmente concluyeron que las tasas de erosión y acumulación son bajas en comparación con el sur del Golfo de México.

Otro trabajo importante a destacar es el de Palacio, (2001) en su trabajo “Detección de cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de la Isla del Carmen Campeche, mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite”, utilizó la banda del infrarrojo cercano marcando los colores contrastantes entre la tierra y el agua posteriormente aplicó una clasificación supervisada y de esta manera diferenciar entre estas dos variables y así evaluar si hay pérdida o ganancia.

Los resultados muestran la ganancia en dos periodos con tendencias acumulativas, mientras que en otros periodos presenta un proceso regresivo por la construcción de edificaciones en manglares, concluyendo que la metodología permite identificar espacial y temporalmente los procesos de erosión en la zona costera.

A pesar de que existen diversos trabajos que abordan la temática de línea de costa en sus productos finales, esta línea aún se obtiene de manera manual –digitalizando– o con procesos semiautomatizados de forma directa o indirecta. Es por ello que se ve la pertinencia de abordar trabajos que estén relacionados con la automatización de metodologías, desarrollando herramientas o módulos dentro de un SIG, acortando el tiempo y procesos en su elaboración, como a continuación se describe.

Gómez y Herrera (2010) en la tesis “Diseño y construcción de un módulo para la generación de cartodiagramas y tipogramas” tienen por objetivo el diseñar y construir un módulo para la generación de cartodiagramas y tipogramas incluidas en ArcGIS.

Para poder llevar a cabo el desarrollo del módulo se definieron dos fases: diseño de objeto y diseño de sistema. En la primera, se generó la interfaz de los objetos a partir del ambiente de programación orientada a objetos, posteriormente la segunda realizó la implementación, considerando aspectos en el diseño, ajuste a las competencias del usuario y estandarización de secuencia de tareas, además de la consistencia en los datos y cotejando eficientemente la información, así como los requerimientos de hardware y software.

El módulo fue probado con información estadística de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de una zona y temática específica, logrando su objetivo, concluyendo que la automatización es esencial para minimizar los procesos y tiempo en la elaboración de los métodos de representación –cartodiagramas y tipogramas–, en el ambiente SIG.

Por otra parte, Arreola (2006), en el proyecto “Desarrollo de módulo en IDRISI para la obtención de áreas deforestadas a partir de imágenes satelitales basadas en Landsat TM, ETM o SPOT”, tiene por objetivo el desarrollo del módulo, el cual requiere validar las imágenes de entrada, esto mediante una estructura dentro del macro modelador de IDRISI constituido por cinco etapas, todo con la finalidad de obtener un archivo de texto con las áreas deforestadas y los diferentes tipos de cobertura de vegetación. Concluyendo así que el módulo permite al usuario simplificar pasos.

Finalmente, es posible concluir que existe una relación entre los diferentes trabajos para la obtención de la línea de costa, utilizando diferentes técnicas y metodologías, buscando reducir procesos apoyándose de la teledetección y los SIG ya que es un producto importante en otros estudios de índole socioeconómico y/o físico. También coinciden en la incorporación de geotecnologías para simplificar procesos minimizando tiempos de respuesta en apoyo a la tomada de decisiones.

1.3 Planteamiento del problema

En México y en el mundo los cambios que ha sufrido la línea de costa en mayor o menor medida han sido provocados principalmente por la erosión, causados por diferentes procesos antrópicos (diques, espigones, rompeolas) y naturales (huracanes, lluvias muy variantes, elevación del nivel del mar) (Salazar-Vallejo, 1999).

Estos procesos que gobiernan la dinámica litoral son los cambios en el nivel del mar, la variación de aporte de sedimentos y los cambios de energía causados por el oleaje y corrientes que provoca la diferencias en el ancho, profundidad, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, siendo las épocas de lluvias donde los cambios son más intensos principalmente por la frecuencia e intensidad de las tormentas.

El Estado de Quintana Roo se ubica dentro de la franja con mayor incidencia de las trayectorias de huracanes, haciéndola altamente vulnerable, así como la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos en los últimos años, ocasionando la inestabilidad de las playas y de la propia infraestructura hotelera que se ha desarrollado de una manera masiva.

De acuerdo a Mc Coy Cador & Sosa Ferreira (2016), Cancún es catalogado como un centro integralmente planeado con apoyo del Fomento Nacional al Turismo (FOTANUR), para el desarrollo turístico en México, incorporándose al Plan de Desarrollo Urbano de Cancún (PDUC), documento técnico que permite la gestión del crecimiento urbano, tomando en cuenta un ordenamiento territorial.

Actualmente, la línea de costa correspondiente a Cancún, Quintana Roo, es considerada una de las zonas económicas importantes de México, debido a que se trata de un centro integralmente planeado, desarrollado para un crecimiento determinado, logrando de esta manera la distribución de inmuebles y usos de suelo específicos.

En muchas ocasiones, dichos centro rebasan las proyecciones por su inminente crecimiento, provocando un desequilibrio al desaparecer la vegetación endémica y a su vez aumentando la vulnerabilidad y reduciendo la posibilidad de recuperación natural de la costa ante la fuerza de los huracanes. Por otra parte en Playa del Carmen, Quintana Roo, bajo la influencia de Cancún, comenzaron a multiplicarse los pequeños hoteles y restaurantes rústicos transformándose en un destino turístico alternativo, siendo el inicio de una etapa de

crecimiento explosivo marcado por el surgimiento de varios asentamientos irregulares y la expansión de las actividades turísticas a lo largo de varios kilómetros de playa.

Hoy en día este proceso de expansión está lejos de concluir, es por ello que se llevan a cabo constantes estudios de monitoreo, evaluación y *status* de dichas zonas recurriendo al uso de las geotecnologías como los SIG.

En este contexto, existen instituciones que realizan estudios en zonas costeras para identificar la afectación de la erosión de playa y las variaciones de la línea de costa, debido al impacto que puede sufrir en la zona, algunas de estas son: El Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, la Unidad Académica de Procesos Oceánicos y Costero, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) entre otras.

Dichas instituciones han utilizado diferentes SIG para determinar la línea de costa a través de fotografías aéreas o más recientemente con imágenes de satélite. Sin embargo, a pesar de los avances en el manejo de estas geotecnologías, aún se sigue realizando la obtención de manera manual -digitalizando- o llevando a cabo numerosos procesos de manera semi-automatizada dentro de un SIG, aunado a la verificación con el trabajo de campo.

En el mismo enfoque la Estación de Recepción México (ERMEX) quien tiene la función de recibir, procesar y gestionar imágenes de satélite de media y alta resolución a nivel nacional en ocasiones también le es solicitado la delimitación de la línea de costa, sin embargo al igual que las demás instituciones la metodología empleada está basada en varios procesos consumiendo así tiempo y recursos.

A partir de lo anterior, se ve la inminente necesidad de agilizar los procesos en la metodología para la obtención de línea de costa que realiza EREMEX, por lo cual se propone el desarrollo de un módulo en un SIG capaz de delimitar la línea de costa de manera automatizada que ahorrando tiempo y procesos, de forma rápida y eficaz; a través de una interfaz que incluya las etapas de: inicio (insumos), proceso (tratamiento de imágenes) y el producto (línea de costa), utilizando imágenes de satélite.

De esta manera, se atiende la necesidad de las instituciones y dependencias con el desarrollo de un módulo que facilite el trabajo y apoyo a resolver otros problemas que se llevan a cabo en la zona costera, principalmente aspectos socioeconómicos y/o físicos.

1.4 Justificación

Como se ha estado mencionando anteriormente a pesar de que existen múltiples trabajos que han abordado el tema de línea de costa, (Ojeda, et. al., 2013; Pardo, et. al. 2008, entre otros), han enfocado su trabajos al análisis de la posición de la línea de costa utilizando principalmente fotografías aéreas (procesos de restitución y fotointerpretación) y en la última década imágenes de satélite de alta resolución, determinando esta línea en forma semiautomatizada.

Este proceso ha sido principalmente basado en la fotointerpretación, trabajo de campo *in situ* y utilizando varias herramientas en los diferentes SIG, lo que ha implicado que la delimitación de la línea de costa se lleve varias semanas en su procesamiento y determinación.

De acuerdo a lo anterior, se ve una necesidad inminente para realizar un procesos que agilice en tiempo los diversos pasos que se tiene que efectuar para obtener la línea de costa, ya que se carece de un módulo especializado para esta temática.

En este sentido se aprecia la viabilidad del proyecto debido a que se cuenta con los datos necesarios, las herramientas y software conveniente para el desarrollo, así como los conocimientos adquiridos por la línea de acentuación de percepción remota y cartografía. Reconociendo que es conveniente realizar este proyecto a causa de que no existe el procesamiento de datos automatizados, siendo el aporte el desarrollo del módulo que permita delimitar línea de costa de manera rápida y eficaz, reduciendo tiempo y costos de su obtención.

Del mismo modo, a consecuencia de esto, el alcance del trabajo es que puede ser implementado para cualquier zona costera de México, teniendo los insumos de las imágenes de satélite del lugar, por lo que no está limitado a un área específica.

No obstante, las principales limitaciones es el margen de error que pueda llegar a generar el módulo, en caso de que existan deficiencias en el pre-procesamiento de las imágenes ya que el módulo no logra distinguir si existe o no una corrección adecuada de los datos de entrada.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar un módulo en SIG que permita delimitar la línea de costa a través de imágenes de satélite LANDSAT en el tramo Cancún - Playa del Carmen, Quintana Roo.

1.5.2. Objetivos específicos

- 1) Adquirir y procesar las imágenes de satélite Landsat de la zona de estudio.
- 2) Diseñar y generar la interfaz de visualización con las variables y los procesos para la obtención de la línea de costa.
- 3) Comprobar el margen de error del proceso obtenido a partir del módulo con los productos de otras instituciones.
- 4) Generar las líneas de costa de Cancún–Playa del Carme de los años 1993, 1995, 2000, 2016 y 2018.

Capítulo 2. Marco Teórico

En este capítulo se describen las disciplinas que permiten explicar y sustentar la propuesta del diseño de un módulo. En este sentido, la estructura del presente capítulo está en función del enfoque de la Ingeniería de software, orientado al desarrollo de software con base a la metodología *Rational Unified Process (RUP)* al igual que los fundamentos de Teledetección, debido al uso de imágenes de satélite (insumo del módulo) y considerando los conceptos de Sistemas de Información Geográfica, por ser el ambiente de implementación.

2.1 Desarrollo de Software

La disciplina de la Ingeniería de Software propone diversas metodologías para el desarrollo de software, una de ellas es la metodología de proceso unificado racional (*Rational Unified Process – RUP*), en la cual Weitzenfeld (2005) señala que el RUP es una extensión al proceso *objectory (object factory)* que tiene sus orígenes en la década de 1980, basados principalmente en la especificación de requerimientos de un sistema mediante *casos de uso* (Fig. 1). El proceso integra diferentes aspectos, como son los ciclos, fases, flujos de trabajo, mitigación de riesgos, control de calidad y administración de proyecto. El proceso unificado considera cuatro aspectos del desarrollo: personas, proyecto, producto y proceso.

Las etapas de la metodología RUP son:

- Requisitos.
- Análisis.
- Diseño.
- Implementación.
- Pruebas.
- Documentación.

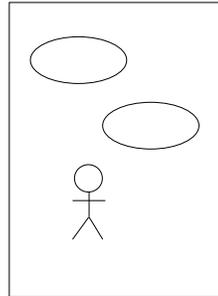
2.1.1 Etapas de la metodología *Rational Unified Process*.

2.1.1.1 Requisitos

Tiene como objetivo delimitar el sistema y capturar la funcionalidad que debe ofrecer desde la perspectiva del usuario, es el primero en llevarse a cabo y sirve de base para el desempeño de las demás etapas, es importante mencionar que cualquier cambio en la funcionalidad del sistema es más fácil de hacer y con menores consecuencias en esta etapa (Weitzenfeld, 2005). Por otro lado, Braude (2003) coincide en que el objetivo es definir y señalar la funcionalidad de sistema, indicando que los requerimientos expresan qué se supone que debe hacer una

aplicación. Así mismo, Pressman (2005) indica que es apropiado para comprender lo que realmente se requiere, analizando las necesidades, evaluando la factibilidad, validando las especificaciones y administrando los requisitos.

Figura 1. Diagrama de caso de uso.

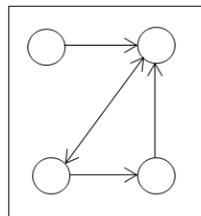


Fuente. Weitzenfeld (2005).

2.1.1.2 Análisis

En el análisis se define una arquitectura que sirva como base para el diseño posterior del sistema, de acuerdo a Pressman (2005) se tiene que desarrollar una estructura lógica del sistema capaz de resolver el problema bajo condiciones ideales, la cual debe ser estable y extensible, proporcionando al diseñador de software una representación de la información, función y comportamiento que pueda utilizar para el diseño de la interfaz y sus componentes.

Figura 2. Diagrama de análisis.



Fuente. Weitzenfeld (2005).

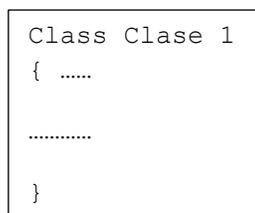
2.1.1.3 Diseño

Perssman (2005) señala que la etapa del diseño extiende la arquitectura del análisis definiendo lo necesario para alcanzar el código, aplicando de manera independiente una plataforma para la construcción, generación y pruebas de código. Weitzenfeld (2005), lo señala como un refinamiento y formalización adicional del modelo de análisis en donde se toman las consecuencias del ambiente de implementación.

2.1.1.4 Implementación

En la implementación se toma como resultado el diseño para generar el código final del sistema (fig. 3), refiriéndose a la programación, con el propósito de satisfacer los requerimientos (Braude, 2003). De acuerdo a Weitzenfeld (2005) esta traducción debe ser relativamente sencilla y directa, ya que todas las decisiones importantes han sido hechas en las etapas previas. El lenguaje de programación se define de acuerdo a las especificaciones del diseño, aunque el diseño es bastante independiente al lenguaje, todos los lenguajes tiene sus particularidades las cuales deben adecuarse durante su implementación.

Figura 3. Diagrama conceptual del modelo de implementación.

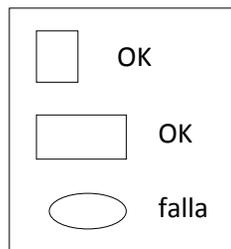


Fuente. Weitzenfeld (2005).

2.1.1.5 Pruebas

Son las responsables de revisar la calidad del sistema, validando las especificaciones así como la verificación de los resultados (fig. 4). Braude (2003) señala que debe mostrar solo la presencia de los defectos. Sin embargo, Weitzenfeld (2005) considera que es un error pensar que las pruebas son la última actividad del desarrollo, ya que no se puede lograr software de alta calidad sólo mediante pruebas finales y depuraciones, deben hacerse simultáneamente con el desarrollo del software, además las pruebas finales deben de tener como objetivo la certificación final de la calidad del producto y no la búsqueda de errores.

Figura 4. Diagrama conceptual del modelo de pruebas.



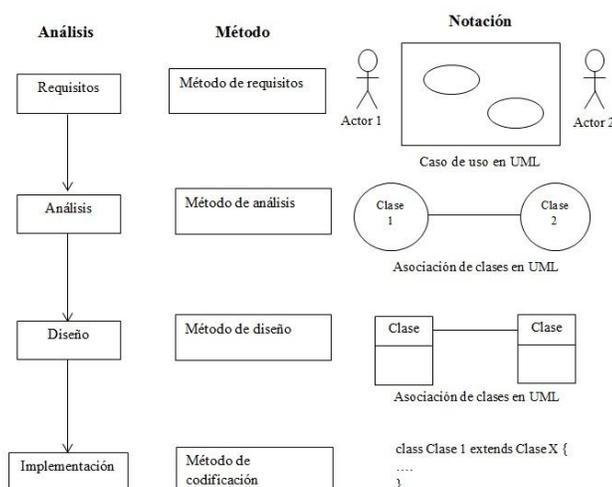
Fuente. Weitzenfeld (2005).

2.1.1.6 Documentación

La documentación se debe realizar durante la elaboración del sistema y no como una etapa final del mismo. Existen diferentes tipos de documentación que se deben generar como apoyo al sistema, cada uno tiene diferentes objetivos y está dirigido a distintos tipos de personas, desde los usuarios no técnicos hasta los desarrolladores más técnicos (Weitzenfeld, 2005).

Las etapas antes mencionadas se ilustran en la figura 5, de lado izquierdo se muestran las actividades, en la parte central están los métodos para llevar a cabo las actividades correspondientes y del lado derecho se observan los ejemplos en notación para representar el resultado de estos métodos.

Figura 5. Relación de la actividad, método y notación.



Fuente. Weitzenfeld (2005).

2.2 Ciclo de vida

La metodología RUP utiliza un ciclo de vida iterativo e incremental dividido en cinco fases: inicio, elaboración, construcción, transición y producción.

De acuerdo a Pressman (2005):

- I. La fase de **inicio** está enfocada en la comunicación del usuario y el desarrollador obteniendo así los requisitos base para la construcción del software, dichos requisitos se describen a través de *casos de usos*, identificando las características y funciones de cada uno. También permiten describir las acciones de un actor (persona, maquina o sistema) en interacción con el software.

- II. La fase de **elaboración** abarca el análisis, diseño y extensión de la arquitectura utilizando los casos de uso definidos en la etapa anterior. Es importante examinar cada proceso para evitar riesgos y así poder asegurarlos. En caso de surgir modificaciones se deben de realizar en este momento.
- III. En la fase de **construcción** se realiza la codificación del software, con base a las características y funciones definidas en etapas anteriores. Conforme los componentes están en desarrollo se ejecutan pruebas de unidad para cada uno de ellos utilizando como base los casos de uso establecidos anteriormente.
- IV. En la fase de **transición** se presenta una prueba beta a los usuarios finales para poder realizar diversas pruebas al sistema y retroalimentarlo con los reportes de defectos y posibles cambios mediante las observaciones de los usuarios. Al final de esta fase el producto final se convierte en uno utilizable.
- V. Durante la fase de **producción** se monitorea el uso del software al igual que se proporciona un soporte en ambiente operativo así como se reciben y evalúan los informes de defectos o posibles cambios.

Es probable que mientras se realizan las fases de construcción, transición y producción ya se hayan iniciado los trabajos para las siguientes etapas respectivamente. Esto significa que las cinco fases del RUP no suceden en secuencia, sino en una concurrencia por etapas.

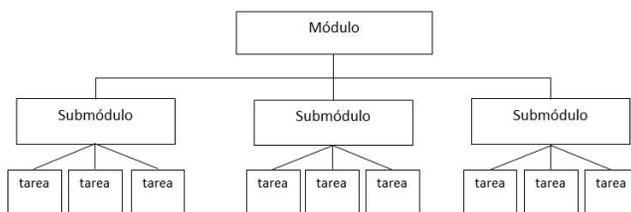
A lo largo de las fases del RUP se distribuye un flujo de trabajo que identifica las tareas necesarias para completar una acción importante. Se debe destacar que no todas las tareas identificadas para un flujo de trabajo se realizan para cualquier proyecto de software. El equipo debe adaptar el proceso para satisfacer sus necesidades.

2.3 Estructuras de programación.

Existen diversas estructuras de programación, una de ellas es la programación modular, la cual es considerada un método de diseño flexible y potente para mejorar la productividad de un programa, dividiéndolo en módulos (partes independientes) cada una de las cuales ejecuta una única actividad o tarea y se codifican de manera independiente. Cada programa contiene un módulo de dominio que controla todo lo que sucede y a su vez este contiene submódulos, los cuales ejecutan su tarea y regresa el control al módulo de dominio. Si la tarea de cada submódulo es muy compleja, se rompe en otros módulos más pequeños (Joyanes, 1996).

Dicho de otra manera, un módulo (fig. 6) hace referencia a la división de elementos, con nombres, funciones y direcciones separadas, se establece como una estructura integrada de cierto tipo de programas con operaciones específicas que el usuario requiere (Nuñez, 2007).

Figura 6. Diagrama de un módulo.



Fuente. Elaborado con base a Joyanes, 1996.

En conclusión, se considera y se retoma la metodología a partir de la Ingeniería de Software, ya que permite desarrollar herramientas (módulo) de calidad mediante la creación de una estructura de software y seguimiento mediante un proceso bien definido.

A pesar de que la implementación del módulo sea dentro de un software, es necesario considerar dichas etapas para tener éxito del mismo, logrando que cada uno de los elementos ayude a realizar un trabajo organizado y funcional.

2.4 Teledetección

La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección, la cual tiene un papel fundamental en el presente trabajo, ya que no solo engloba los procesos que permiten obtener imágenes desde el aire o espacio, sino también su posterior tratamiento (fig. 7).

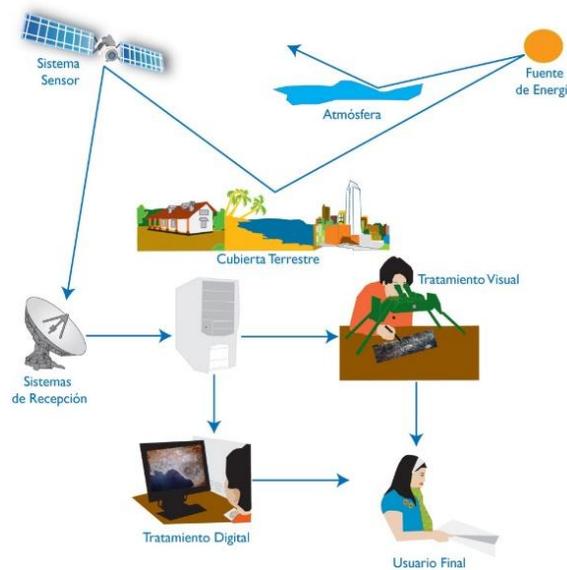
Por ese motivo, se retoma el aporte de Emilio Chuvieco (2002) quien la considera una “técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde un sensor instalado en una plataforma espacial, asumiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia”.

Mientras que Alonso (2014) considera que teledetección es la “técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material. Para que ello sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre

los objetos observados; situados sobre la superficie terrestre, marina o en la atmósfera; y un sensor situado en una plataforma; satélite, avión, entre otros”.

De manera que, para que la observación remota se pueda llevar a cabo, es necesario que entre el sensor y el objeto exista algún tipo de interacción, nuestros ojos, al igual que el sensor, solo pueden descifrar la información que un objeto envía, además la señal que emite no es originada por el mismo objeto, sino por un foco energético exterior que lo ilumina.

Figura 7. Componentes de un sistema de teledetección.

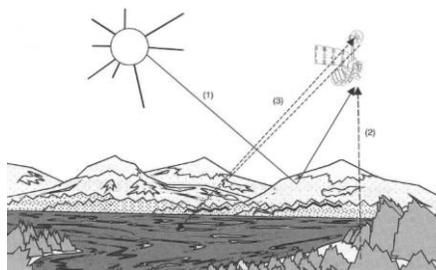


Fuente. Retomado de IGAC, 2017.

2.4.1 Principios físicos de la teledetección

Los tres principales elementos (fig. 8) para cualquier sistema de teledetección son: el sensor, el objeto y el flujo energético, adquiriendo la información a partir de sensores remotos mediante: reflexión, emisión y emisión-reflexión.

Figura 8. Elementos para adquirir información con teledetección.



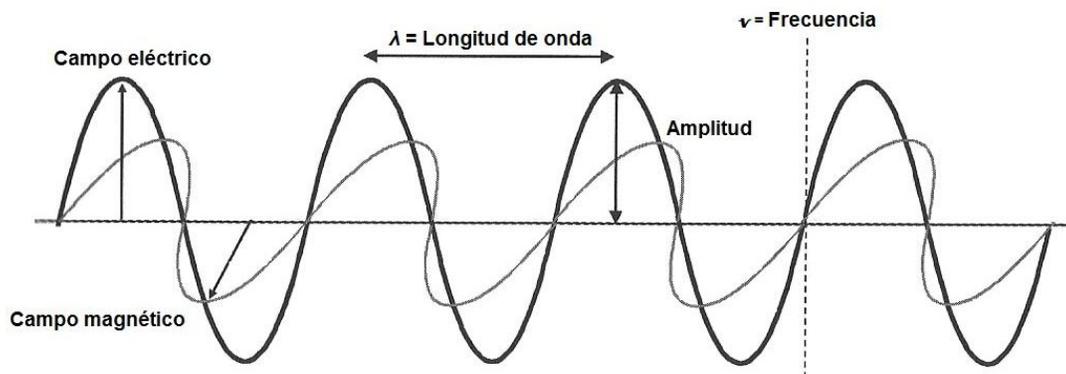
Fuente. Retomado de Chuvieco Salinero, 2002.

La reflexión es la forma más importante de la teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, iluminando la superficie terrestre, que refleja la energía en función del tipo de cubierta. El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituyen una forma de radiación electromagnética, donde la energía térmica se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción y radiación, centrándose en la radiación, la cual constituye la base de los sistemas de teledetección.

La radiación electromagnética se ha explicado a partir de dos teorías compuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell) y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo a la velocidad de la luz, teniendo dos campos de fuerza ortogonales: eléctrico y magnético (fig. 9). Las características del flujo energético pueden describirse por sus dos elementos: longitud de onda y frecuencia, por lo que a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa. De esta manera el contenido energético también es menor. Las longitudes de onda más largas son difíciles de detectar que aquellas longitudes cortas, por lo que las longitudes más largas requieren de medios de detección más sofisticados.

Figura 9. Esquema de una onda electromagnética.



Fuente. Retomado de Chuvieco Salinero, 2002.

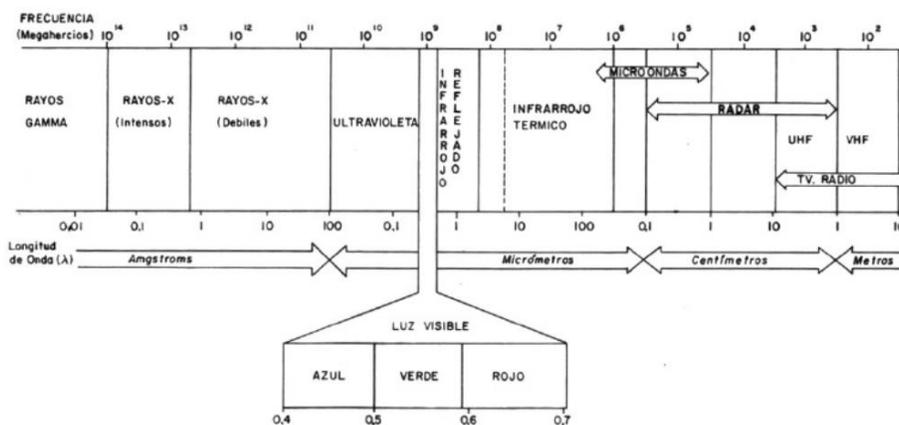
2.4.2 Espectro electromagnético

Cualquier tipo de energía radiante se puede describir de acuerdo a su longitud de onda o frecuencia. Aunque los valores de la longitud de onda son continuos, suelen establecer las longitudes de onda en una serie de bandas de acuerdo a longitudes cortas (rayos gama, rayos x) o kilométricas (telecomunicaciones). La organización de dichas bandas se denominadas espectro electromagnético (fig. 10).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, las más empleadas frecuentemente; su denominación y amplitud varía según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

- Espectro visible de 0.4 a 0.7 μm , denominado de esta manera por ser la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, el cual comprende: azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).
- Infrarrojo próximo de 0.7 a 1.3 μm , resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas de vegetación y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio de 1.3 a 8 μm , donde se entremezclan lo procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico de 8 a 14 μm , que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- Micro-ondas a partir de 1 mm, con un gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

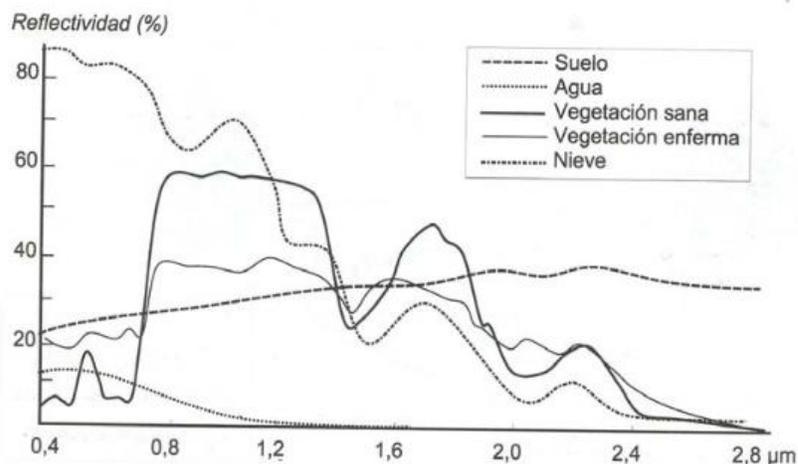
Figura 10. Espectro electromagnético.



Fuente. Retomado de Chuvieco Salinero, 2002

A partir de medidas de laboratorio, se han obtenido curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres, como se puede observar en la figura 11, algunas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras que otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo. El agua por ejemplo, absorbe la mayor parte de la energía que recibe.

Figura 11. Firmas espectrales típicas.



Fuente. Retomado de Chuvieco, 2002

Las firmas espectrales permiten seleccionar las bandas más convenientes para la detección de la cubierta terrestre, para este trabajo es importante considerar las firmas espectrales del agua y el suelo, ya que de acuerdo a sus características se puede resaltar o discriminar el agua o el suelo, identificando los factores que explican su comportamiento.

El agua en el espectro visible, específicamente en las superficies marinas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, la reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose particularmente en el infrarrojo cercano, donde ya es prácticamente nula, por esta razón la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda.

Los suelos desnudos muestran una curva espectral bastante plana y de carácter ascendente, identificando que los principales factores que intervienen son la composición química del suelo, su textura, estructura y contenido de humedad. En términos generales la reflectividad espectral resulta mayor cuando se trata de suelos secos y sin materia orgánica, mientras que el contenido de humedad hace que la reflectividad sea menor debido a que el agua absorbe la energía y se identifica en las longitudes de onda del infrarrojo cercano y medio.

2.4.3 Satélite Landsat

El Programa Landsat es una serie de satélites de observación de la Tierra, diseñado por la NASA a mediados de los 60's, dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres, gestionado por Servicio Geológico de los Estados Unidos (*United States Geological Survey - USGS*), cuenta con el registro continuo más largo en el espacio.

Actualmente sólo se encuentran activos el Landsat 5, 7 y 8, las imágenes Landsat están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, elegidas para el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas y el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones.

A continuación se describen las características principales de los satélites antes mencionados. En primer lugar, el satélite Landsat 5 lleva a bordo el sensor TM (*Thematic Mapper*), el cual cuenta con un equipo de barrido multiespectral, a una altura de vuelo de 705 km, con un tiempo de revisita de 16 días y la escena terrestre registrada es de 185 km, el horario de pase por el Ecuador es a las 9:30 a.m. horario local. Las características del sensor se muestran en la tabla 1. El satélite Landsat 7 con el sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) también posee un radiómetro de barrido multiespectral de ocho bandas capaz de proporcionar información de imágenes de alta resolución de la superficie de la tierra. Detecta radiación espectralmente filtrada en las bandas de frecuencia visible, infrarroja cercana, de onda corta e infrarroja térmica de la tierra iluminada por el sol, en una franja de 183 kilómetros de ancho, orbita a una altitud de 705 km. Las distancias nominales de muestreo de suelo o tamaños de "píxel" son 15 metros en la banda pancromática; 30 metros en las 6 bandas infrarrojas visibles, cercanas y de onda corta; y 60 metros en la banda infrarroja térmica, como se muestra en la tabla 2 (NASA, 1999).

Por lo que se refiere a Landsat 8, tiene el objetivo de proporcionar imágenes visibles e infrarrojas de alta calidad de toda la masa terrestre y áreas costeras cercanas en la Tierra, actualizando continuamente la base de datos Landsat existente. La entrada de datos en el sistema es lo suficientemente consistente con los datos archivados actualmente en términos de geometría de adquisición, calibración, cobertura y características espectrales para permitir la

comparación de la detección y caracterización de cambios globales y regionales, sus características se observan en la tabla 3 (USGS, 2015).

Tabla 1. Características de Landsat 5 *Thematic Mapper*.

Resolución espectral (μm)		Resolución espacial	Temporalidad	Resolución radiométrica
Banda 1 – Azul	0.45 – 0.52	30 m	16 días	8 bits
Banda 2 – Verde	0.52 – 0.60			
Banda 3 – Rojo	0.63 – 0.69			
Banda 4 – Infrarrojo cercano 1	0.76 – 0.90			
Banda 5 – Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75			
Banda 7 – Infrarrojo medio	2.08 – 2.35	120 m		
Banda 6 – Infrarrojo térmico	10.40 – 12.50			

Fuente: Retomado de Chuvieco Salinero (2002)

Tabla 2. Características de Landsat 7 *Enhanced Thematic Mapper Plus*.

Resolución espectral (μm)		Resolución espacial	Temporalidad	Resolución radiométrica
Banda 1 – Azul	0.441 – 0.514	30 m	16 días	8 bits
Banda 2 – Verde	0.519 – 0.601			
Banda 3 – Rojo	0.631 – 0.692			
Banda 4 – NIR	0.772 – 0.898			
Banda 5 – SWIR 1	1.547 – 1.749			
Banda 6 – TIRS 1	10.31 – 12.36	60 m		
Banda 7 – SWIR 2	2.064 – 2.345	30 m		
Banda 8 – Pancromática	0.515 – 0.896	15 m		

Fuente: Retomado de (USGS, 2015)

Tabla 3. Características de Landsat 8 OLI and TIRS.

Resolución espectral (μm)		Resolución espacial	Temporalidad	Resolución radiométrica
Banda 1 – Aerosol costero	0.435 – 0.451	30 m	16 días	12 bits
Banda 2 – Azul	0.452 – 0.512			
Banda 3 – Verde	0.533 – 0.590			
Banda 4 – Rojo	0.636 – 0.673			
Banda 5 – Infrarrojo cercano	0.851 – 0.879			
Banda 6 – SWIR 1	1.566 – 1.651			
Banda 7 – SWIR 2	2.107 – 2.294			
Banda 8 – Pancromática	0.503 – 0.676	15 m		
Banda 9 – Cirrus	1.363 – 1.384	30 m		
Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100 m		
Banda 11 – Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 – 12.51			

Fuente: Retomado de (USGS, 2015)

El presente trabajo hace uso de estos satélites por la accesibilidad de los productos y el registro continuo de imágenes de satélite, que permite realizar análisis multi-temporales; para la delimitación de la línea de costa se hizo uso de dos bandas en cada satélite, del satélite Landsat 5 y 7 las bandas 2 y 4, mientras que para Landsat 8 las bandas 3 y 5, ya que forman parte de un índice que permiten diferenciar mejor el agua y la tierra.

2.4.4 Índice de agua de diferencia normalizada.

El índice de agua de diferencia normalizada (NDWI por sus siglas en inglés) es un método que se ha desarrollado para delinear las características de aguas abiertas y mejorar su presencia en imágenes digitales de detección remota. El NDWI utiliza la radiación reflejada del infrarrojo cercano y la luz verde visible para mejorar la presencia de tales características y, al mismo tiempo, eliminar las características del suelo y de la vegetación terrestre, también puede proporcionar estimaciones de turbidez de cuerpos de agua utilizando datos digitales de teledetección.

Existen diversos métodos para la extracción de información de agua de las imágenes de satélite, que, de acuerdo con el número de bandas utilizadas, generalmente se dividen en dos categorías, es decir, métodos de banda única y multibanda.

De acuerdo a XU (2006), el método mutibanda aprovecha las diferencias de reflexión de cada banda involucrada. La relación de bandas que usa dos bandas multiespectrales, uno de ellos toma longitudes de onda visibles y se divide en las longitudes de onda de infrarrojo cercano (NIR), como resultado, la vegetación y la presencia de la tierra se suprimen mientras se mejoran las características del agua. Sin embargo, el método puede suprimir las características no hídricas pero no eliminarlas, por lo tanto McFeeters (1996) propuso el índice de diferencia de agua normalizada (NDWI) para lograr este objetivo

El NDWI se expresa de la siguiente manera (McFeeters 1996):

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

La selección de estas longitudes de onda maximiza las propiedades de reflectancia del agua, es decir:

- Maximiza la reflectancia típica de las características del agua utilizando longitudes de onda verdes.
- Maximiza la baja reflectancia de NIR por las características del agua.
- Maximiza la alta reflectancia de NIR por la vegetación terrestre y las características del suelo.

Los resultados de esta ecuación presentan el agua con valores positivos, mientras que el suelo y la vegetación terrestre tienen valores nulos o negativos. Por lo tanto, permite aplicarlo para la delimitación de la línea de costa formando parte de las funcionalidades internas del módulo.

2.5 Sistemas de Información Geográfica

Otro hecho significativo, asociado al desarrollo tecnológico y vinculado con el quehacer geográfico es el surgimiento en la década de los sesenta, de los Sistemas de Información Geográfica, es por ello que en el siguiente apartado se exponen los diversos conceptos que permiten contextualizarlo.

En este sentido, el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos *Alexander Von Humboldt* (2006), lo señala como “un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados

para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos”.

En cambio, Olaya (2014) considera que es “un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados”.

Por otro lado, Tomlinson (2007) explica que se necesita de una herramienta más flexible para explicar un SIG, un modelo holístico (fig. 12) el cual convierte datos en información útil mediante un análisis.

En otras palabras, es un sistema complejo de hardware, software especializado con el objetivo de capturar, almacenar, procesar, analizar y presentar información geográfica, cuyo fin es ayudar a las actividades humanas en donde los datos espaciales tienen un papel determinante (Instituto Alexander Von Humboldt, 2006; Olaya, 2014).

Figura 12. Partes de un sistema de información geográfica.



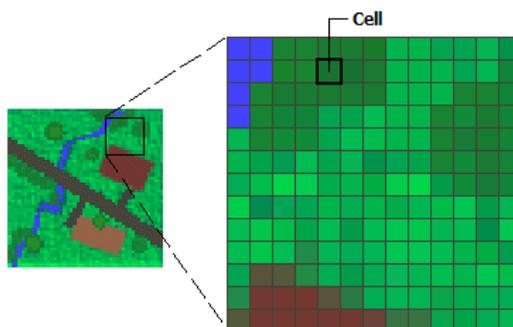
Fuente. Retomado de Tomlinson, 2007.

2.5.1 Tipos de Datos

Los Sistemas de Información Geográfica trabajan con datos de tipo raster (fig. 13) y vector, definiendo el primero como una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda, también conocida como píxel, contiene un valor que representa información como altura, magnitud, categoría o valor espectral (ESRI, 2016).

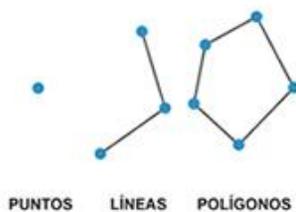
Los datos de tipo vector (fig. 14) usan figuras de la geometría convencional: puntos, líneas, curvas, polígonos, círculos, elipses o volúmenes que representan entidades del mundo real (Moreno, 2006).

Figura 13. Datos de tipo raster.



Fuente. ESRI, 2016.

Figura 14. Datos de tipo vector.



Fuente. Landero, 2012.

2.5.2 ArcGIS

ArcGIS es un sistema de información geográfica estándar de la industria ESRI, que recopila, organiza, administra, analiza, comparte y distribuye información geográfica, ArcMap es la aplicación principal de ArcGIS, la cual, mediante el lenguaje de programación Python permite automatizar tareas de geoprocésamiento, ahorrando tiempo y esfuerzo en la creación de herramientas personalizada que atendiendo las necesidades del usuario (Pimpler, 2013).

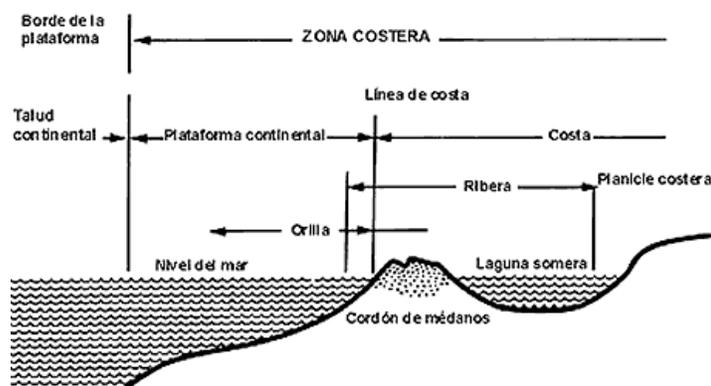
2.6 Línea de costa

Para el desarrollo del módulo en ArcMap, el caso de aplicación es en tema de línea de costa, que de acuerdo a Hubp (2011) es el “límite entre la tierra firme y las aguas de cuencas de mares y lagos, convencionalmente se traza por el nivel medio de mareas”, Valadez (2013) considera que es la división entre el límite entre el agua y la playa, mientras que para Valderrama *et al.* (2016), es “el límite visible entre el océano y el continente”, es decir, se considera línea de costa (fig. 15) al límite entre la tierra firme y el agua del océano (Lugo, 2011; Valadez, 2013; Valderrama *et al.*, 2016).

Ahora bien, el límite real entre la tierra firme y el mar se encuentra en constante transformación a causa de las oscilaciones del nivel de las aguas por la influencia de las mareas, de los vientos, de las corrientes del oleaje, y por el avance o retroceso relativos de la tierra firme (Hubp, 2011). Ordaz *et al.* (2016) también señalan que la línea de costa por su naturaleza y litologías se convierten en sitios muy susceptibles a sufrir cambios en un tiempo de lapso corto, el oleaje, las mareas, los constantes cambios susceptibles del nivel del mar al igual que la actividad antropica influyen en la dinámica de la línea de costa.

Puesto que la actividad antrópica contribuye a modificar la zona litoral desde el momento que se construyen vías de comunicación, infraestructura, hoteles, muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina alterando el transporte litoral y la morfología de la playa (Torres *et al.*, 2010).

Figura 15. Línea de costa.



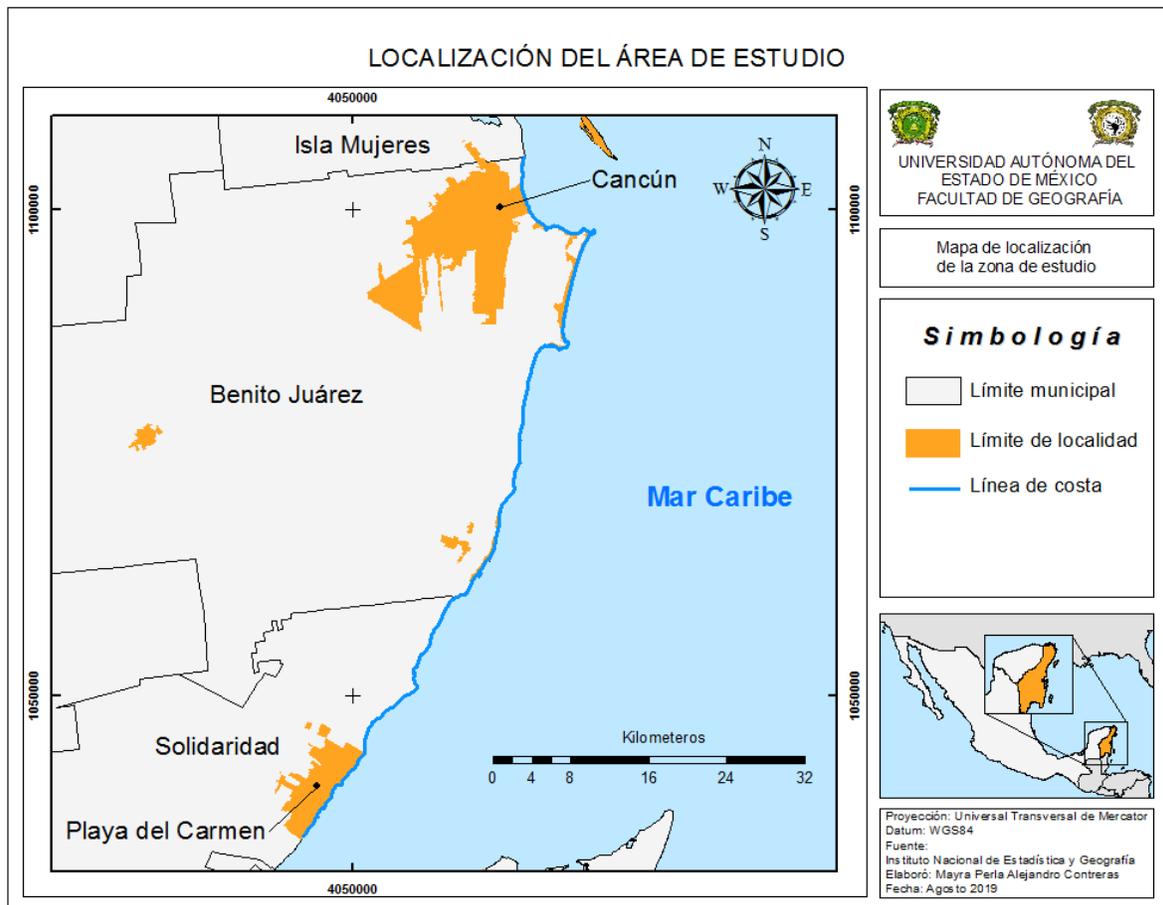
Fuente: Retomado de Cifuentes Lemus, Torres García, & Frías M., 2013.

Capítulo 3. Área de estudio

3.1 Localización de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el estado de Quintana Roo, México (mapa 1) en el litoral, entre las localidades de Cancún (municipio de Benito Juárez) y Playa del Carmen (municipio de Solidaridad), su ubicación abarca desde 21° 10' N -87° 0' O a 20° 37' N -87° 0' O, correspondiente a una distancia 71.2 km.

Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia, con base al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

3.2 Aspectos físicos

Los elementos que se muestran a continuación, son retomados debido al impacto e importancia que tienen en la modificación y dinámica de la línea de costa a través del tiempo.

3.2.1 Suelos

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, las principales características de los suelos dominantes que se encuentran presentes en el estado de Quintana Roo corresponden al tipo de suelo: letosol, luvisol, solochaks, gleysol, regosol, histosol y arenosol, en particular en la zona de estudio predomina el tipo leptosol, solonchak y arenosol (ver Mapa 2), esto de acuerdo al mapa edafológico de INEGI, del conjunto nacional de datos vectorial edafológico del 2005 escala 1: 250 000 serie II.

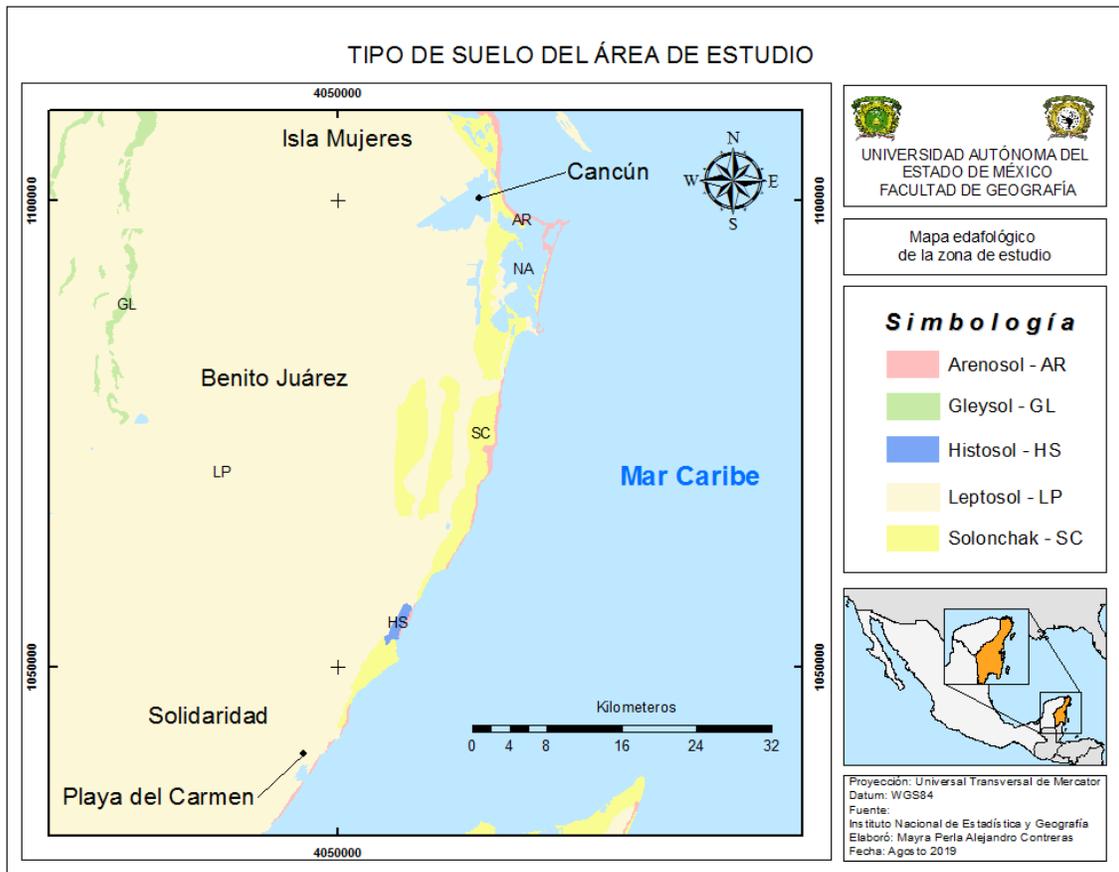
El tipo de suelo leptosol es el más extenso en Quintana Roo ocupando casi el 86% de esta área. Los suelos son originados por la acumulación de materia orgánica, humus sobre la superficie mineral y por la mínima solución y meteorización de las rocas calcáreas subyacente, su modo de formación *in situ.*, yacen sobre rocas calcáreas que afloran frecuentemente. Son suelos muy ricos en materia orgánica por lo que desarrolla fundamentalmente la selva mediana subperennifolia (Servicios Ambientales y Jurídicos, S.C., 2011).

Por su parte, los solonchak, son suelos con enraizamiento limitado y están o han estado fuertemente influenciados por el agua (Intagri, 2017), tienen una alta concentración de sales solubles en algún momento del año, se encuentran esencialmente en las zonas climáticas áridas y semiáridas y regiones costeras en todos los climas (FAO, 2008).

Los arenosoles comprenden suelos arenosos, incluyendo tanto suelos desarrollados en arenas residuales después de la meteorización *in situ* de sedimentos o rocas ricos en cuarzo, y suelos desarrollados en arenas recién depositadas tales como dunas en desiertos y tierras de playas, las geoformas varían desde dunas recientes a cordones de playa, la vegetación principalmente herbácea varía desde vegetación de desierto hasta vegetación dispersa, (FAO, 2008).

Como se puede observar en el mapa 2, el área de estudio está conformada en su mayor parte por el tipo de suelo de solonchak, arenosoles, con pocas cantidades de leptosol y histosol.

Mapa 2. Tipo de suelo del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia, con base al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

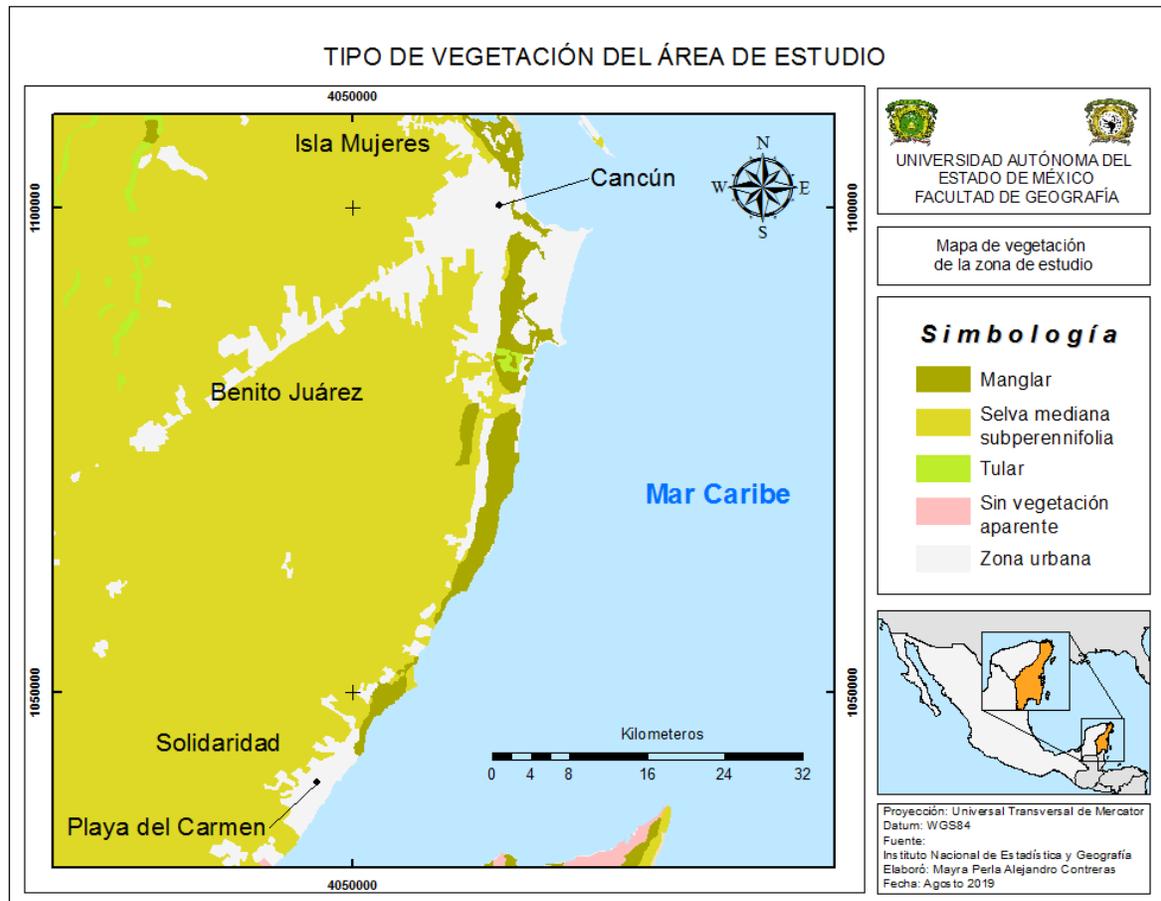
3.2.2 Vegetación

Los tipos de vegetación que se encuentran en la zona de estudio, de acuerdo a la Carta de Vegetación y uso del suelo, serie IV del INEGI del 2004, corresponde con selva mediana subperennifolia, este tipo de vegetación se desarrolla sobre suelos tipo leptosol y predomina con vegetación secundaria arbórea, otro tipo de vegetación son los manglares (mapa 3).

De acuerdo al Servicios Ambientales y Jurídicos (2011), los manglares son una comunidad vegetal eminentemente costera, los cuales se encuentran también al margen de las lagunas y colindan con las dunas costeras, estos se desarrollan en suelos planos, con drenaje deficiente, ricos en materia orgánica y susceptibles a intrusión de agua marina. El manglar está conformado por plantas facultativas que poseen adaptaciones morfológicas y fisiográficas que les permiten tolerar la alta salinidad, permitiendo así colonizar terrenos inundados con agua salobre.

La vegetación juega un rol importante en el control de la erosión costera, particularmente en los litorales donde se estabiliza y preserva el área que captura la arena arrastrada por el viento, también ayuda a prevenir la pérdida del suelo, además la vegetación nativa previene la erosión de las playas, siendo ésta parte de la primera línea de defensa contra la erosión excesiva del litoral.

Mapa 3. Tipo de vegetación del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia, con base al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

3.2.3 Hidrología

Por lo que se refiere a la hidrología de la zona de estudio, ésta se caracteriza por la carencia de corrientes superficiales de agua debido a la naturaleza del terreno y al relieve ligeramente plano que presenta alta permeabilidad, al no existir flujos superficiales permanentes, la proporción del agua pluvial que no se pierde por evaporación, se filtra al suelo,

proporcionando una saturación de las copas superficiales y por consiguiente su incorporación al acuífero subterráneo.

A causa de lo anterior, el cuerpo de mayor tamaño, en la zona de estudio, es la laguna Nichupté; en la porción continental de Cancún, así mismo, los cenotes y aguadas de la zona de estudio, de acuerdo al SIPSE (2017) son de 29 cenotes (pozos profundos naturales) y 46 aguadas (pozos artificiales poco profundos) identificados hasta el momento en Cancún, mientras que en Playa de Carmen solo se tiene un registro de 10 cenotes.

Otro punto a considerar son los fenómenos meteorológicos constantes en la zona de estudio ya que diversos estudios documentan que los vientos fuertes, ciclones tropicales, huracanes y otros fenómenos meteorológicos afectan de manera reiterada y drástica las zonas costeras, provocando daños severos en la línea de costa y a su vez propiciando una recuperación lenta por el impacto constante de éstos. En la tabla 4 se encuentran los huracanes que han pegado en la zona de estudio del año 1995 a 2012.

Tabla 4. Huracanes que han impactado en el estado de Quintana Roo.

Nombre	Categoría	Fecha
Opal	4	Octubre 1995
Roxana	3	Octubre 1995
Mitch	5	Octubre 1998
Keith	4	Septiembre 2000
Isidoro	3	Septiembre 2002
Emily	5	Julio 2005
Wilma	5	Octubre 2005
Dean	5	Agosto 2007
Ernesto	2	Agosto 2012

Fuente: Elaboración propia con base a diversas fuentes.

3.3 Aspectos sociales

3.3.1 Población

De acuerdo al Sistema de Integración Territorial (ITER) 2010 del INEGI, la población correspondiente al municipio Benito Juárez es de 661,176 habitantes, distribuida en 554 localidades, en el caso específico de la localidad de Cancún corresponde al 95% de habitantes del municipio, distribuida local mente en 51% de hombres y 49% de mujeres, por otro lado, el municipio de Solidaridad presenta 159,310 habitantes, cuenta con 227 localidad, del cual Playa de Carmen corresponde el 94% de población del municipio, con 52% de hombres y 48% de mujeres.

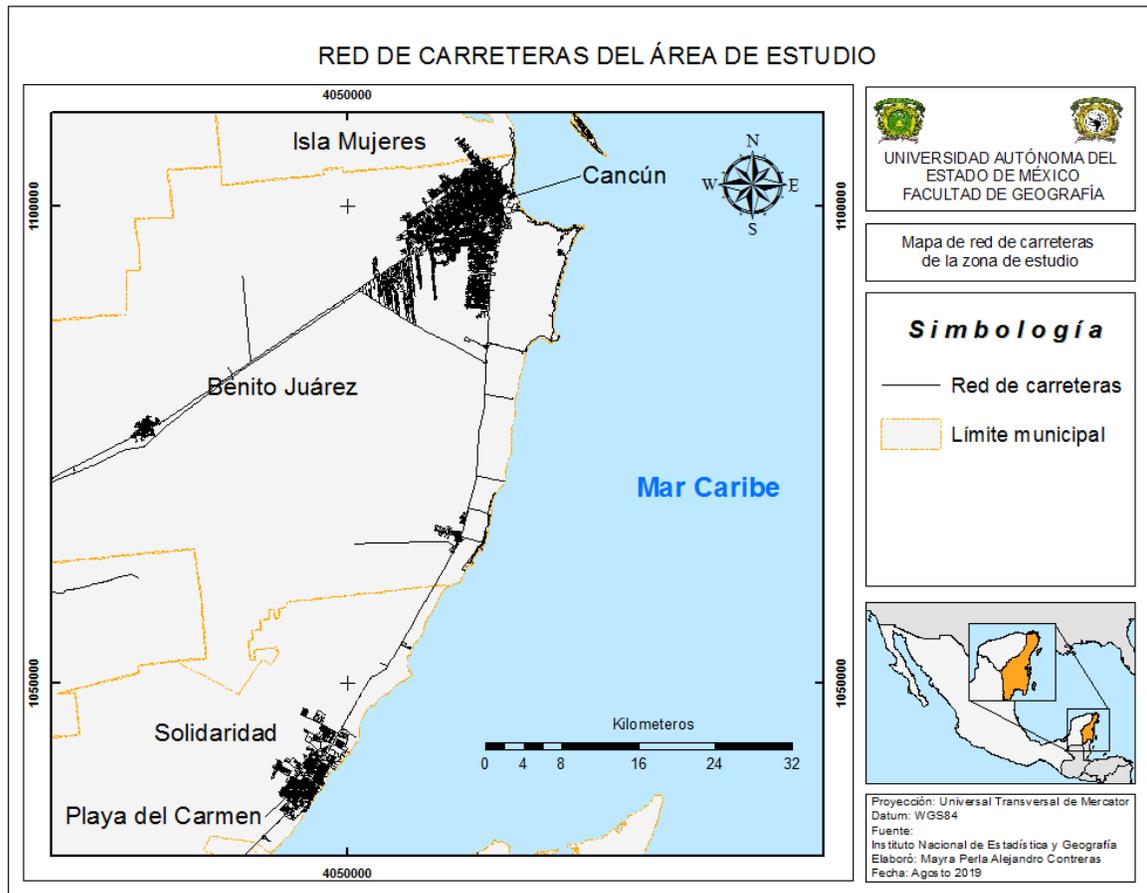
3.3.2 Infraestructura

La zona de estudio forma parte del corredor turístico de la Riviera Maya, considerado como destino turístico de talla internacional, certificado por la Organización Mundial del Turismo con una infraestructura predominante en: campos de golf, espacios protegidos, infraestructura de transporte, zonas hoteleras, entre otras (SECTUR, 2013).

3.3.2.1 Vías de comunicación

De acuerdo al INEGI, la longitud de red carretera en el estado de Quintana Roo consta de 5503 km, entre tramos federales, estatales y caminos rurales (mapa 4); el tramo carretero que se tiene entre las ciudades de Cancún y Playa del Carmen es de 68 km de acuerdo a la secretaría de comunicaciones y transportes (2018), siendo una carretera federal. Asimismo, el estado cuenta con tres aeropuertos internacionales, ubicados en Cancún, Cozumel y Chetumal, además de diversas pistas de aterrizaje y helipuertos. Lo correspondiente al transporte marítimo de acuerdo al APIQROO (2019) se tiene seis puertos: Puerto Morelos, Islas Mujeres, Cozumel, Puerto Juárez, Chetumal, Bacalar, de los cuales dos de ellos se encuentran en la zona de estudio ya que la movilidad de personas y mercancías tiene influencia en esta área.

Mapa 4. Red de carreteras del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia, con base al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

3.3.2.2 Hoteles de la zona de estudio

El estado de Quintana Roo se ha posicionado como uno de los destinos predilectos de la región del Caribe Mexicano, debido a su riqueza de los recursos naturales, como sus arrecifes, parques, ríos subterráneos, manglares, zonas arqueológicas y una amplia gama de tradiciones culturales esto de acuerdo al Gobierno del estado de Quintana Roo (2017-2018). En lo que corresponde a la infraestructura hotelera, Cancún cuenta con 188 hoteles de los cuales 90 hoteles son considerados de playa, mientras que Playa del Carmen tiene 482 hoteles con 77 en la zona de playa. De acuerdo a Turista Quintana Roo (2018), se presentan las categorías de los hoteles de la zona de estudio en la tabla 5.

Con la infraestructura hotelera y los paisajes que se pueden encontrar a lo largo de la costa, se tiene un número importante de playas privadas (11) dentro de los grandes hoteles y ocho

públicas manejadas por el municipio de Cancún, mientras que en Playa del Carmen se tienen registradas 19 playas entre públicas y privadas.

Tabla 5. Categoría de hoteles.

Categorías		Hoteles	
		Cancún	Playa de Carmen
1	Gran Turismo	8	11
2	★★★★★	43	20
3	★★★★☆	49	40
4	★★★☆☆	43	68
5	★★☆☆☆	3	5

Fuente. Retomada de Turista Quintana Roo (2018).

Los aspectos físicos y sociales son elementos que de una u otra forma ha impactado en la dinámica de la línea de costa, por un lado, la modificación por el ser humano a partir de la infraestructura turística y por otro lado, los fenómenos naturales propios de la zona costera que la modifican.

Capítulo 4. Metodología

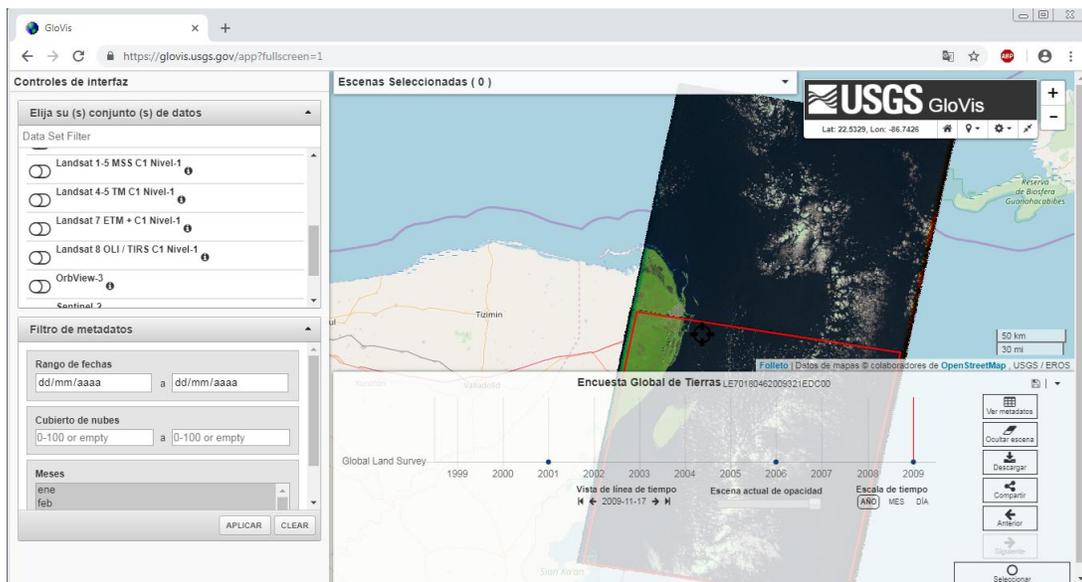
Las metodologías propuesta para lograr el objetivo del presente proyecto converge en dos disciplinas, la Teledetección y la Ingeniería de Software, en la primera haciendo uso de las técnicas que permiten mejor la visibilidad en las imágenes de satélite, mientras que en la segunda, se hace uso del ciclo de vida iterativo e incremental, permitiendo el desarrollo del módulo.

4.1 Insumos y pre-procesamiento

Los insumos que se utilizaron fueron imágenes de satélite Landsat, descargadas de manera gratuita del sitio web: <https://glovis.usgs.gov/> (Fig. 16) a cargo del USGS.

Se adquirieron imágenes de Landsat 5, 7 y 8, siendo seleccionadas considerando un mínimo del 30% de nubosidad y la calidad, con la finalidad de tener imágenes con mejor claridad visual debido a que son el insumo del módulo.

Figura 16. Sitio web de USGS



Fuente: Retomadas del sitio web: <https://glovis.usgs.gov/>,

En la tabla 6 se describe de manera general las fechas, el tipo de satélite y el número de bandas por imagen descargada. La figura 17 muestra la imagen de satélite del 21 de Diciembre de 1995.

Tabla 6. Imágenes de satélite adquiridas.

Fecha de adquisición		Bandas	Satélite
15 de Diciembre de 1993	2 Imágenes	7	Landsat 5
21 de Diciembre de 1995			
10 de Diciembre de 2000		8	Landsat 7
07 de Julio de 2016	1 Imagen	11	Landsat 8
30 de Agosto de 2018			

Fuente. Elaboración propia con base a las imágenes obtenidas de la USGS

Figura 17. Imágenes satelitales área Cancún y Playa del Carmen.



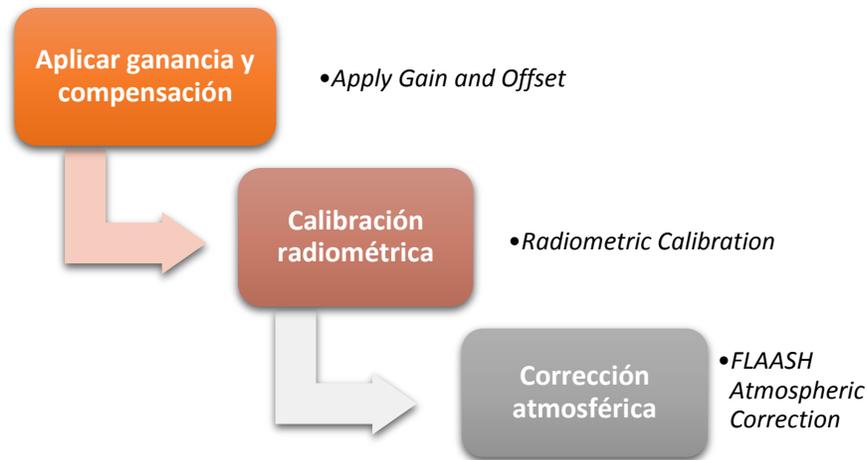
Fuente: Adquirida de manera gratuita del USGS

ENVI es el software utilizado en el pre-procesamiento de las imágenes ya que es utilizado por profesionales de SIG, científicos de percepción remota y analistas de imágenes para extraer información significativa de las imágenes, esto debido a que ofrece una *suite* robusta de herramientas y flujos de trabajo automatizados que permiten integrarse de manera sencilla en ArcGIS.

El método utilizado en el pre-procesamiento (Fig. 18) de las imágenes está basado en técnicas que permite corregir y mejorar las imágenes satelitales con la finalidad de eliminar las

partículas atmosféricas y errores presentes en las imágenes, lo que nos permite tener un mejor insumo para el módulo.

Figura 18. Flujo de trabajo en el pre-procesamiento de imágenes satelitales.



Fuente: Elaboración propia.

- El primer proceso realizado fue una corrección de ganancia y compensación debido a que las especificadas por el sensor no son perfectas. Lo que realiza este proceso es identificar las líneas de escaneo incorrectas mientras que se le asignan los valores adecuados, por lo cual es necesario contar con los datos requeridos, en el caso del satélite Landsat ya cuenta con una corrección previa pero el software no la identifica por lo cual es necesario realizar este proceso.
- Posteriormente, se aplicó una corrección radiométrica la cual consiste en la conversión de los valores digitales a valores de radiancia, es decir, obtener valores de intensidad homogénea corrigiendo imperfecciones presentes en los píxeles, generados por fallos o alteraciones de los propios sensores.
- Finalmente se aplicó una corrección atmosférica, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor que se ve reflejado en la imagen, esto debido a la interacción del sensor con la atmósfera. Una vez aplicado este proceso se logra mejorar la calidad visual de la imagen así como eliminar el componente intrusivo de la atmósfera.

Para cubrir el área de estudio es necesario, en algunas fechas, contar con dos imágenes satelitales, por dicha razón se realizó un mosaico, una vez generado se efectuó un recorte debido a que todo aquello fuera de la zona de estudio no es de utilidad.

Para realizar el mosaico se utilizó la herramienta *Seamless Mosaic* y *Subset Data from ROIs* fue utilizado para realizar un recorte en la zona de estudio.

4.2 Ciclo de vida iterativo e incremental

El software utilizado para la implementación y desarrollo del módulo se llevó a cabo dentro del ArcMap, siendo ésta una aplicación de ArcGIS, el cual permite, entre algunas cosas, analizar, organizar y administrar geodatabases, al igual que proporciona la posibilidad para desarrollar geoprocесamientos de acuerdo a las necesidades de diversos los usuarios mediante un lenguaje de programación (Python).

La metodología propuesta para poder llevar a cabo del desarrollo del módulo está basada en el proceso unificado (*RUP*) el cual utiliza el ciclo de vida iterativo e incremental (Fig. 19) integrado por cinco fases, y es retomada por la flexibilidad para adaptarse a las necesidades del proyecto.

Figura 19. Ciclo de vida iterativo e incremental.

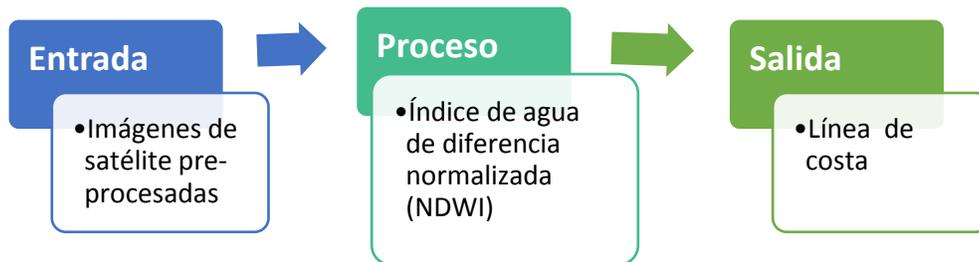


Fuente. Elaboración propia con base a Pressman (2005).

La primera etapa integra los requisitos, en la segunda se lleva a cabo el análisis y diseño del módulo, la tercera fase realiza la codificación y las pruebas corren a cargo de la transición donde se presenta una versión beta del software, finalmente el monitoreo no se describe en la metodología RUP, pero sí forma parte del ciclo de vida y es desempeñado en la producción.

El flujo de trabajo del módulo se observa en la figura 20, donde dentro de los requisitos se integra el pre-procesamiento de las imágenes de satélite (corrección de ganancia y compensación, calibración radiométrica y corrección atmosférica) permitiendo obtener el isumo del módulo, posteriormente el proceso integra el cálculo del índice de agua de diferencia normalizada al igual que la conversión de datos de tipo raster a vector y finalmente se genera la línea de costa, siendo el producto de salida.

Figura 20. Flujo de trabajo del módulo.



Fuente. Elaboración propia.

Capítulo 5. Desarrollo

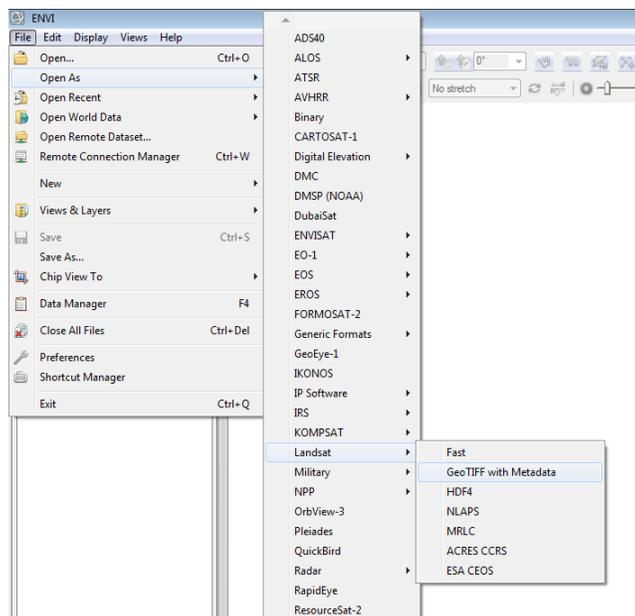
5.1 Pre-procesamiento de las imágenes de satélite

Las imágenes procesadas fueron las del satélite Landsat 5 y 7 para los años 1993, 1995 y 2000 debido a las características de los sensores, mientras que las correspondientes a Landsat 8 para los años 2016 y 2018 solo se realizó el recorte del área de estudio.

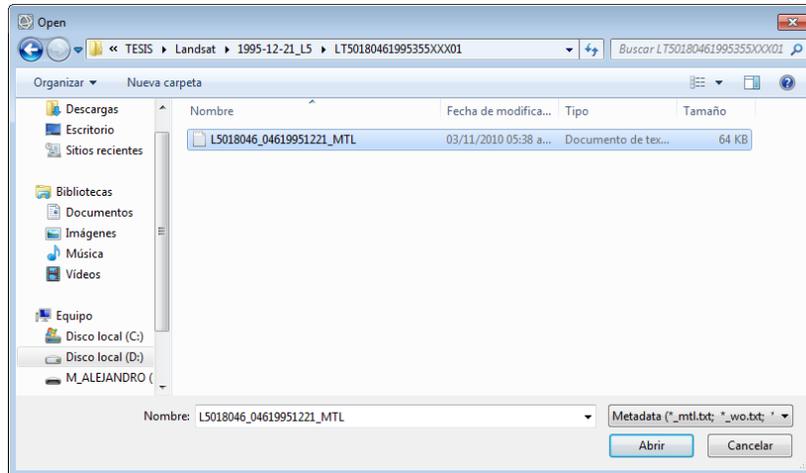
Es importante mencionar que la ocho imágenes obtenidas de los satélites son multiespectrales, ya que la metodología para obtener la línea de costa indica trabajar con las bandas verde (G) e infrarrojo cercano (NIR).

Como ya se mencionó anteriormente el procesamiento de las imágenes de satélite se llevó a cabo en el software ENVI, cargando la imagen desde el menú:

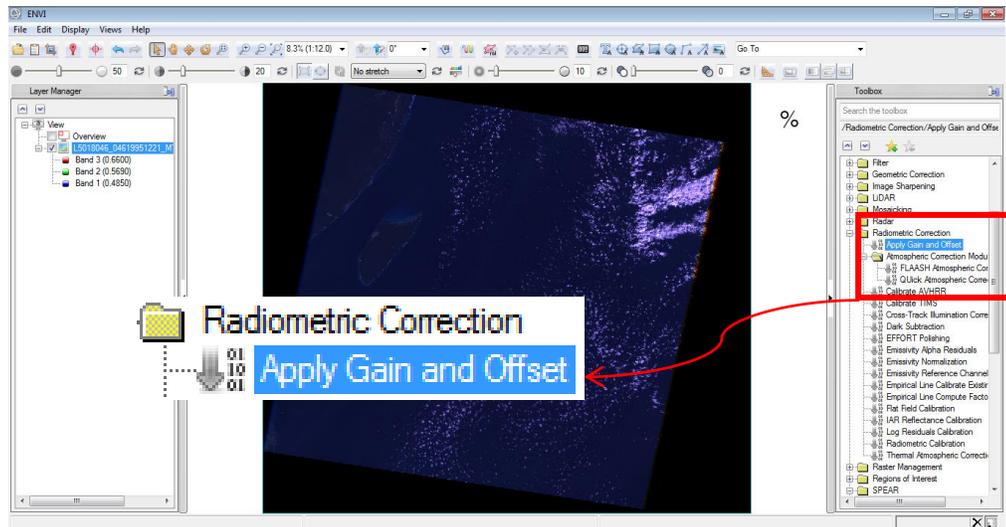
File --> Open As --> Landsat --> GeoTIFF with Metadata, como se muestra a continuación:



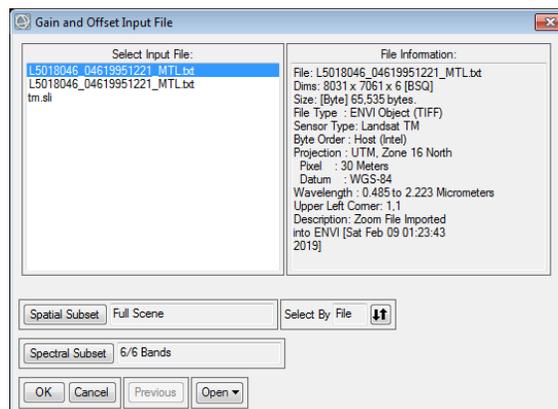
Es importante mencionar que esta opción permite abrir los metadatos de las imágenes de satélite, facilitando la identificación, para su posterior procesamiento de las imágenes.



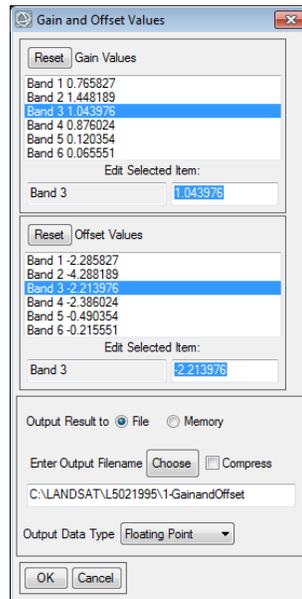
Una vez cargada la imagen se aplicó la herramienta de ganancia y compensación ubicada en: *Toolbox --> Radiometric Correction --> Apply Gain and Offset.*



La ventana que se despliega solicita seleccionar las bandas con las que se desea trabajar y para este caso fueron las multiespectrales.



Ahora bien, una vez seleccionadas las bandas, la herramienta solicita ingresar de manera manual los valores de ganancia y compensación, por lo cual es necesario conocerlos previamente, en el caso del satélite Landsat se tienen los datos de la ganancia y compensación en los metadatos y a la hora de ingresar la imagen los reconoce automáticamente y solo se necesita seleccionar el correspondiente y asignar el nombre de salida al proceso.



Las imágenes que aparecen a continuación se observan el cambio entre la imagen original (izquierda) a la ya procesada (derecha).

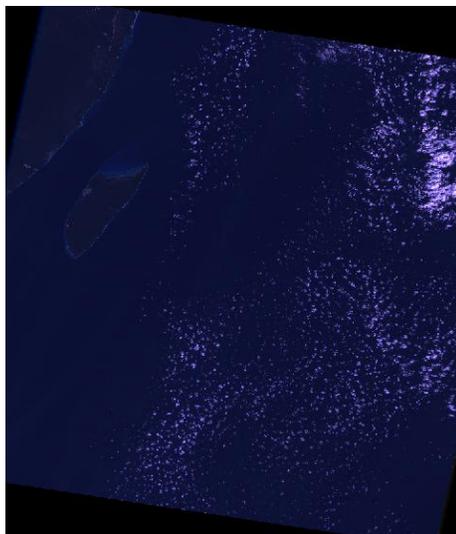


Imagen original

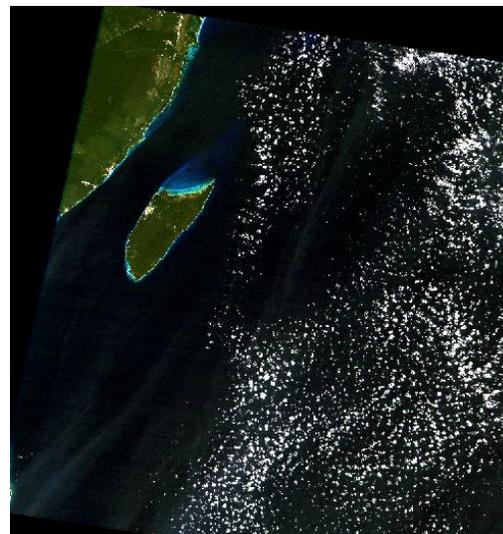
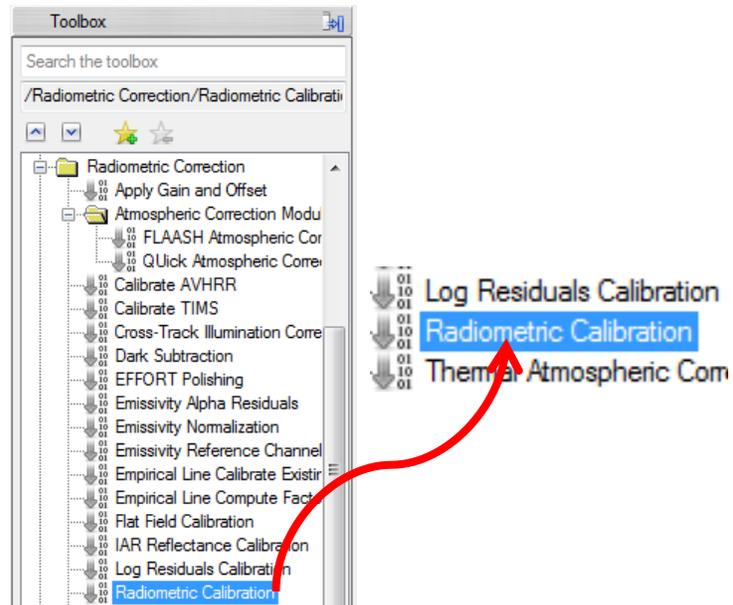
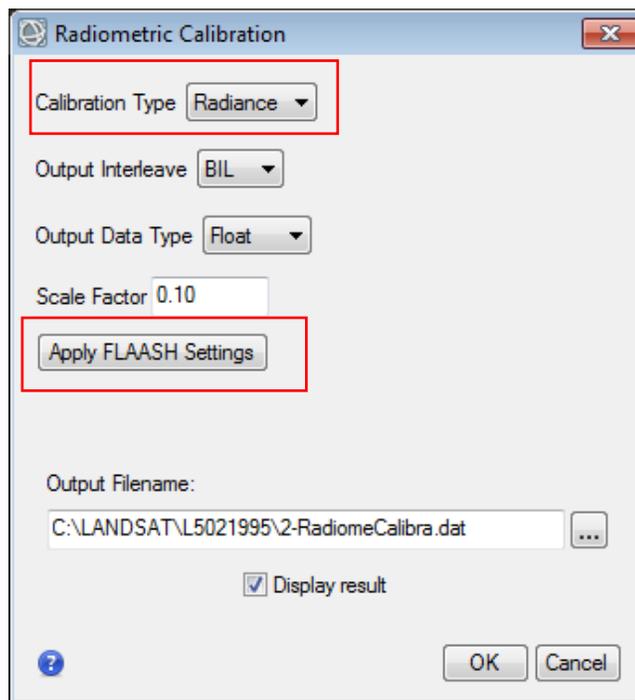


Imagen procesada

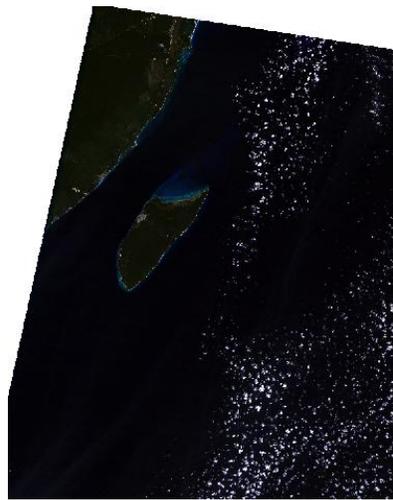
El siguiente proceso, calibración radiométrica, hace uso de la herramienta *Radiometric Calibration*, ubicada en: *Toolbox --> Radiometric Correction --> Radiometric Calibration*, siendo necesario para la conversión de valores digitales a valores de radiancia.



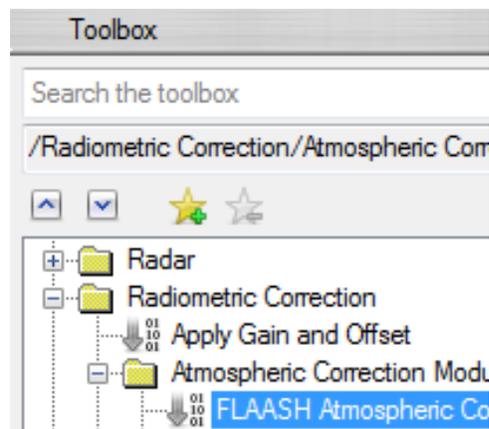
En la ventana de *radiometric calibration*, se selecciona la opción de calibración *Radiance* y la opción *Apply FLAASH Settings*, generando un archivo de salida con extensión *.dat*.



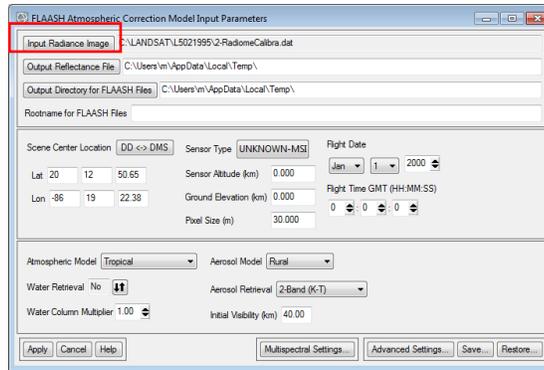
Obteniendo como resultado una mejor visualización de la imagen original, una vez convertidos los valores, como se observa a continuación.



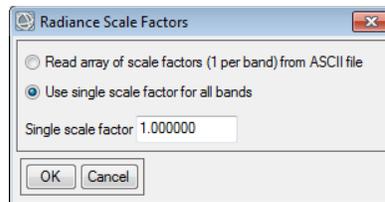
Al producto obtenido con el proceso anterior, se le realiza una corrección atmosférica con la herramienta de *FLAASH Atmospheric Correction*, ubicada en: *Toolbox --> Radiometric Correction --> FLAASH Atmospheric Correction*, que permite eliminar los componentes atmosféricos presentes de la imagen.



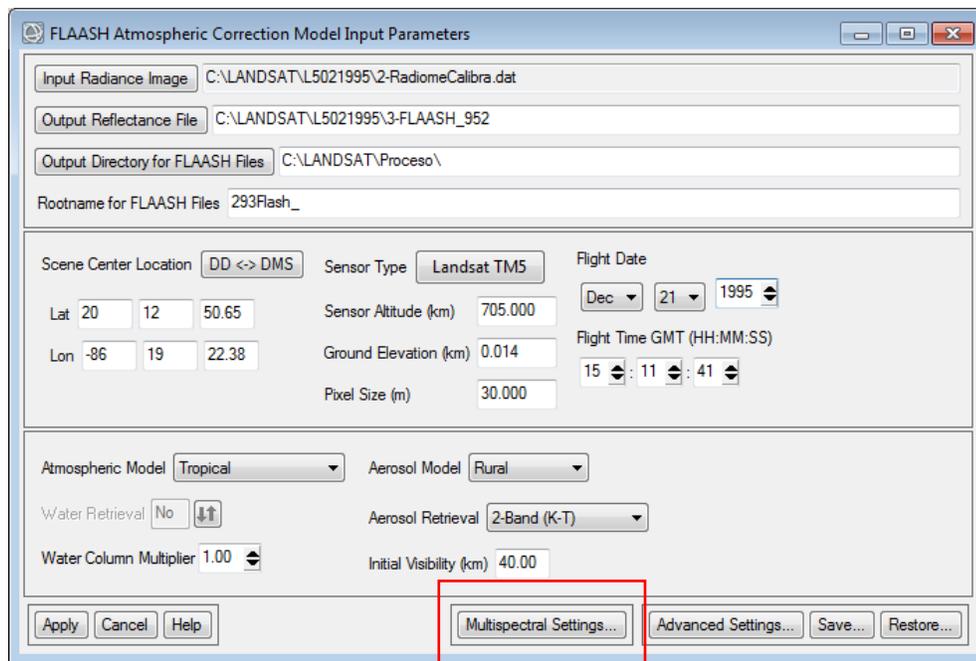
La herramienta está dividida en tres secciones y varios menús en la parte inferior, la primera sección solicita el archivo de entrada, nombre de salida, una carpeta temporal de trabajo y el nombre de los archivos temporales generados, la segunda sección solicita los datos generales del sensor como: la hora y fecha, altura del sensor, elevación promedio de la zona, latitud y longitud; algunos datos son retomados de los metadatos de la imagen de manera automática, otros se tienen que asignar con base al tipo de satélite, como se muestra a continuación:



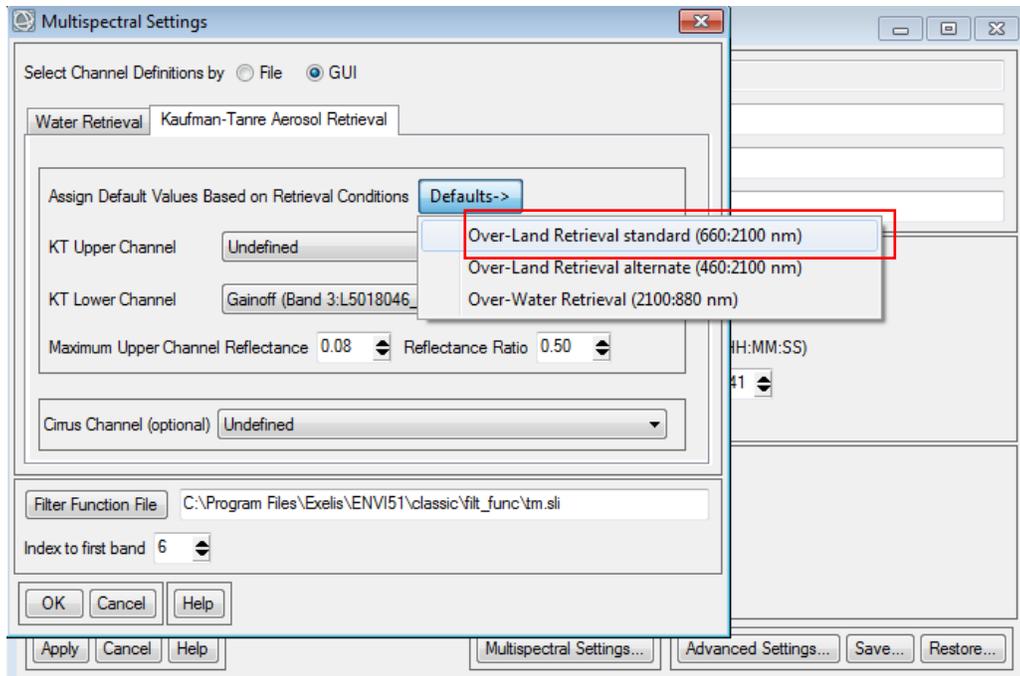
El archivo de entrada para este proceso es el resultado del proceso anterior, una vez ubicado, en la ventana que arroja se selecciona la segunda opción.



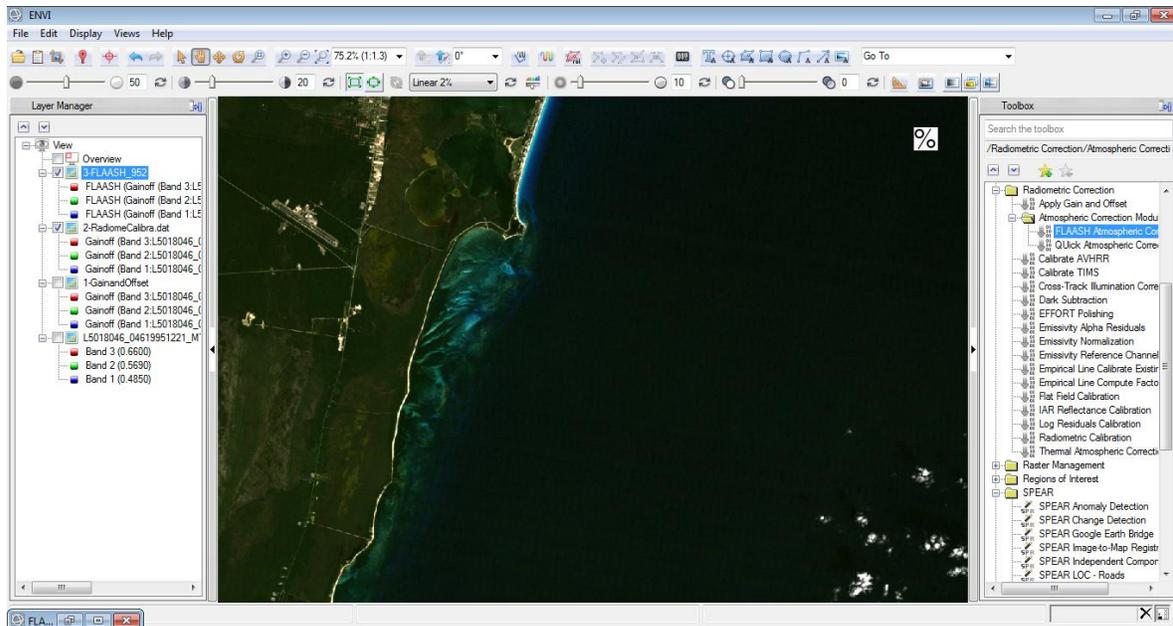
Los parámetros de la tercera sección de la herramienta se asignan en relación a la zona y la ubicación de la imagen.



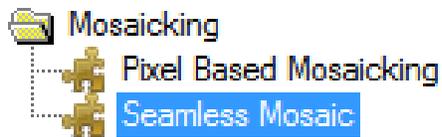
Finalmente, en el menú Multiespectral se elige la opción estándar, siendo esta la que aplica para el caso de la parte continental y agua.



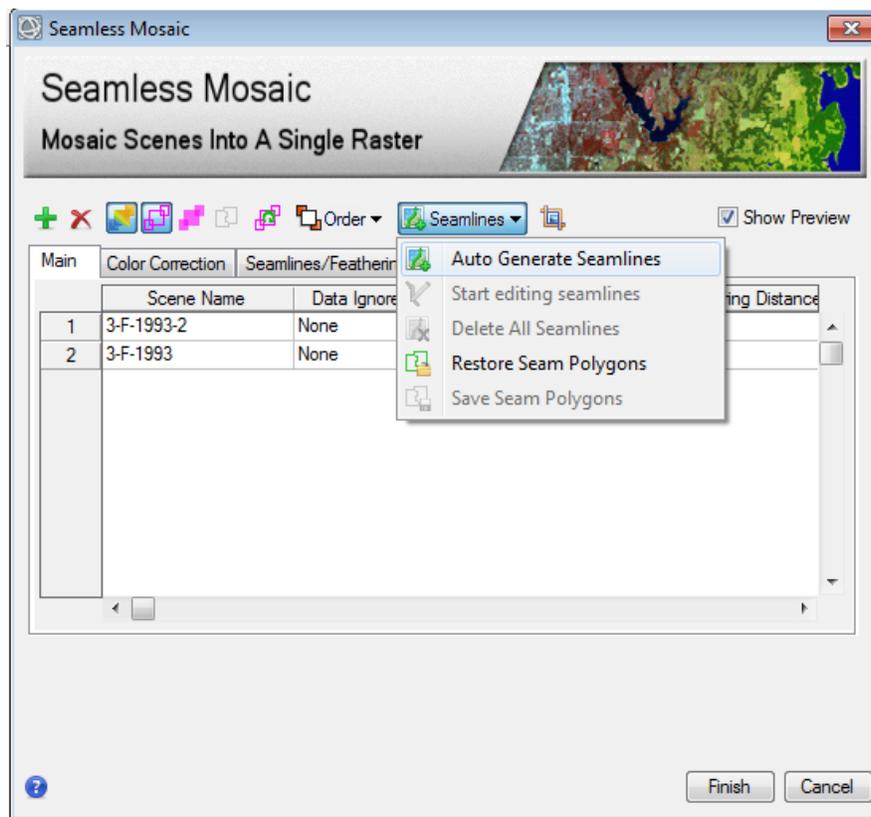
El resultado del proceso elimina elementos atmosféricos presentes en la imagen y mejora la calidad de ésta, identificándose mejor la parte continental del mar.



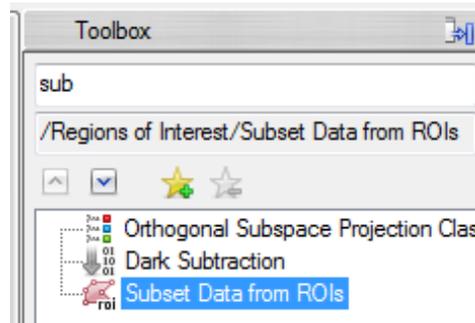
Teniendo las imágenes procesadas -en total ocho imágenes, dos para los años 1993, 1995 y 2000 y una para los años 2016 y 2018-, se requiere realizar un mosaico por año -1993, 1995 y 2000-, para cubrir el total de la zona de estudio, ya que para los años 2016 y 2018 el área está cubierta por una sola imagen-, realizándose con la herramienta *Seamless Mosaic*.



Es importante hacer mención, que la herramienta de *Seamless Mosaic*, da la opción de eliminar los píxeles con valores nulos correspondientes a la superposición de las imágenes, activando la opción de *Auto Generate Seamlines*, esto solo se realizó en los tres mosaicos para los años antes mencionados.



Finalizado el proceso, es necesario realizar el recorte para la área de estudio, eliminando el resto de la imagen que no es de utilidad, siendo éste resultado el insumo para el módulo, lo cual facilita el manejo de la información, para se utilizó la herramienta *Subset Data from ROIs*.



A continuación se presenta un ejemplo del resultado del pre-procesamiento realizado para las seis imágenes, aunado al recorte final que se debe hacer a las ocho imágenes, ejemplo de ello es la imagen de 1995.



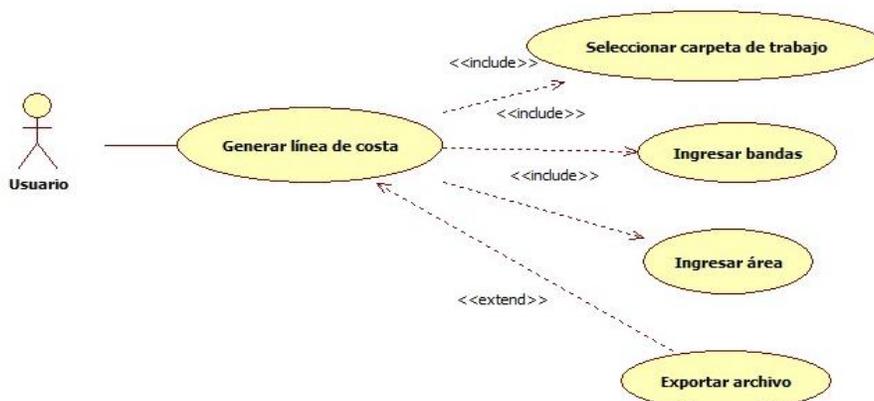
5.2 Desarrollo del módulo en ArcMap

De acuerdo a la metodología descrita en los apartados anteriores, se retoma el ciclo de vida iterativo e incremental para la generación del módulo, desarrollando a continuación en sus diversas etapas.

5.2.1 Inicio

Está enfocada en la comunicación del usuario y el desarrollador obteniendo así los requisitos base para la construcción del software, dichos requisitos se describen a través de casos de usos, la figura 21, correspondiente a lo requerido para el funcionamiento del módulo y la tabla 7 describe su comportamiento.

Figura 21. Caso de uso generar línea de costa.



Fuente. Elaboración propia con base al UML.

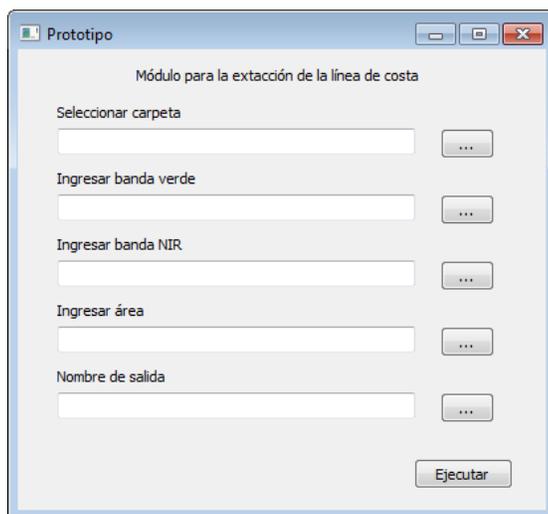
Tabla 7. Descripción del caso de uso generar línea de costa.

Nombre	Generar línea de costa
Descripción	En este caso de uso se utiliza para generar la línea de costa
Actor	Usuario
Tipo	Básico
Precondiciones	Trabajar dentro de ArcMap
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1. La pantalla solicita al usuario que seleccione la carpeta de trabajo. Se recomienda trabajar en el disco local C: 2. El usuario debe ingresar las bandas verde y NIR. 3. El usuario debe ingresar el shp del área de estudio. 4. Finalmente generará la línea de costa.
Subflujos	Ninguno
Excepciones	<ul style="list-style-type: none"> • Solo reconocerá archivos de tipo .tif. • No se podrá ejecutar el módulo si no tienen datos los campos.

Fuente. Elaboración propia con base al caso de uso.

El modelo de interfaz describe la presentación de la información, en el cual se especifica cómo se visualizará para el usuario. La figura 22 muestra el prototipo de la interfaz gráfica del usuario y la tabla 8 describe su funcionamiento.

Figura 22. Prototipo de la interfaz del caso de uso generar línea de costa.



Fuente. Elaboración propia.

Tabla 8. Descripción de la interfaz con base al caso de uso generar línea de costa.

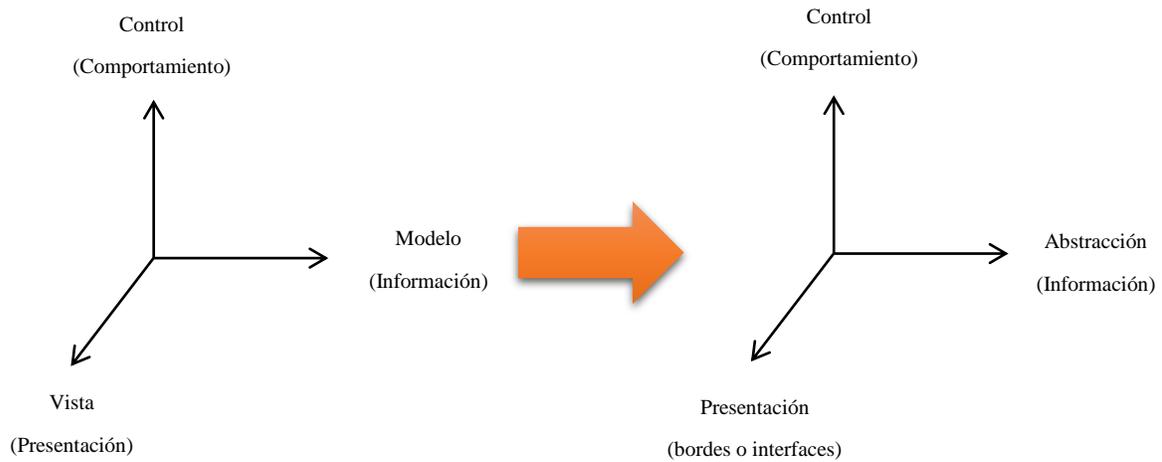
Nombre de la interfaz	Pantalla generar línea de costa
Descripción	Se utiliza para generar la línea de costa.
Tipo	Grafica (gráfica, automatizada)
Caso de uso	Generar línea de costa
Datos de entrada	Datos tipo raster (bandas verde –G- y Infrarrojo cercano –NIR-)
Datos de salida	Datos tipo vector (Línea)

Fuente. Elaboración propia.

5.2.2 Elaboración

Esta fase integra el análisis, diseño y extensión de la arquitectura utilizando los casos de uso definidos anteriormente, se utilizó la arquitectura de modelo, vista, control (*Model, View, Control - MVC*) (Fig. 23) basada en tres dimensiones principales: modelo (información), vista (presentación) y control (comportamiento). La vista o presentación de la información corresponde a las interfaces que se le presentan al usuario para el manejo de la información, el control corresponde a la manipulación de la información a través de sus diversas presentaciones.

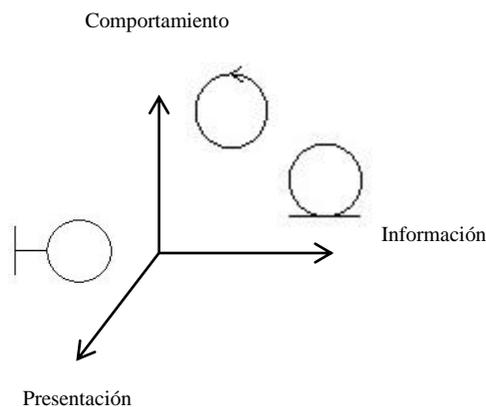
Figura 23. Diagrama de tres dimensiones correspondiente a la arquitectura MVC.



Fuente. Retomado de Weitzenfeld (2005).

Dentro de esta arquitectura se le conoce como estereotipo de clases a la funcionalidad o la razón de ser de un objeto, basadas en tres estereotipos básicos de objetos: entidad, interface o borde y control (Fig. 24). El primero permite guardar información sobre el estado interno del sistema a corto y largo plazo, el segundo implementa la presentación o vista correspondiente a las bordes del sistema y el tercero es para objetos que implementen el comportamiento o control especificando cuando y como el sistema cambia de estado, los estereotipos correspondientes al desarrollo del módulo se muestran en la figura 25.

Figura 24. Diagrama mostrando traslape en los estereotipos de los objetos.



Fuente. Retomado de Weitzenfeld (2005)

Figura 25. Borde, entidad y control del módulo.

Borde

Caso de uso	Clase borde
Generar línea de costa	Ingresar bandas

Entidad

Caso de uso	Clase entidad
Generar línea de costa	Usuario

Control

Caso de uso	Clase control
Generar línea de costa	Generar línea

Generar línea de costa



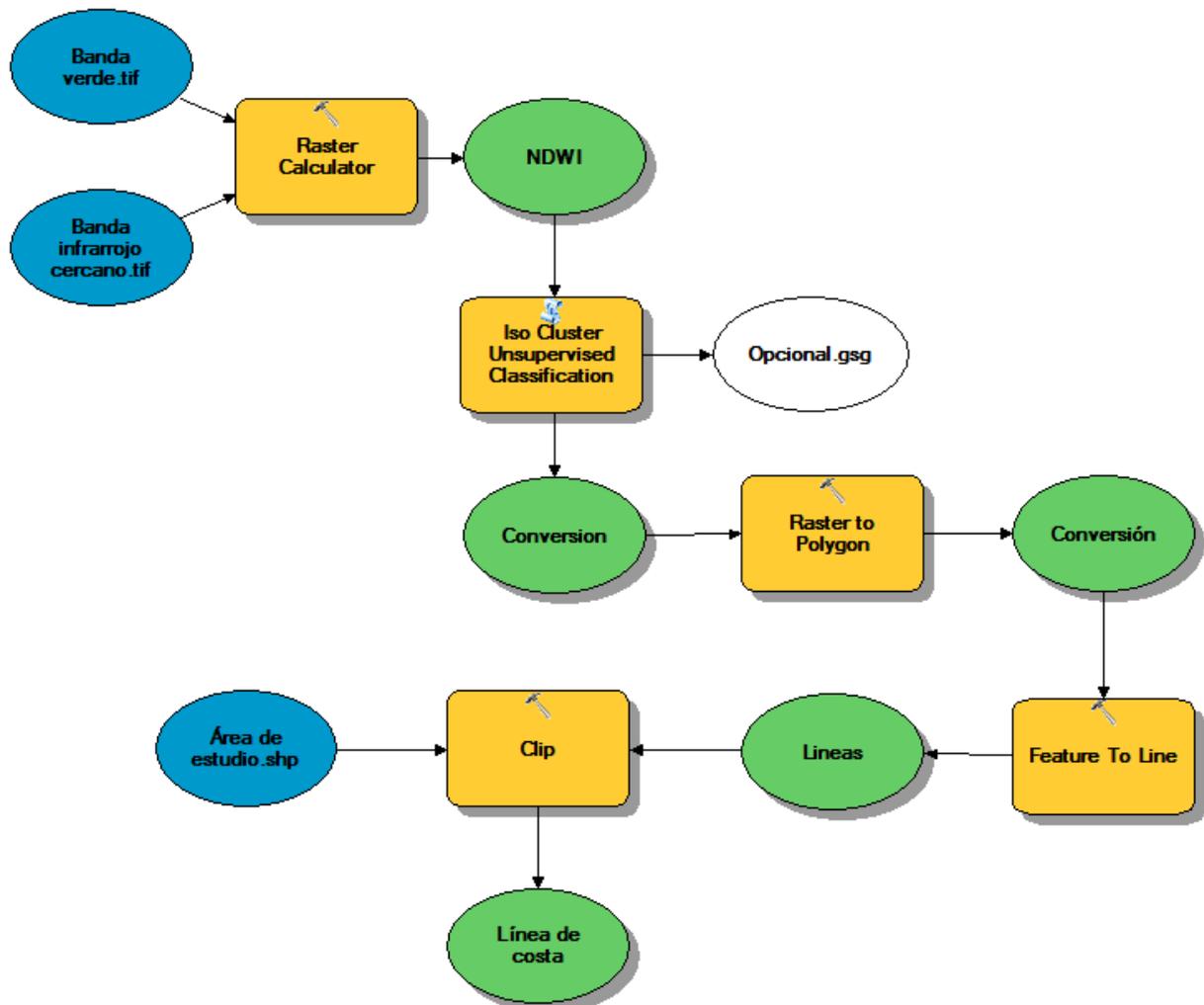
Fuente. Elaboración propia con base al modelo de análisis

5.2.3 Construcción

El módulo fue desarrollado dentro del *Add-in* de ArcGIS debido a que permite integrar un conjunto de herramientas propias de éste, con la finalidad de proporcionar funciones complementarias para la realización de tareas personalizadas.

La figura 26 presenta el modelo (flujo de trabajo) del módulo, en el cual se encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento, suministrando con las salidas a otra herramienta como entradas, los procedimientos que realiza es la generación del índice (*NDWI*), una clasificación no supervisada, la conversión de datos de raster a vector y el recorte de la zona de estudio, en este último es necesario contar con el shp del área de estudio.

Figura 26. Flujo de trabajo.



Fuente. Elaboración propia mediante Model Builder

La codificación se realizó dentro del archivo generado del *Add-in*, en el lenguaje de programación Python.

A continuación se presentan la definición de las variables.

```
#nombres de Entrada y Salida temporales
nombIndex = "INA" #raster
nombClass = "classINA.tif" #rastet
nombPoly = "tifToPoly" #vector polígono
nombLinias = "PolyToLines" #vector línea
xy = ""

nombre = self.setGBD()
arcpy.CheckOutExtension("spatial")

rstIndex = self.dirTrab+"/"+nombre+"/"+nombIndex
classes = 2
minMembers = 20
sampInterval = 10
RasterToPoly = self.dirTrab+"/"+nombre+"/"+nombPoly
self.FeatureToLi = self.dirTrab+"/"+nombre+"/"+nombLinias
```

La siguiente línea de código nos permite realizar una búsqueda de los archivos generados para que no existan errores a la hora de ejecutar el módulo ya que los resultados se guardan en una base de datos.

```
#Realizar búsquedas de rasters o vectors para eliminar de la base de datos
o de la carpeta de trabajo, para no generar errores de ejecución
#Búsqueda del raster en la DBG
self.search(nombre, nombIndex, nombPoly, nombLinias, nombClass)
```

La siguiente línea de código nos muestra cómo se llevó a cabo el cálculo del NDWI con base a la metodología de McFeeters (1996) expresada de la siguiente manera:

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

Utilizando Raster Calculator ya que permite crear y ejecuta una única expresión de álgebra de mapas utilizando la sintaxis de Arcpy.

```
#Process: Raster Calculator
cal = "Float(\\""+B2+"\\" - \\""+B4+"\\" ) / Float(\\""+B2+"\\" + \\""+B4+"\\" )"
arcpy.gp.RasterCalculator_sa(cal, rstIndex)
QtGui.QMessageBox.information (None, u"Información", u"Se creó
correctamente el índice del agua")
```

Se realizó una clasificación no supervisada con la herramienta Iso Cluster Unsupervised Classification ya que realiza la clasificación sin supervisión en una serie de bandas de ráster de entrada utilizando las herramientas *Iso Cluster* y *Maximum Likelihood Classification*.

```
#Crear el ISOCLUSTER
env.workspace = self.dirTrab + "/" + nombre
outUnsupervised = IsoClusterUnsupervisedClassification(nombIndex, classes,
minMembers, sampInterval)
outUnsupervised.save(self.dirTrab + "/" + nombClass)
QtGui.QMessageBox.information (None, u"Información", u"Se creó
correctamente, el raster booleano de la línea de costa")
```

En las siguientes líneas de código se realiza la conversión de los archivos de tipo raster a vector con las herramientas *Raster To Polygon* y *Feature To Line*.

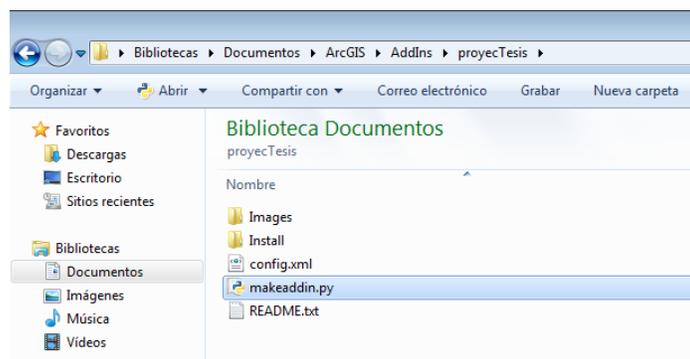
```
#Conversión de raster a polígono
arcpy.RasterToPolygon_conversion(self.dirTrab + "/" + nombClass,
RasterToPoly, "SIMPLIFY", "Value")
QtGui.QMessageBox.information (None, u"Información", u"Conversión de raster
a poligiono")

#Conversión de polígono a línea
arcpy.FeatureToLine_management(RasterToPoly, self.FeatureToLi, "",
"ATTRIBUTES")
QtGui.QMessageBox.information (None, u"Información", u"Conversión de
polígono a línea")
```

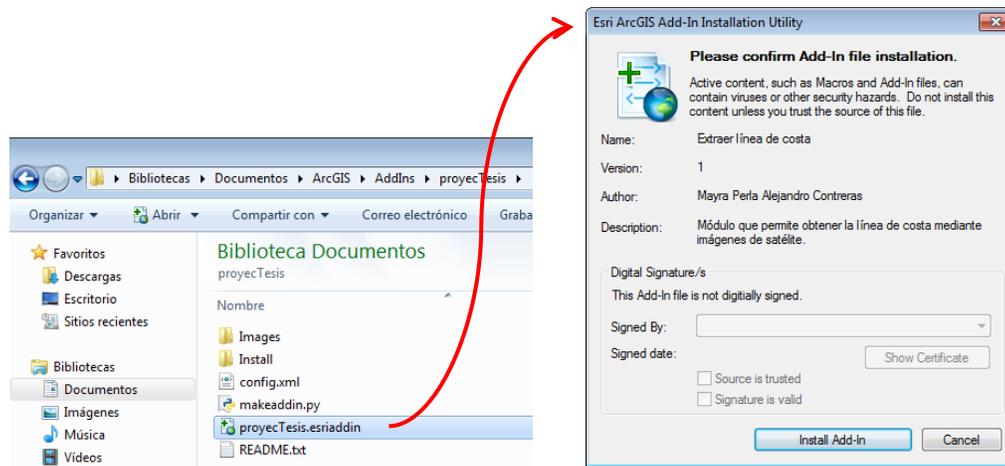
Con la herramienta Clip se realiza el recorte del área de estudio a trabajar y de esta manera descarta todo lo que no se requería en este proyecto

```
#Realizar el corte "clip"
arcpy.Clip_analysis(self.FeatureToLi, clip, salida, xy)
QtGui.QMessageBox.information (None, u"Información", u"Se creó
correctamente, el shape de la línea de costa")
```

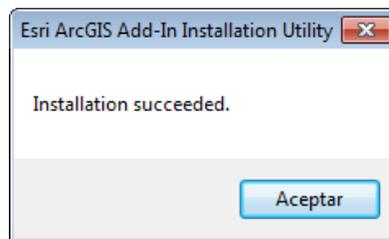
Finalizando la codificación del módulo, es necesario añadirlo el nuevo menú, ejecutando el archivo *makeaddin.py*



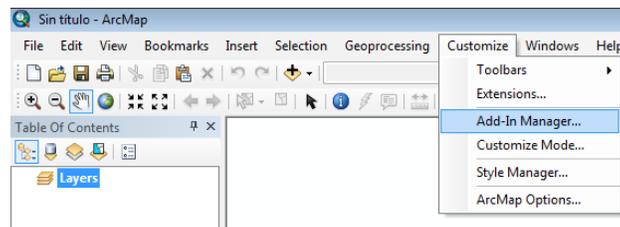
Después de ejecutar el archivo *makeaddin.py* se genera un archivo con extensión *.esriaddin* el cual debe de instalarse.



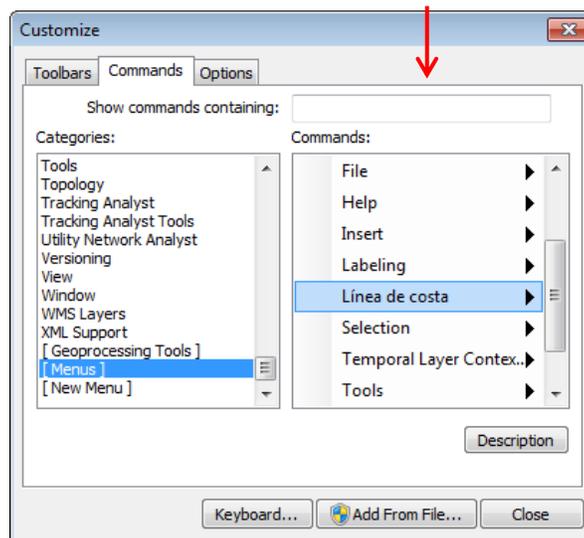
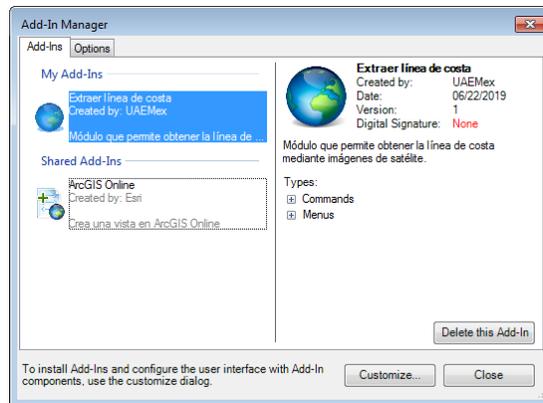
Una vez instalado aparecerá el siguiente mensaje:



Para activar el nuevo menú nos vamos a *Customize | Add-In Manager*.



En la ventana que arroja aparecerán todos los *Add-in* generados y para poder visualizarlos en la barra de menús se tienen que arrastrar a la zona deseada.



5.2.4 Transición

Las pruebas del módulo se llevaron a cabo al finalizar la codificación simulando los posibles errores que podría cometer el usuario a la hora de trabajar con módulo y de esta manera fueron corregidos.

5.2.5 Producción

La fase de producción está encargada del monitoreo del uso de módulo al igual que proporcionar soporte, así como se recibir y evaluar los informes de defectos o posibles cambios, esto fue realizado durante la implementación del módulo.

Capítulo 6. Resultados

Los resultantes obtenidos al aplicar el pre-procesamiento permitieron eliminar los elementos atmosféricos, así como corregir el desplazamiento de las líneas de escaneo y realizó la conversión de los valores digitales a valores de radiancia, a fin de mejorar la calidad de las imágenes. Se generaron tres mosaicos y se recortaron del área de estudio las cinco imágenes finales, siendo éstas los insumos que se utilizarán en el módulo, las cuales se presentan a continuación:

Imagen correspondiente al 15 de Diciembre de 1993 del satélite Landsat 5.

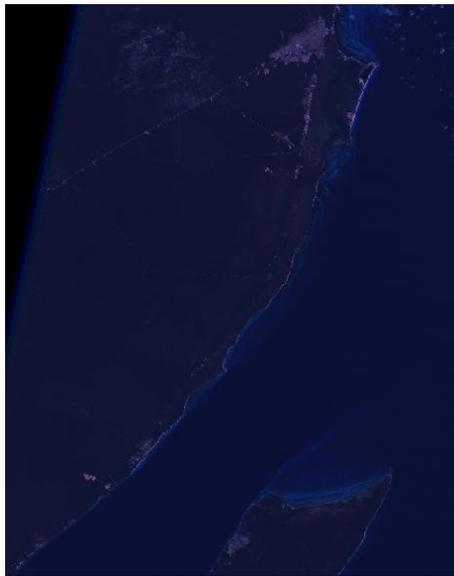


Imagen original



Insumo final

La segunda corresponde al 21 de Diciembre de 1995 igual de Landsat 5.



Imagen original



Insumo final

La tercera pertenece al 10 de Diciembre del 2000 del satélite Landsat 7.

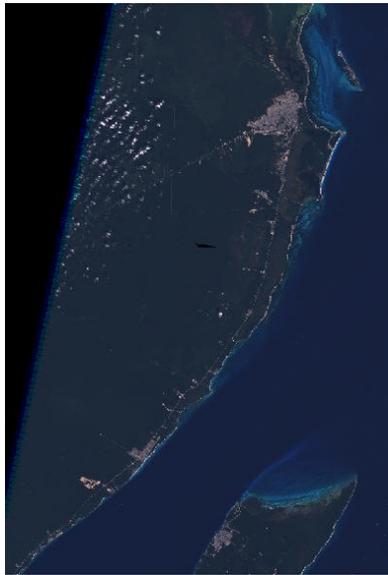
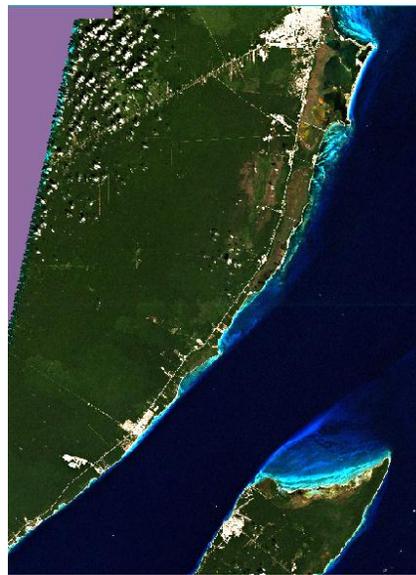


Imagen original



Insumo final

La cuarta fecha es del 07 de Julio de 2016.



Imagen original



Insumo final

Y la última corresponde al 30 de Agosto de 2018 del mismo satélite que el anterior.

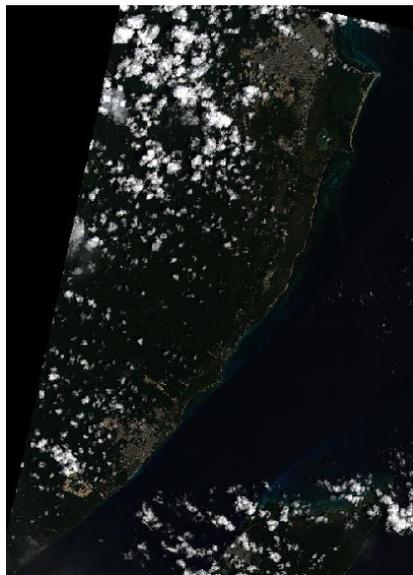
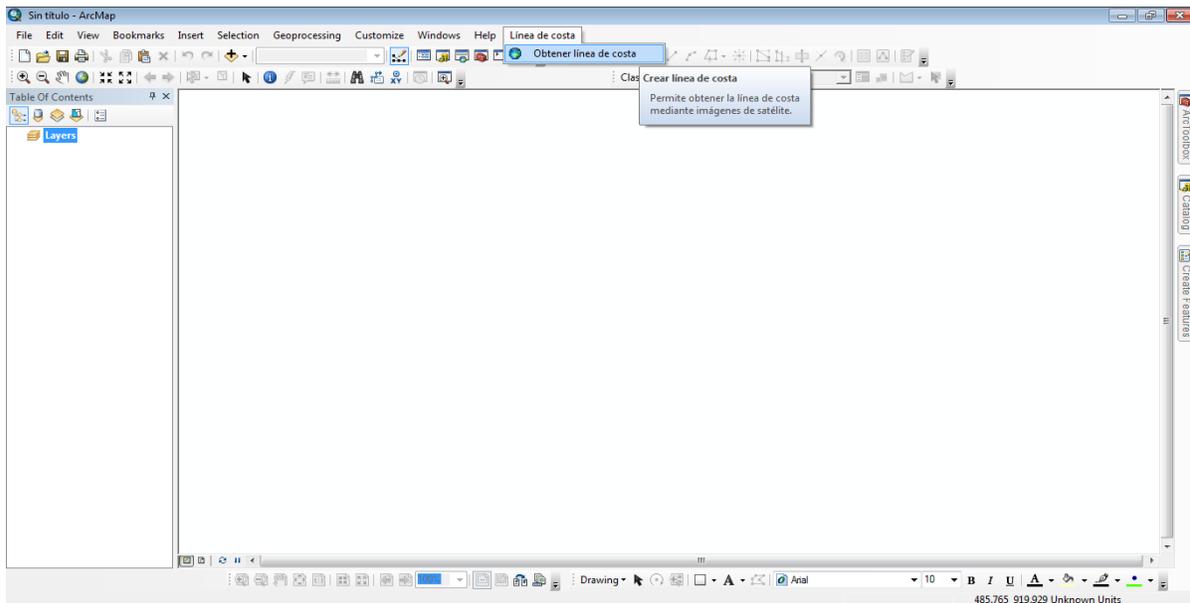


Imagen original

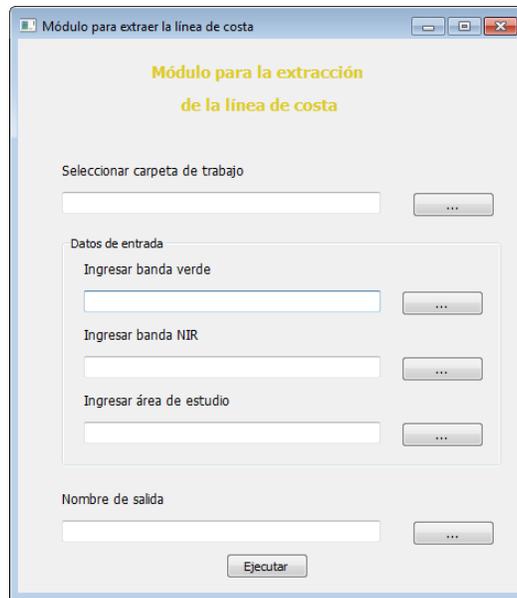


Insumo final

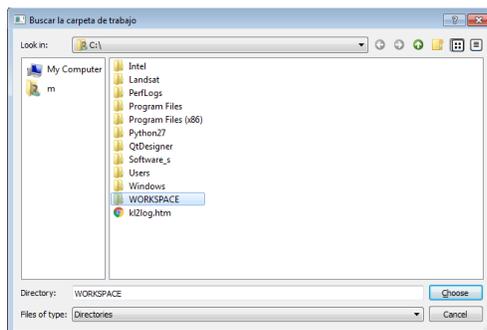
Por otra parte, finalizado el desarrollo del módulo, mediante la programación en Python, el cual contiene la metodología para el cálculo del índice de agua, la clasificación no supervisada y la conversión de datos raster a vector, se incorporó dentro de los menús de geoprocamos de ArcMap, como se muestra a continuación:



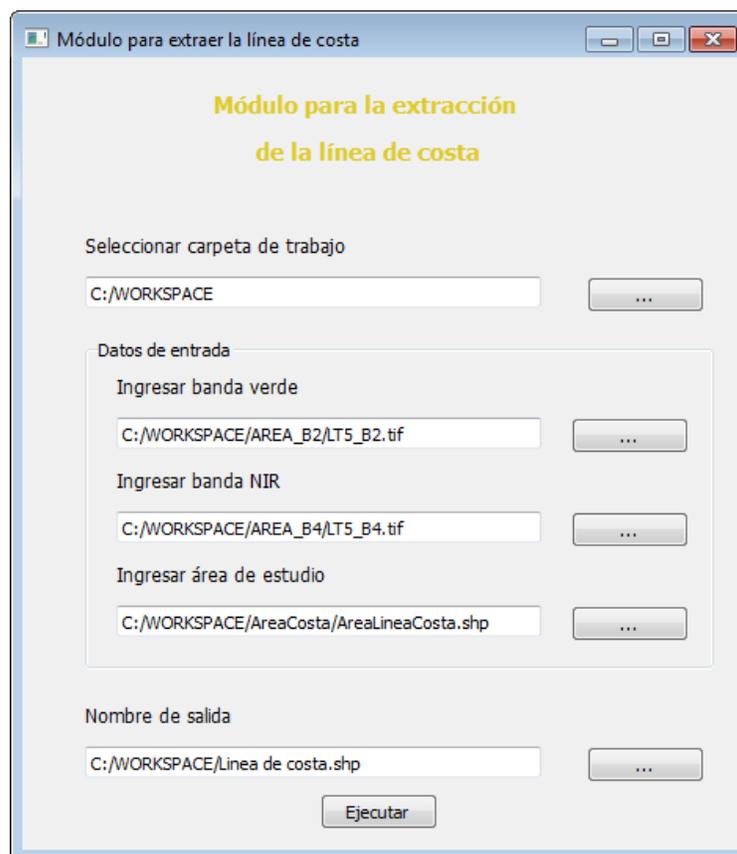
La interfaz del módulo está dividida en tres secciones, la primera requiere seleccionar la ruta de la carpeta de trabajo, la segunda pide los datos de entrada, en este caso la banda verde e infrarrojo cercano y la última sección solicita el nombre de salida del proceso.



Se recomienda trabajar dentro del disco C: y que los datos se encuentren en esta carpeta.

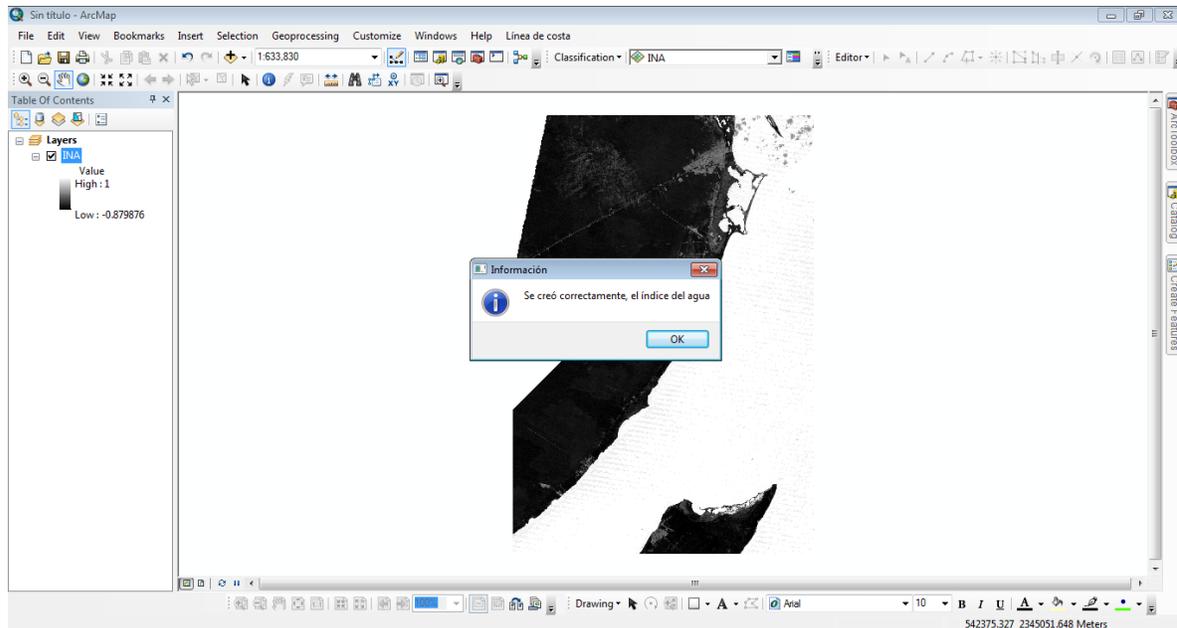


De acuerdo a la codificación del módulo, tiene restricciones para que no se pueda ejecutar si algún campo no contiene información, es por ello que deben ser llenadas todos los campos o de lo contrario arrojará un mensaje informativo especificando a que campo le faltan datos.

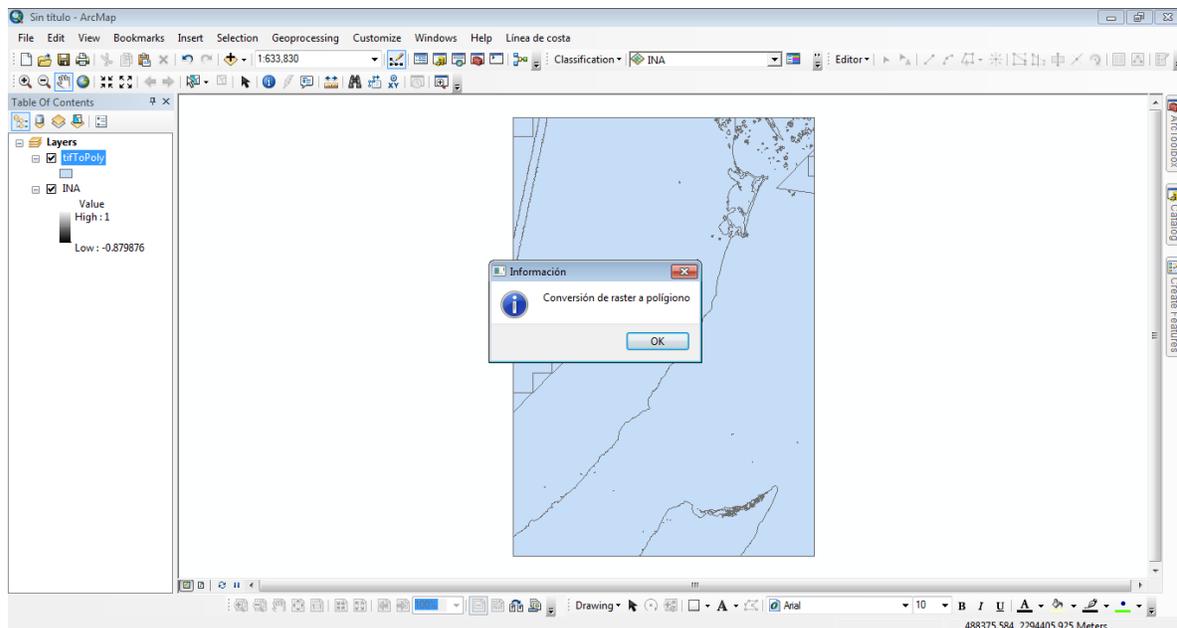


Cada vez que se genera un geoprocésamiento (índice de agua, conversión de raster a vector y conversión de polígono a línea), muestra un mensaje informando que se había realizado correctamente el proceso.

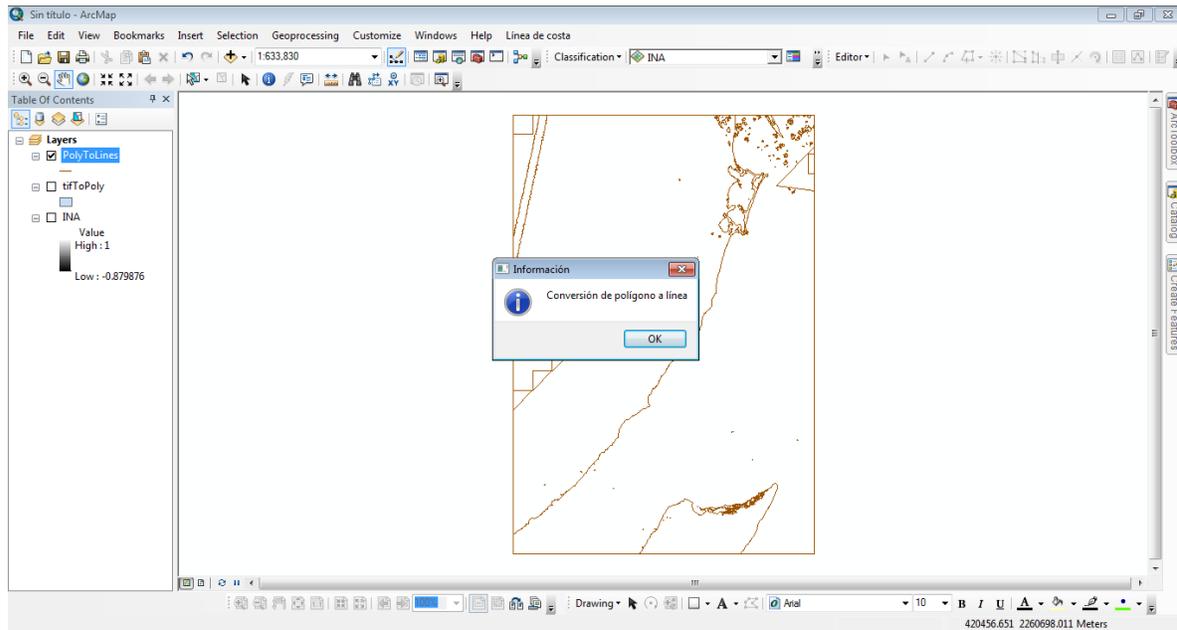
En la siguiente imagen se observa el primer proceso realizado, correspondiente al índice del agua (NDWI), colocándole un valor a la parte continental y otro valor a la parte del agua, observándose así la diferenciación entre estos dos.



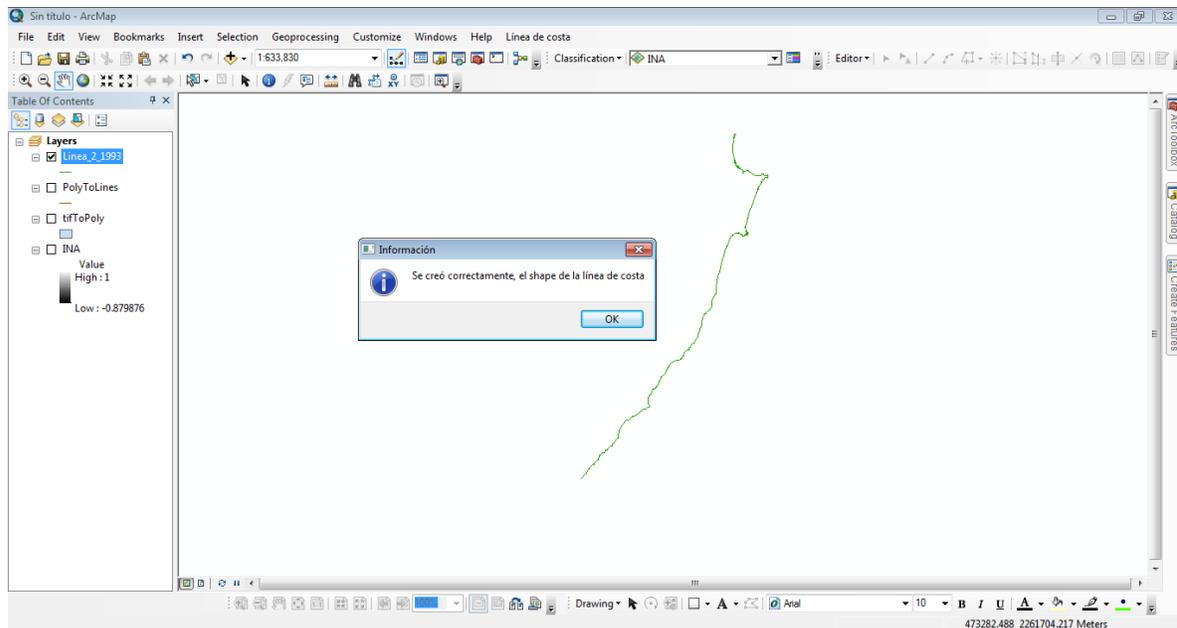
El segundo proceso genera una clasificación no supervisada con forme al NDWI, siendo éste un proceso interno que no lo visualiza el usuario, y el tercer proceso que realiza es la conversión de raster a polígono de toda la imagen.



El cuarto proceso realiza la conversión de polígono a línea, de toda la imagen.



Y finalmente realiza el recorte a partir del área de estudio que se incorpora inicialmente para así obtener solo la línea de costa en formato vectorial.



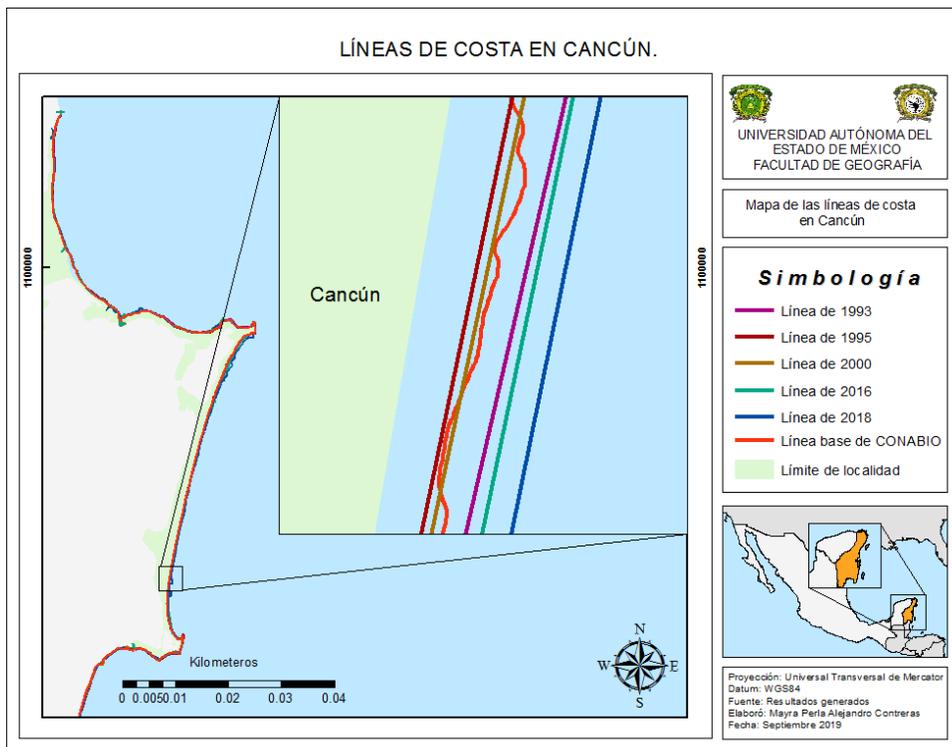
Con la implementación del módulo se obtuvieron cinco líneas de costa una por año, permitiendo realizar un análisis multitemporal, en un periodo de 25 años, utilizando seis puntos de muestreo en la localidad de Cancún teniendo como base de referencia la línea de costa proporcionada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) correspondiente al año 2004 publicada en el 2010, escala: 1:1000, para medir el desplazamiento de esta.

En el primer punto, corresponde a la zona de puerto Juárez, en las coordenadas $21^{\circ}.186$ N y $-86^{\circ}.806$ W, se puede observar un regresión para los años 2000, 2016 y 2018 con base al año 2004, mientras que el segundo punto, ubicado en la zona hotelera con las coordenadas $21^{\circ}.137$ N y $-86^{\circ}.772$ se identificando una ganancia de lo continental hacia el mar en el año de 2016 probablemente por la construcción hotelera, es importante mencionar que este punto en particular es evidente que los datos están sujetos a las variaciones de resolución de la imágenes y a las variaciones en las características de los satélites utilizados.

En el tercer punto se observó una regresión importante en el año de 1995 esto podría deberse al impacto del huracán presentado en esta temporada, mientras que los últimos puntos de muestreo (cuatro, cinco y seis) muestran un avance hacia el mar, con base a la línea de 2004 de CONABIO. Los puntos de muestreo se observan en el mapa 7, la figura 27 presenta las cinco líneas generadas y su dinámica mientras que la figura 28 muestra las gráficas de cada punto de muestreo y su dinámica por fechas.

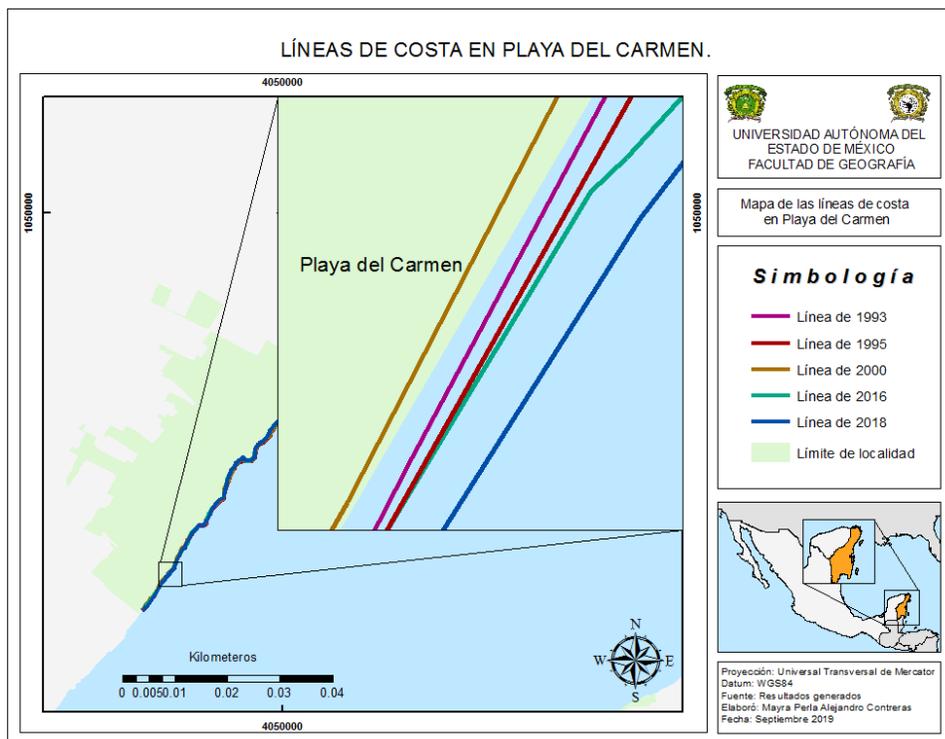
Finalmente se identificó que dos de las líneas generadas por el módulo son muy semejantes a la línea propuesta por CONABIO, a pesar de que los resultados son una línea recta, esto debido al tipo de datos, raster, es importante mencionar que independiente mente del resultado generado es necesario corroborar los datos con información en campo utilizando puntos de muestreo estratégicos así como también realizar una corrección visual a la línea ya que presenta alteraciones en las zonas costeras con infraestructura.

Mapa 5. Líneas de costa en un área de Cancún.



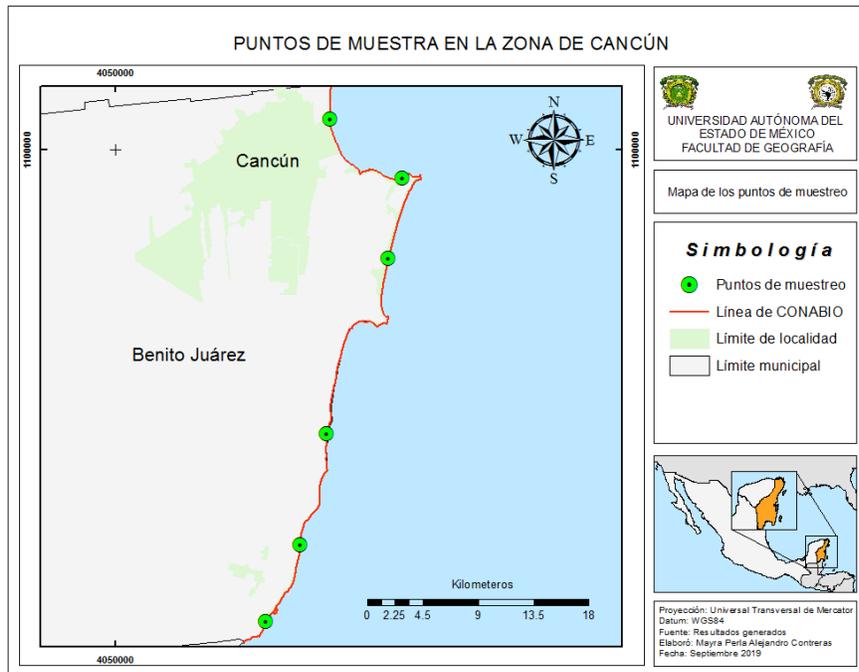
Fuente. Elaboración propia con base a los resultados obtenidos.

Mapa 6. Líneas de costa en un área de Playa del Carmen.



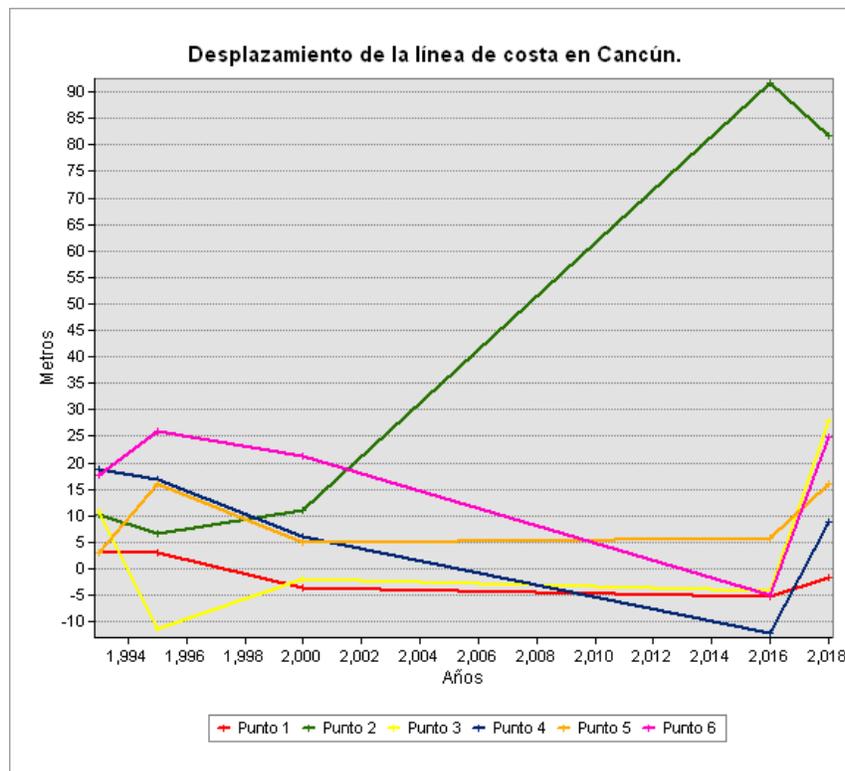
Fuente. Elaboración propia con base a los resultados obtenidos.

Mapa 7. Puntos de muestreo en Cancún.



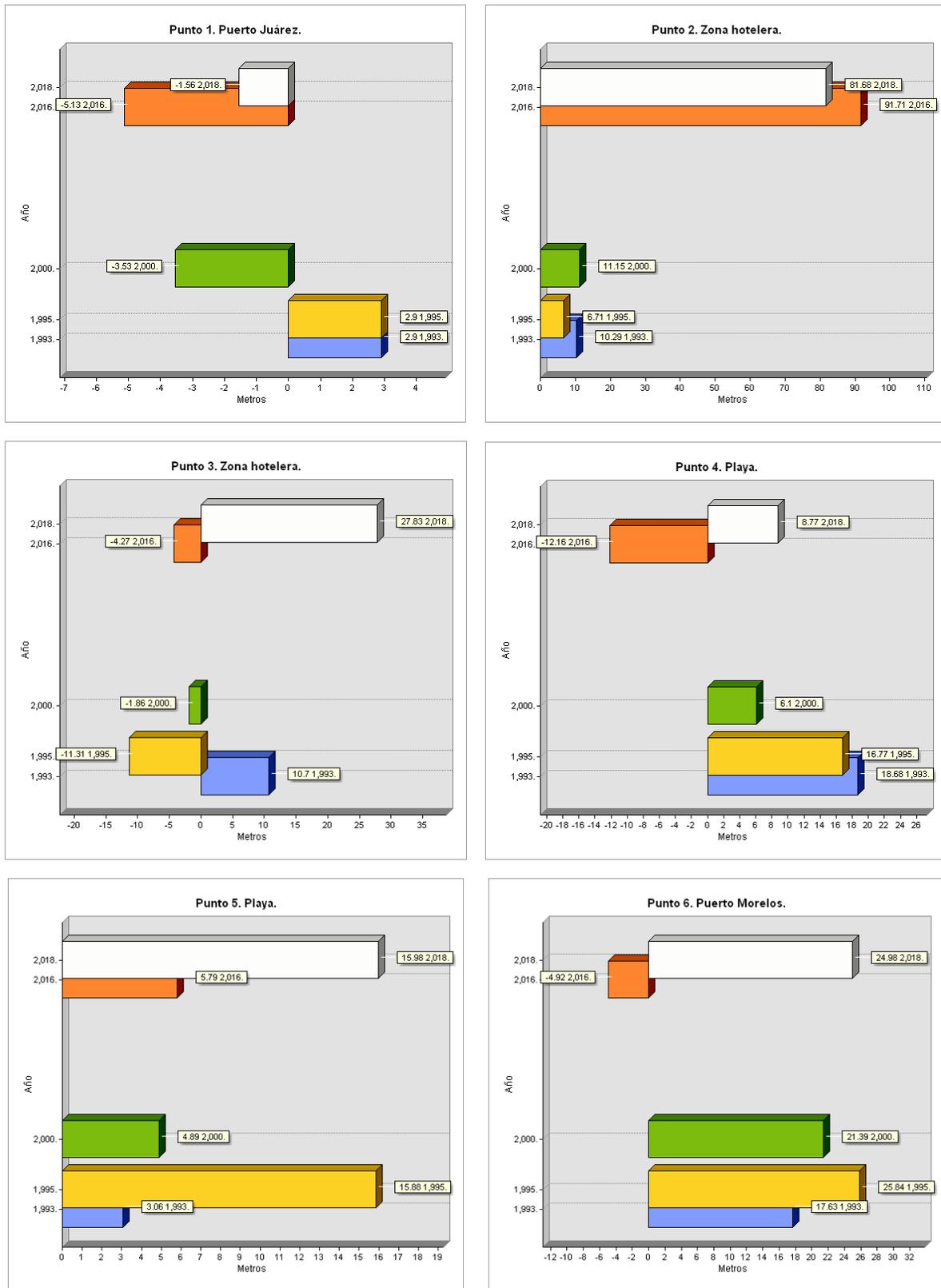
Fuente. Elaboración propia con base a los resultados obtenidos.

Figura 27. Movimiento de la línea de costa en una temporalidad de 25 años.



Fuente. Elaboración propia con base a los resultados obtenidos.

Figura 28. Puntos de muestreo.



Fuente. Elaboración propia con base a los resultados obtenidos.

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los objetivos que persiguió la presente investigación se puede concluir que se logró realizar el diseño y desarrollo del módulo para la delimitación de la línea de costa mediante imágenes de satélite, así como se consiguió unificar la metodología para el cálculo del índice de agua de diferencia normalizada, una clasificación no supervisada, la conversión de datos tipo raster a vector y la obtención de la línea de costa, en un módulo geoinformático de manera satisfactoria.

Se realizó un caso de estudio en Cancún a Playa del Carmen en una temporalidad de 25 años de 1993 a 2018 permitiendo el análisis multitemporal, el cual arrojó la existencia de una dinámica constante en las últimas décadas, esto debido posiblemente a fenómenos naturales y a la actividad antrópica que juega un impacto relevante en la zona costera.

Es importante mencionar que cuando se presentan los fenómenos naturales los procesos de inundación en zonas costeras urbanizadas modifican la morfología de la línea de costa y a su vez usualmente está acompañada de daños graves a la infraestructura existente, es por ellos que conocer el movimiento constante de la línea de costa es fundamental para anticipar posibles desastres.

Concluyendo que la propuesta de desarrollar un módulo geoinformático capaz de delimitar la línea de costa, contribuye a los estudios constantes ya que simplifica procesos minimizando tiempos de respuesta en apoyo a la toma de decisiones, esto gracias a que se contaba con los conocimientos especializado en teledetección y programación, obteniendo así resultados satisfactorios.

Cabe destacar que el módulo podría ser mejorado implementando algunos de los pre-procesamientos realizados a la imagen, logrando reducir aún más el tiempo de procesamiento de éstas. De igual manera, se podría enfocar en mejorar la calidad de la línea de costa ya que en zonas costeras urbanizadas no es capaz de diferenciar la infraestructura de los puertos generando alteraciones en la línea de costa.

Así mismo durante la investigación y desarrollo del presente proyecto se enfrentaron a diversos retos y limitaciones como la dificultad para adquirir imágenes de satélite con poca nubosidad o de fechas específicas al igual que encontrar imágenes en condiciones necesarias

para trabajar ya que algunas presentaban fallas en una o varias banda. De igual manera a la hora de programar los insuficientes conocimientos en programación provocaron un retraso en la implementación del módulo, es por ello que se recomienda reforzar esta área con la finalidad de ser competitivo.

Se consideró la implementación del módulo en un software privativo debido a que la plataforma de ArcGIS integra una serie de librerías de análisis espacial que operan sobre el lenguaje de programación Python siendo este multiplataforma, de código abierto y compatible con diversos software.

Finalmente se propone el desarrollo de este módulo geoinformático en un ambiente de software libre como R o gvSIG brindando la posibilidad de implementarlo en un *plug-in* de código abierto que pueda ser utilizado por las instituciones o dependencias que hagan uso de software libres, gracias a que la metodología utilizada puede ser automatiza en cualquier tipo de software de entono SIG.

Referencias bibliográficas

- APIQROO. (2019). *Administración Portuaria Integral de Quintana Roo*. Recuperado el 2019, de Puertos: <http://www.apiqroo.com.mx/>
- Alonso Sarría, F. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Arreola Carmona, L. A. (2006). *Desarrollo de un módulo en IDRISI, para la obtención de áreas deforestadas a partir de imágenes satelitales LANDSAT TM, ETM o SPOT. Proyecto terminal Final del posgrado de la especialidad en CATSIG*. Toluca de Lerdo, Estado de México: Facultad de Geografía, UAEMEX.
- Braude, E. J. (2003). *Ingeniería de Software una perspectiva orientada a objetos*. México: Alfaomega.
- Chuvieco Salinero, E. (2002). *Teledetección ambiental : la observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel.
- Cifuentes Lemus, J., Torres García, M., & Frías M., M. (2013). *El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química*. Recuperado el 2018, de La línea de la costa como zona de interacción del aire, el mar y la tierra: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/12/htm/sec_9.html
- Copé de los Mozos, R. (2014). *Cálculo del retroceso glaciar en la Isla Livingston y de su línea de costa para actualización cartografía*. Recuperado el 2017, de Instituto hidrográfico por la marina, España.: <http://eprints.ucm.es/27071/1/TFM%20Cop%C3%A9.pdf>
- Cuéllar, A. C. (2014). *Uso de sensores remotos para la predicción de casos de malaria en el departamento Orán, Salta*. Recuperado el 2017, de Universidad Nacional de Córdoba: <http://www.famaf.unc.edu.ar/wp-content/uploads/2015/09/27-Gulich-Cuellar.pdf>
- ESRI. (2016). *¿Qué son los datos ráster?* Recuperado el 2017, de ArcMap: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación correlación y comunicación internacional*. Recuperado el 2018, de <http://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- Godoy, M. K., & Peña, M. (2012). *Hidrografía*. Recuperado el 2017, de Mareas y corrientes marinas: <http://hidrografianurr.blogspot.mx/p/mareas-y-corrientes-marinas.html>
- Gómez Millán, D. G., & Herrera Mendoza, L. Y. (2010). *Diseño y construcción de un módulo para la generación de cartodiagramas y tipogramas. (Tesis de Licenciatura)*. Toluca de Lerdo, Estado de México: Facultad de Geografía. UAEMEX.
- IGAC. (2017). *Fundamentos de percepción remota*. Recuperado el 2017, de Componentes de un sistema de percepción remota:

http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_pr-semana1-unidad1/index.php?id=3

- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2006). *Los Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 2017, de Redalyc:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36012424010>
- Intagri. (2017). *Clasificación del Suelo: WRB y Soil Taxonomy*. Recuperado el 2018, de
<https://www.intagri.com/articulos/suelos/clasificacion-del-suelo-WRB-y-soil-taxonomy>
- Joyanes Aguilar, L. (1996). *Fundamentos de programación algoritmos y estructura de datos*. Madrid: McGraw Hill Interamerican de España.
- Landeró Ortíz, A., Pérez Rivera, M. V., Guillermo Benites, X. H., & Reyes Mijangos, G. (2012). *Gerardo*. Obtenido de Tipos de datos geográficos: <http://tecamb-sig.blogspot.mx/2012/12/primer-unidad.html>
- Lugo Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorfológico*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Márquez García, A. Z., Márquez García, E., Crevenna Recaséns, A., & Torres Rodríguez, V. (2010). *Cambio en la línea de costa en la rivera maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, ¿Consecuencia del cambio global climático global?* Recuperado el 2017, de SEMARNAT-INECC, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.:
<http://www.anide.edu.mx/archivos/CAP16%20Cambio%20en%20la%20nea%20de%20costa%20en%20la%20Riviera%20Maya.pdf>
- Mc Coy Cador , C. E., & Sosa Ferreira, A. P. (2016). *Causas y efectos de un destino no sustentable: Caso playas públicas de Cancún, Quintana Roo*. Recuperado el 2018, de
<http://www.scielo.org.mx/pdf/eps/n31/1870-9036-eps-31-00006.pdf>
- Moreno Jiménez, A. (2006). *Sistemas y Análisis de la información geográfica manual de autoaprendizaje con ArcGIS*. México: Alfaomega.
- NASA. (1999). *Earth Observatory*. Recuperado el 2018, de Landsat:
<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/Landsat/landsat4.php>
- Núñez Martínez, D. (2007). *Diseño de un módulo en ambiente SIG para la gestión de información geográfica sobre los recursos no maderables de la comunidad dilatada sur, dentro del parque nacional nevado de toluca, México (Tesis)*. Toluca de Lerdo: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Ojeda Zújar, J., Díaz Cuevas, M. P., Prieto Campos, A., & Álvarez Francoso, J. I. (2013). *Línea de costa y Sistemas de Información Geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa Andaluza*. Recuperado el 2017, de Ordenación Litoral y Tecnologías de Información Territorial.:
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34743/1/Investigaciones_Geograficas_60_02.pdf

- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 2017, de <https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Ordaz Hernández, A., Hernández Santana, J. R., Estévez Cruz, E., Díaz Guanche, C., & Méndez Linares, A. P. (2016). *Morfodinámica costera en la playa Bailén, costa surdel occidente de Cuba, entre los años 2003-2013*. México: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.
- Palacio Aponte, G. A. (2001). *Detección de cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de la Isla del Carmen Campeche, mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite*. Recuperado el 2017, de Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n46/n46a2.pdf>
- Pardo Pascual, J. E., Ruiz Fernández, L. A., Almonacid, J., & Calaf, X. (2008). *Detección automática de cambios en la línea de costa a partir de imágenes de satélite de resolución media*. Recuperado el 2017, de Grupo de Investigación Cartografía Geoambiental y Teledetección, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València: <http://cgat.webs.upv.es/BigFiles/114-Pardo%20Pascual.pdf>
- Pimpler, E. (2013). *Programming ArcGIS 10.1 with Python Cookbook*. Birmingham: Packt Publishing.
- Pressman, R. S. (2005). *Ingeniería del Software un enfoque práctico*. México: McGrawHill.
- Revista Internacional de Teledetección. (2007). *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. Recuperado el 2017, de Revista Internacional de Teledetección: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431169608948714?needAccess=true>
- Rodríguez, I. (2001). *Comparación de técnicas basadas en el tratamiento digital de imágenes de satélite para la obtención de la línea de costa del delta del Ebro*. Recuperado el 2017, de Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.: <http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida43.pdf>
- Salazar Vallejo, S. I. (1999). *Calentamiento global y efectos costeros*. Chetumal, QR, México.: Depto. Ecología Acuática, El colegio de la Frontera Sur.
- SECTUR. (2013). *Estudio de competitividad turística del destino Cancún*. Recuperado el 2018, de Agenda de competitividad de los destinos turísticos de México: <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2015/02/PDF-Cancun.pdf>
- Servicios Ambientales y Jurídicos, S.C. (2011). Recuperado el 2018, de Modificación del programa de ordenamiento ecológico local del municipio de Benito Juárez, Q.Roo: <http://www.cancun.gob.mx/ecologia/files/2012/01/CaracterPOEL1.pdf>
- SIPSE. (2017). *Novedades Quintan Roo*. Recuperado el 2018, de <https://sipse.com/novedades/cancun-tendra-su-primer-mapa-de-cenotes-165257.html>

- Tomlinson, R. (2007). *Pensando en el SIG planificación del sistema de información geográfica dirigida a gerentes*. California: ESRI Press.
- Torres Rodríguez, V., Márquez García, A., Bolongaro Crevenna, A., Chavarria Hernández, J., Expósito Díaz, G., & Márquez García, E. (2010). *Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático*. Recuperado el 2017, de Semarnat-ine, unam-icmyl, Universidad Autónoma de Campeche:
<http://www.anide.edu.mx/archivos/CAP15%20Tasaerosion%20Costera%20Campeche.pdf>
- Turista Quintana Roo. (2018). *Hoteles en Quintana Roo*. Recuperado el 2018, de
<https://quintanaroo.turista.com.mx/hoteles-cancun-1.html>
- USGS. (2015). LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK. *Department of the Interior U.S. Geological Survey*, 4.
- Valadez Rocha, V. (2013). *Evaluación de la vulnerabilidad de las playas ante los efectos no deseados por la construcción de obras de protección costera en la Zona Metropolitana de Veracruz*. Boca del Río, Veracruz: Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías.
- Valderrama, L., Castaneira, M., & Martínez, M. (2016). *Evaluación de los cambios en la línea costa de manglar y otras coberturas, empleando el programa DSAS de la USGS*. Recuperado el 2017, de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO):
http://speck.conabio.gob.mx/manglarfotos/CAM/coastline2/Metodo_linea_costa.pdf
- Weitzenfeld, A. (2005). *Ingeniería de software orientada a objetos con UML, Java e Internet*. México: THOMSON.
- XU, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 3025-3033.