

**PROYECTO BOSQUES, BIODIVERSIDAD Y DESARROLLO COMUNITARIO  
FORTALECIENDO LA GESTIÓN NACIONAL DE ÁREAS PROTEGIDAS EN  
GUATEMALA Y HONDURAS**

**Informe Final**

PLAN PILOTO PARA EL ESTUDIO DE ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL  
ECOSISTEMA MANGLAR 2012-2019 EN LAS AREAS PROTEGIDAS DE RIO  
SARSTUN, PUNTA DE MANABIQUE Y RIO DULCE.

Izabal, Octubre del año 2021

|        |  |                                      |
|--------|--|--------------------------------------|
| 1      | RESUMEN .....                                  | 6                                    |
| 2      | INTRODUCCION.....                              | 8                                    |
| 3      | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                | 10                                   |
| 4      | JUSTIFICACIÓN.....                             | 12                                   |
| 5      | ANTECEDENTES .....                             | 13                                   |
| 6      | OBJETIVOS.....                                 | 14                                   |
| 6.1    | General.....                                   | 14                                   |
| 6.2    | Específicos .....                              | 14                                   |
| 7      | ALCANCES .....                                 | 15                                   |
| 6.2    | Esquema de Solución.....                       | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 8      | UBICACIÓN ESPACIAL DEL ESTUDIO .....           | 17                                   |
| 9      | MARCO CONCEPTUAL .....                         | 19                                   |
| 9.1    | Bosque manglar .....                           | 19                                   |
| 9.1.1  | Características del bosque manglar .....       | 20                                   |
| 9.1.2  | Servicios ambientales del bosque manglar ..... | 20                                   |
| 9.2    | Percepción remota.....                         | 21                                   |
| 9.3    | Sensores Remotos .....                         | 21                                   |
| 9.3.1  | Sensor Landsat 8.....                          | 21                                   |
| 9.3.2  | Sensor Rapideye .....                          | 22                                   |
| 9.3.3  | Sensor Sentinel-2.....                         | 22                                   |
| 9.3.2  | Imágenes de satélite.....                      | 23                                   |
| 9.3.3  | Pixel .....                                    | 23                                   |
| 9.4    | Aplicación de algoritmos .....                 | 24                                   |
| 9.4    | Dispersión espacial .....                      | 24                                   |
| 9.5    | Sistemas de Información Geográfico (SIG).....  | 24                                   |
| 10     | METODOLOGÍA.....                               | 25                                   |
| 10.1   | Fase1: Recopilación de información .....       | 26                                   |
| 10.1.1 | Selección de áreas de muestro .....            | 26                                   |
| 10.1.2 | Selección de imágenes.....                     | 26                                   |
| 10.2.3 | Descarga de imágenes .....                     | 27                                   |
| 10.2.6 | Planet .....                                   | 28                                   |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 10.2.7 | Imágenes Seleccionadas .....   | 29 |
| 10.3   | Fase 2 Tratamiento y calibración de las imágenes seleccionadas .....   | 30 |
| 10.3.1 | Preprocesamiento.....  | 30 |
| 10.3.2 | Calibración radiométrica .....   | 30 |
| 10.3.3 | Calibración Geométrica.....  | 30 |
| 10.3.4 | Filtrado.....  | 30 |
| 10.4   | Fase 3: Aplicación de Algoritmos .....   | 32 |
| 10.4.1 | Generación de áreas de entrenamiento .....   | 32 |
| 10.4.2 | Entrenamiento del Algoritmo .....  | 32 |
| 10.5   | Fase IV Análisis de los datos.....   | 33 |
| 10.1.1 | Generación de puntos de marca.....   | 33 |
| 10.5.2 | Generación de una malla de puntos para la evaluación.....  | 34 |
| 10.5.1 | Matriz de confusión.....   | 34 |
| 11     | RESULTADOS .....   | 36 |
| 11.1   | Resultado de las imágenes las cuales fueron corregidas .....   | 36 |
| 11.2   | Resultados de reclasificación del ecosistema manglar .....   | 40 |
| 11.2.1 | Resultados de evaluación del área piloto Sarstún Arriba y Sarstún Abajo del Área Protegida de Usos Múltiples Rio Sarstún ..... | 40 |
| 11.2.2 | Resultados de evaluación del área piloto de Parque Nacional Rio Dulce .....  | 42 |
| 11.2.3 | Resultados de evaluación del área piloto de La Graciosa, Punta de Manabique .....  | 45 |
| 12.1   | Aplicación del programa de incentivos forestales.....  | 49 |
| 12.2   | Técnicas para restauración del bosque de mangle.....   | 50 |
| 12.3   | Promoción del turismo comunitario .....  | 51 |
| 12     | CONCLUSIÓN .....   | 52 |
| 13     | RECOMENDACIONES .....  | 53 |
| 14     | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....   | 55 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación y cuantificación por especie de bosque manglar en el caribe guatemalteco. ....                             | 13 |
| Tabla 2. La tabla muestra el alcance que tiene la investigación. ....   | 15 |
| Tabla 3. Distribución del mangle en las áreas protegidas del caribe guatemalteco. ....  | 17 |
| Tabla 4. Cobertura del ecosistema manglar en el caribe guatemalteco. ....   | 17 |
| Tabla 5. La tabla describe la resolución de las imágenes del sensor Landsat 8. ....   | 21 |
| Tabla 6. La tabla muestra la resolución de las imágenes del sensor Rapideye. ....   | 22 |
| Tabla 7. Tabla muestra la resolución de las imágenes del sensor Sentinel-2. ....  | 23 |
| Tabla 8. Muestra las áreas seleccionadas para el estudio. ....  | 26 |
| Tabla 9. Describe los detalles de las imágenes seleccionadas para el estudio multitemporal. ....                                  | 29 |
| Tabla 10. Describe la distribución de datos de evaluación de la clasificación del ecosistema manglar. ....                        | 35 |
| Tabla 11. Tabla de la calificación del desempeño del algoritmo según el índice Kappa ..... 35                                     | 35 |
| Tabla 12. Establecimiento de puntos de marca en las áreas piloto para la clasificación..... 33                                    | 33 |
| Tabla 13. Evaluación del índice Kappa de la clasificación del área piloto del Rio Sarstún. 41                                     | 41 |
| Tabla 14. Distribución de Frecuencia de las muestras de la clasificación del área piloto Rio Sarstún. ....                        | 41 |
| Tabla 15. Distribución de frecuencia de puntos de muestreo al azar para la verificación de la exactitud de la clasificación. .... | 43 |
| Tabla 16. Describe la matriz kappa, para ver la exactitud de la clasificación supervisada. .44                                    | 44 |
| Tabla 17. Describe la matriz kappa, para ver la exactitud de la clasificación supervisada. .47                                    | 47 |
| Tabla 18. Distribución de frecuencia de puntos de muestreo al azar para la verificación de la exactitud de la clasificación. .... | 47 |
| Tabla 19. Tabla comparativa del ecosistema manglar del periodo 2012-2019. ....  | 52 |

## INDICE DE FIGURAS

|   |                |
|---|----------------|
| Figura 1. El mapa muestra la distribución del ecosistema manglar en el caribe guatemalteco.....   | 18             |
| Figura 2. Tiles del Sensor LandSat y sensor Rapideye. ....  | 27             |
| Figura 3. Plataforma que se utilizo para la descarga de imágenes. ....  | 28             |
| Figura 4. Plataforma de Planet la cual se utilizo para la descarga de imágenes Rapideye..   | 29             |
| Figura 5. Explica el procedimiento de filtrado realizado a las imágenes. ....   | 31             |
| Figura 6. Imagen de Rio Sarstún sin tratamiento y con tratamiento. ....   | 37             |
| Figura 7. Imagen Landsat sin tratamiento y posterior aplicando el tratamiento geométrico y radiométrico.....                              | 37             |
| Figura 8. Imágenes del sensor Rapideye de la plataforma Planet sin tratamiento y posterior con tratamiento y elaboración de mosaico. .... | 39             |
| Figura 9. Imagen Raster de la clasificación del ecosistema manglar del área de piloto Rio Sarstún. ....                                   | 40             |
| Figura 10. Imagen de la clasificación supervisada del área piloto del PNRD.....   | <b>¡Error!</b> |
| <b>Marcador no definido.</b>  |                |
| Figura 11. Imagen de clasificación del área piloto de RVSPM.....  | 45             |

## **1 RESUMEN**

Los manglares de la costa Atlántica y Pacífica de Guatemala, proveen de bienes y servicios ambientales, son fuente de recursos invaluable para la población guatemalteca, brindando un aporte considerable a las economías locales, siendo un capital natural con funciones protectoras en zonas costeras en adaptación ante los eventos del cambio climático.

Según la evaluación del Ministerio Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2012), a través del Estudio del Mangle del PNUMA, los ecosistemas manglares tanto en la costa Atlántica como Pacífica de Guatemala lo constituyen 18,840.08 hectáreas, donde en el Caribe o Costa Atlántica ocupaban una extensión territorial de 1,169.52 hectáreas.

El ecosistema manglar en Guatemala al igual que en otros países tiene graves problemas; ejercidos por presiones de actividades antrópicas y fenómenos naturales. Estos ecosistemas que pueden ser ribereños, costeros y lacustres son de gran importancia por los servicios ambientales que estos prestan, (Rodríguez & Vázquez, 2007).

A través del proyecto Bosques, Biodiversidad y Desarrollo Comunitario, Fortaleciendo la gestión nacional de áreas protegidas en Guatemala y Honduras, financiado por el Programa Euro clima de la Unión Europea se realizó un estudio para el análisis Multi Temporal del Ecosistema del Mangle, lo cual se realizó con una investigación dirigida por personal profesional del Instituto de Investigación del Caribe IICI del Centro Universitario de Izabal, -CUNIZAB-, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se utilizó un plan piloto, siendo un proceso de investigación el cual se centró en evaluar aspectos metodológicos y procedimientos que nos ha permitido establecer un análisis preliminar multitemporal de la dinámica actual del ecosistema manglar en el periodo 2,012-2019 en zonas priorizadas de las protegidas de Rio Sarstún, Punta de Manabique y Rio Dulce.

Se descargaron imágenes ópticas de sensores Landsat, Rapideye, y Sentinel-2, utilizando plataformas de Agencia Espacial Europea, COPERNICUS, Land Viewer/EOS, EarthExplorer y Planet, se realizaron visitas de campo para georreferenciar en las áreas piloto el bosque manglar los puntos ubicados espacialmente sirvieron para generar las áreas de entrenamiento para la clase manglar para las demás clases se realizó de manera visual ,

una vez generadas las áreas de entrenamiento se procedió a entrenar el algoritmo de Máxima Verisimilitud realizando una clasificación supervisada.

Con el método de algoritmo de Máxima Verisimilitud se determinó que en el área del ecosistema manglar para el año 2019 es de 259.83 hectáreas, comparado con el año 2012 era de 329.36 hectáreas, lo cual significa la pérdida de 69.53 hectáreas del ecosistema manglar en un periodo de 7 años.

Efectivamente hay una pérdida del boque de Mangle, por lo que este informe aborda lineamientos generales hacia proponer estrategias de protección y restauración con intervención local que de manera participativa se deberían de implementar para asegurar en el tiempo la conservación del ecosistema del mangle en el Caribe de Guatemala.

Durante los 20 meses de realización de esta investigación se acompañaron procesos que se constituyeron en lecciones aprendidas y experiencias sobre la importancia de proteger este ecosistema, por lo que la Asociación Programas de Gestión Local, -ASOPROGAL- promovió iniciativas de manera interinstitucional con otras organizaciones, para crear condiciones para integrar la mesa de dialogo del Mangle, donde autoridades locales, entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, academia, propietarios privados y comunidades abordan una agenda y han definido una ruta coordinada de múltiples esfuerzos para la protección y restauración del Mangle, entre ellos diferentes técnicas de reforestación, dependiendo de las características que presenta el área, consolidar iniciativas relacionadas con el turismo comunitario, teniendo el mejor ejemplo la comunidad de Cayo Quemado en el Parque Nacional Rio Dulce, que tiene como su principal atractivo para los turistas las lagunas con el bosque de mangle en una zona inundable, además se iniciaron procesos de primeros expedientes para ser ingresados al programa PROBOSQUE, sabidos que ya el Instituto Nacional de Bosque, el INAB ha autorizado que áreas de arrendamiento otorgadas por la nación a través de zonas de reserva territorial pueden ser sujetas a este incentivo, se considera este un valor agregado para promover y asegurar la protección del Mangle tanto para organizaciones comunitarias, propietarios privados, además otras organizaciones se han estado sumando, lo cual resultado ser una experiencia relevante para darle el verdadero seguimiento, donde el CONAP por estar en áreas protegidas otorga un dictamen técnico y jurídico.

## 2 INTRODUCCION

En el desarrollo de esta investigación planteo como objetivo través de una herramienta técnica y el uso de un modelo, demostrar con el análisis multitemporal el comportamiento comparativo del bosque de Mangle en áreas piloto de 3 áreas protegidas (Zona de Uso Múltiple Rio Sarstún, Parque Nacional Rio Dulce y Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique), ubicadas en el Departamento de Izabal, Guatemala, durante los 7 años entre 2012 aprovechando una base de datos realizada por el PNUMA en un estudio técnico del mangle, hasta el año 2019, desarrollando un trabajo de campo y obtención de datos, es de interés evidenciar la dinámica del ecosistema manglar en el Caribe guatemalteco a través del tiempo, el cual es considerado como uno de sus principales servicios ambientales la mitigación de los efectos del cambio climático y su alto grado de importancia biológica el cual es de interés a nivel nacional e internacional, sabidos que 2 de las 3 áreas además de tener un marco normativo en el sistema Guatemalteco de áreas protegidas, también son considerados sitios RAMSAR.

Es evidente que en Guatemala al igual que en otros países se tiene graves problemas de la pérdida del ecosistema manglar, a pesar de que estos ecosistemas tienen un alto nivel de productividad, prestan diversos servicios ambientales, solo por mencionar que el 70 % de los productos que consumimos del mar desarrollan sus ciclos de vida en estos sistemas, estos también proveen hábitat a diversas especies de flora y fauna.

Según la evaluación del Ministerio Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2012), los ecosistemas manglares en el caribe de Guatemala ocupaban una extensión territorial de 1,169.52 ha, diferentes estudios señalan a nivel mundial como un sector con mayor producción y contribución ambiental.

Se tiene que enfatizar que el acceder a las áreas de los ecosistemas manglares es difícil, por lo que se dificulta realizar actividades de protección, tener controles de vigilancia y aún más tener una estadística del comportamiento de la dinámica del ecosistema manglar a través del tiempo. Estas características hacen que se eleven los costos por realizar todo este tipo de actividades de conservación protección, por lo que se

considera que el uso de información espacial se convierta en una importante herramienta para el ente responsable de velar por la conservación de estos recursos y para planificar; estrategias de protección, conservación y restauración.

Es relevante conocer la distribución espacial y la dinámica de comportamiento a través de periodos de tiempo, esto permite obtener información del estado y la distribución actual de los manglares del caribe guatemalteco.

Esta investigación piloto evidencio el estado actual de los manglares del caribe guatemalteco, donde a través de un análisis espacial de las áreas de Rio Sarstún, Rio Dulce y Punta de Manabique, permitió observar los cambios de perdida de cobertura de mangle por acciones antrópicas como: tala (aprovechamiento para producir carbón, muebles) cambio de uso de suelo (espacio para muelles, chalets, etc.), avance de actividades de ganadería entre otros, y de manera natural por fenómenos naturales hidrometereológicos, enfermedades, y ataques de plagas.

Para esta investigación de plan piloto se utilizaron imágenes ópticas las cuales fueron seleccionadas y se realizaron correcciones radiométricas y geométricas, estos estudios son poco realizados para el caribe guatemalteco para determinar el estado del ecosistema manglar, lo cual podría ser una alternativa viable la utilización de tecnología espacial para la planificación de estrategias que coadyuven a la conservación, protección y rehabilitación de estos recursos.

### **3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En esta sección se plantea un análisis de la problemática de la degradación del ecosistema manglar del caribe guatemalteco, se propone actualizar y aplicar tecnología espacial lo cual permita obtener datos periódicos de la dinámica del ecosistema manglar lo cual permitirá obtener información actualizada y establecer una base para estrategias de protección, conservación y monitoreo constante del ecosistema.

Según (INAB-CONAP,2015) desde los años '90 se vienen realizando trabajos para realizar monitoreos de la cobertura forestal utilizando como insumo principal imágenes de satélite Landsat el cual complementan con algunas imágenes ASTER, pero estos no presentaban tipos de bosque, por lo que en el año 2,012 se realizó un mapeo con imágenes RapidEye.

El informe Mapa Forestal por Tipo y Subtipo de Bosque, 2012 para Guatemala detalla que para la clasificación de los tipos de mangle utilizo la base de datos del informe técnico del 2012 MARN-CATHALAC el cual posee registros de las especies de mangle que hay en el país, que representa un 0.23% de la superficie forestal.

Las instituciones responsables de administrar, proteger y conservar los ecosistemas manglares como MARN, CONAP e INAB, estos realizan esfuerzos para conservar los recursos, pero afrontan limitaciones técnicas, falta de equipo y económicas presupuestarias, el cual les permita realizar monitoreo para obtener información del comportamiento de la dinámica del ecosistema manglar en intervalos regulares de tiempo.

Se considera oportuno tener información actualizada del comportamiento del ecosistema manglar a través de periodos de tiempo y evaluar las causas de cambio con base a los diferentes usos, con ello planificar estrategias y acciones dirigidas a minimizar los impactos negativos que son causadas por actividades antropogénicas, y por efectos del cambio climático (fenómenos hidrometereológicos) la rehabilitación y restauración de los manglares.

El ecosistema manglar es considerado de gran importancia para mitigar los efectos del cambio climático, es un sistema con alta capacidad de producción, y presenta una gran capacidad de absorber cinco veces más dióxido de carbono y para procesarlo es cien veces más rápido que un bosque terrestre, pero estos ecosistemas son frágiles y presentan un alto grado de complejidad al momento de restaurar por medio de acciones de reforestación y la tasa de recuperación por medio de procesos de reforestación es muy baja, se considera que es mejor la rehabilitación por un proceso natural, por lo que se considera que es más factible económicamente monitorear en intervalos de tiempo para proteger y conservar que rehabilitar, (Kuenzer et al., 2011).

El problema de no realizar un monitoreo de forma continua, es que no se tiene ni se genera una base de información actualizada de los ecosistemas manglares, por lo tanto se desconoce la magnitud de las áreas degradadas, depredadas, ni el control si se está perdiendo el ecosistema manglar y a qué velocidad a través del tiempo y esto repercutirá en la minimización de servicios ambientales y en la calidad.

Se necesita implementar un método que permita un constante monitoreo de manera periódica y obtener información del comportamiento de estos ecosistemas para plantear estrategias y acciones para la conservación, (Ardila et al., 2019).

#### **4 JUSTIFICACIÓN**

La fragilidad de estos ecosistemas razonan la investigación bajo las líneas de investigación de conservación de los recursos naturales los cuales son de interés para el Instituto de Investigación del Caribe de Izabal.

Según la FAO (2014), menciona la importancia que tiene este tipo de ecosistema, considerados como un factor significativo para contrarrestar los efectos del cambio climático, por la capacidad y velocidad que este procesa las emisiones de dióxido de carbono, además de los servicios ecosistémicos que presta, la alta productividad y el alto valor económico que representan.

Los manglares son ecosistemas que han sido sometidos a altas presiones las cuales sobrepasan la capacidad de resiliencia y se enumeran algunas acciones que se consideran que ejercen mayor presión: empezaremos mencionando el calentamiento global, el aumento del nivel del mar, el aumento de la escorrentía (baja los niveles de sal en el agua) actividades antrópicas (Tala, cambio de uso de suelo, actividades de ganadería, actividades de recreación, contaminación por desechos sólidos etc.), (Rodríguez & Vázquez, 2007).

El Caribe guatemalteco es una de las áreas que está siendo sometidas a una alta presión y fuertemente amenazado por actividades antropogénicas (actividades agropecuarias, recreativas, incremento de la tasa demográfica etc.), sumado a los efectos del cambio climático, lo que provoca la alta vulnerabilidad a desastres naturales.

Por estas razones se evalúo que es de interés nacional evidenciar los cambios en el tiempo y espacio del ecosistema manglar de forma periódica, y generar una base de datos cartográficos actualizada que ayude a la toma de decisiones.

Esta investigación pretende aportar información que coopere a la actualización de la información cartográfica y poder establecer lineamientos para la protección y conservación de estos importantes ecosistemas.

## 5 ANTECEDENTES

Guatemala ha elaborado investigaciones de clasificación de cobertura manglar utilizando imágenes ópticas obtenidas de los sensores de Landsat TM5, TM7, ETM7, ALOS PARSAR, HYPERION, utilizando algoritmo de clasificación no supervisada aportando datos importantes de la distribución del bosque manglar del Caribe guatemalteco, el estudio realizado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2012) en el año 2012 este tipo de bosque ocupaban una extensión territorial de 1169.52 hectáreas, de los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera: Ver Tabla X.

| Distribución del Mangle |                                |         |
|-------------------------|--------------------------------|---------|
| Nombre Común            | Nombre Científico              | Área/ha |
| Mangle Rojo             | <i>(Rhizophora mangle)</i>     | 1131.06 |
| Mangle Negro            | <i>(Avicennia germinans)</i>   | 1.26    |
| Mangle Blanco           | <i>(Laguncularia racemosa)</i> | 37.20   |
|                         | Total                          | 1169.52 |

Tabla 1. Clasificación y cuantificación por especie de bosque manglar en el Caribe guatemalteco.

Fuente: Elaboración propia, tomado de (MARN, 2013).

Nota: Recuperado de Informe técnico: Estudio de la cobertura de mangle en la República de Guatemala. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2013).

Informe Técnico Forestal de Guatemala del año 2015, indica que para el caso de mangle se logra diferenciar las existencias a nivel de especie, siempre utilizando la base de datos del proyecto Mangle, 2012 MARN-CATHALAC el cual posee registros para 4 especies de mangle a nivel nacional, también se consideró las variables ralo y denso obteniendo como resultado Bosque Mangle Denso la cantidad de hectáreas de 19,071 representando el 0.53% y Bosque Mangle Ralo la cantidad de hectáreas de 5,890 representando el 0.16%, estos datos reflejan la fragilidad del ecosistema manglar a nivel nacional.

## **6 OBJETIVOS**

### **6.1 General**

Análisis multitemporal del ecosistema manglar para el periodo 2,012-2019 en las áreas piloto de las áreas protegidas de Rio Sarstún, Punta de Manabique y Rio Dulce

### **6.2 Específicos**

- Compilar información para establecer una línea base a partir del año 2012 de áreas piloto para el estudio del ecosistema manglar en la Región del Caribe Guatemalteco.
- Análisis comparativo de áreas piloto con cobertura de ecosistema manglar en la Región del Caribe Guatemalteco comprendido de los años 2012-2019.
- Proponer lineamientos generales para la restauración y protección del bosque de mangle, a través de diferentes estrategias participativas locales.

## 7 ALCANCES

El plan piloto se centra en evaluar cambios en el ecosistema manglar en un periodo de tiempo de 7 años, utilizando tecnología espacial, visitas de campo para determinar de manera confiable los cambios en este periodo de tiempo.

Tabla 2. La tabla muestra el alcance que tiene la investigación.

| <b>Método de Investigación</b>  | <b>Tipo de investigación</b>   | <b>Nivel de Investigación</b>   | <b>Diseño de Investigación</b>  | <b>Enfoque de la Investigación</b>   |
|---|--|---|---|--|
| <b>Científico</b>   | <b>Aplicada</b>  | <b>Predictiva</b>   | <b>Experimental</b>   | <b>Cuantitativa</b>  |
| Este será utilizado principalmente para la obtención de conocimiento de los cambios en las áreas pilotos del ecosistema manglar, del caribe guatemalteco. | Tiene como finalidad evaluar el uso de tecnología espacial para entender la dinámica del ecosistema manglar. | Tiene como objetivo determinar la los cambios utilizando tecnología espacial. | Este diseño permitirá identificar y cuantificar los cambios del ecosistema manglar del caribe guatemalteco. | El enfoque de la investigación es cuantitativo realizando un análisis estadístico para dar respuesta a los cambios del ecosistema manglar en un periodo de tiempo. |

Fuente: Elaboración propia.

Este plan piloto el cual está clasificada como una herramienta de investigación se desarrolló para determinar la dinámica del ecosistema manglar en un periodo de 7 años, poder evaluar los cambios en la cobertura por los factores naturales y antropogénicos que influyen en la sucesión del ecosistema.

Las evaluaciones de las áreas pilotos determinó como a través del tiempo se ha deteriorado y a consecuencia los efectos que repercuten en el ecosistema, para esto utilizamos tecnología espacial y visitas de campo para obtener un banco de marcas.

Esta tecnología espacial la cual se utilizó con un método predictivo para evaluar la distribución del ecosistema manglar a través de la utilización de tecnología espacial, visitas de campo con el objetivo de levantar un censo de los elementos, circunstancias que influyen o contribuyen a la dinámica del ecosistema manglar en el caribe guatemalteco.

Los manglares son catalogados como uno de los ecosistemas más productivos proveen las condiciones para el desarrollo de muchas especies, esto se debe a gran cantidad de nutrientes que genera y que este provee, la cantidad de especies que interactúan entre ellas con el ambiente abiótico por la interacción biológica y la relación estrecha que existe entre las especies que habitan en ellos.

Actualmente no se tiene una evaluación periódica del comportamiento del ecosistema manglar del caribe guatemalteco, esto representa una fuerte amenaza para este ecosistema debido a que los manglares presentan un esquema frágil y complejo para establecer acciones de rehabilitación de áreas degradadas lo cual también está siendo afectada las especies asociadas, por lo que este plan piloto busca evidenciar si existe una pérdida de este tipo de bosque a través de periodo de tiempo de 7 años.

El efecto de no conocer la dinámica del ecosistema manglar, es que no se tiene información del comportamiento del bosque a través del tiempo, si se está perdiendo y a qué velocidad está sucediendo, sumado a eso no se conoce cuál es el daño colateral a la afectación de especies que interactúan con este ecosistema de transición agua-tierra.

## 8 UBICACIÓN ESPACIAL DEL ESTUDIO

Las áreas del plan piloto se encuentran localizadas en la costa caribeña guatemalteca la cual se destaca por poseer ecosistemas manglares. Este tipo de bosque se encuentra ubicado al noroeste del país en el departamento de Izabal dentro de los municipios de Puerto Barrios (Cabecera Municipal) y Livingston.

Dichas áreas se encuentran dentro de las áreas protegidas de: Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique, Parque Nacional Rio Dulce y Área de Usos Múltiples Rio Sarstún, Ver Tabla 3.

Tabla 3. Distribución del mangle en las áreas protegidas del caribe guatemalteco.

| Áreas Protegida                              | Zonificación   | Lugar                          |
|--|--|--------------------------------|
| Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique | Zona de uso intensivo, zona de recuperación marítima, zona de uso múltiple | Bahía la Graciosa              |
| Parque Nacional Rio Dulce                    | Zona Primitiva   | Salvador Lagunita              |
| Área de Usos Múltiples Rio Sarstún           | Zona Intangible  | Sarstún Abajo y Sarstún Arriba |

Fuente: Modificado de (MARN-CATHALAC,2013).

Según (MARN-CATHALAC,2013) para el Caribe Guatemalteco se cuenta con las siguientes especies de mangle: Mangle Rojo (*Rhizophora mangle*), Mangle Blanco (*Avicennia germinans*), Negro (*Laguncularia racemosa*), distribuidas en las áreas piloto a evaluar. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Cobertura del ecosistema manglar en el caribe guatemalteco.

| Áreas piloto                    | Área Protegida                               | Cobertura/ha | %    |
|---------------------------------|--|--------------|------|
| Bahía la graciosa               | Reserva de Vida Silvestre Punta de Manabique | 86.19        | 61.8 |
| Salvador Lagunita, Cayo Quemado | Parque Nacional Rio Dulce                    | 192.45       | 30.2 |
| Sarstún Abajo, Sarstún Arriba   | Área de Usos Múltiples Rio Sarstún           | 50.72        | 8.0  |
|                                 | Total  | 329.36       | 100  |

Fuente: Modificado de (MARN-CATHALAC,2013).

El total de área evaluada en las áreas piloto es de 329.36 hectáreas lo que en la región del caribe representa el 28.16 % del total de 1169.52 hectáreas.

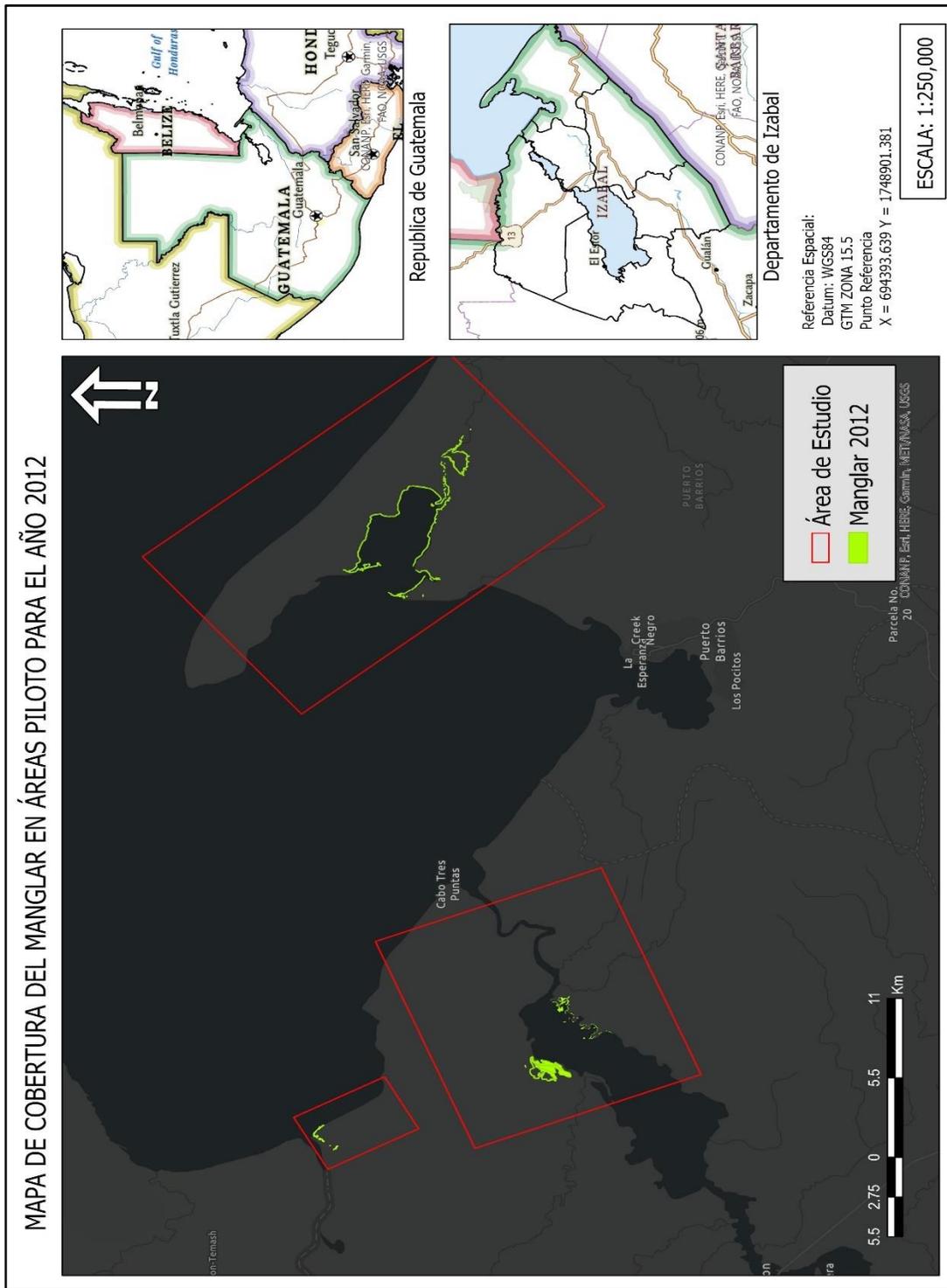


Figura 1. El mapa muestra la distribución del ecosistema manglar en el caribe guatemalteco.

Nota: El mapa muestra la distribución del ecosistema manglar en el caribe guatemalteco evaluado en el año 2012 en el informe técnico elaborado por MARN-CATHALAC.

## **9 MARCO CONCEPTUAL**

En este capítulo se describe toda la terminología que se utilizó para realizar la investigación la cual pondrá en contexto al lector con todo el tecnicismo para el desarrollo, la cual se basa en el análisis multitemporal de las áreas piloto del caribe guatemalteco.

### **9.1 Bosque manglar**

Los ecosistemas manglares son también conocidos como bosques salados y considerados altamente productivos, estos presentan arboles adaptados a condiciones extremas de salinidad del agua, estas áreas se localizan en la zona intermareal en latitudes tropicales y subtropicales, pero son considerados frágiles presentan complejidad para recuperar las áreas degradadas son altamente amenazados por diversas actividades antropogénicas que afectan y alteran el desarrollo natural del ecosistema.

Según el Programa De Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) indica que a pesar de que son considerados altamente productivos, son constantemente sometidos a presiones antropogénicas lo que hace este ecosistema altamente vulnerables y destruidos a una intensidad más rápido que un bosque terrestre, El Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo,(PNUD),<https://www.gt.undp.org/content/guatemala/es/home/presscenter/articles/2018/10/ecosistema-manglar.html>.

Según (Taqué & Vanegas, 2017) enfatizan en la importancia del ecosistema manglares y el papel que juega en la ecología de las costas tropicales, los servicios ambientales que proveen para la población humana, los cuales incluyen; protección y estabilización en la línea de costa, proporcionando criaderos de numerosos recursos pesqueros económicamente de suma importancia, al mismo tiempo, los bosques manglares exportan materia orgánica que es el alimento de diversos recursos pesqueros, de los cuales el 70 % son productos comerciales que provee el mar caribe, estos son capaces de atenuar la erosión de los suelos y los efectos que produce el oleaje y las corrientes proveen de habitan para muchas especies que se encuentran en el listado de especies amenazadas y especies en peligro de extinción.

### 9.1.1 Características del bosque manglar

El ecosistema manglar conocido como cinturón verde está asociado a especies arbustivas, otras plantas y a fauna que interactúan en la zona de transición entre agua y tierra (Blanco, Ortiz, & Urrego, 2015).

En 1971, se estableció el tratado intergubernamental RAMSAR específicamente para áreas inundables el mayor tiempo del año conocidos como: humedales. Dicho tratado enfatiza la importancia de estas áreas y que se deben de conservar y el uso debe ser racional de los recursos naturales. Guatemala se adhirió a este tratado el 26 de enero de 1988, a través del decreto legislativo 4-88 del Congreso de la República (CONAP& FONACON, 2015).

En el caribe guatemalteco se pueden observar manglares donde predomina la especie de mangle rojo (*Rhizophora mangle*), pero también existe las especies de mangle negro (*Avicennia germinans*) en menor cantidad, mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) distribuidos geográficamente en las zonas marino-costeras. (MARN-CATHALAC, 2012).

El bosque manglar del caribe guatemalteco se distribuye dentro de las áreas protegidas:

- Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique
- Parque Nacional Rio Dulce
- Área de Usos Múltiples Ríos Sarstún.
- Zona de Veda Bahía Santo Tomas
- Reserva Protectora de Manantiales Cerro San Gil
- 2% se encuentra fuera de áreas protegidas

### 9.1.2 Servicios ambientales del bosque manglar

Dentro de los muchos servicios ambientales que estos ecosistemas proveen podemos mencionar: forman una barrera natural de protección contra fenómenos hidrometeorológicos, focos fundamentales para mitigar el cambio climático, tienen la capacidad de absorber 5 veces más dióxido de carbono y lo procesan 100 veces más rápido que un bosque terrestre, proveen hábitat para aves migratorias y aves locales, mamíferos, para una gran cantidad de crustáceos, el 90% de peces tienen un ciclo de vida en estos ecosistemas, son filtradores de agua, (Valero, 2017).

## 9.2 Percepción remota

Es la ciencia capaz de obtener, procesar y analizar datos y/o imágenes capturadas desde plataformas espaciales o aeronaves y la radiación electromagnética, también es conocida como teledetección o sensoramiento remoto, (Villegas,2008).

## 9.3 Sensores Remotos

Estos son herramientas o instrumentos que sirven para la teledetección y el objetivo principal es generar imágenes capaces de identificar objetos, áreas o fenómenos desde la distancia de eventos que suceden en el planeta, (COPERNICUS, 2018).

### 9.3.1 Sensor Landsat 8

La misión Landsat 8 fue lanzado en el 2013, realiza un barrido cada 16 días, y se encuentra a una altura de orbita de 705 kilómetros y su tipo de orbita es sincronizado con el sol y las imágenes no tienen costo por lo que se pueden obtener de forma gratuita. Ver Tabla 5.

Tabla 5. La tabla describe la resolución de las imágenes del sensor Landsat 8.

| Banda                            | Longitud de onda  | Resolución | Ancho de la franja |
|----------------------------------|-------------------|------------|--------------------|
|                                  | ( $\mu\text{m}$ ) | (m)        | (km)               |
| Banda 1 Costero / Aerosol (Otro) | 0,43 hasta 0,45   | 30         | 185                |
| Banda 2 Azul (VIS)               | 0,45 hasta 0,51   | 30         | 185                |
| Banda 3 Verde (VIS)              | 0,53 hasta 0,59   | 30         | 185                |
| Banda 4 Roja (VIS)               | 0,64 hasta 0,67   | 30         | 185                |
| Banda 5 Infrarrojo cercano (NIR) | 0,85 hasta 0,88   | 30         | 185                |
| Banda 6 SWIR 1 (SWIR)            | 1,57 hasta 1,65   | 30         | 185                |
| Banda 7 SWIR 2 (SWIR)            | 2.11 hasta 2.29   | 30         | 185                |
| Banda 8 Pancromático (Otro)      | 0,5 hasta 0,68    | 15         | 185                |
| Band 9 Cirrus (Otro)             | 1,36 a 1,38       | 30         | 185                |
| Banda 10 TIR 1 (TIR)             | 10,6 a 11,19      | 100        | 185                |
| Banda 11 TIR 2 (TIR)             | 11,5 a 12,51      | 100        | 185                |

Fuente: University of Twente.

<https://webapps.itc.utwente.nl/sensor/getsat.aspx?name=Landsat%208>

Nota: La tabla muestra las características que posee el sensor Landsat8.

### 9.3.2 Sensor Rapideye

Las imágenes Rapideye son un orto producto estándar con una resolución con una resolución de 5 m las ortos incluyen una banda de RED EDGE el cual se caracteriza por la sensibilidad a los cambio en la clorofila. Ver Tabla XX

Tabla 6. La tabla muestra la resolución de las imágenes del sensor Rapideye.

| Banda                    | Longitud de onda  | Resolución | Ancho de la franja |
|--------------------------|-------------------|------------|--------------------|
|                          | ( $\mu\text{m}$ ) | (m)        | (km)               |
| Banda 1 Azul (VIS)       | 0,44 hasta 0,51   | 5 (6,5)    | 77                 |
| Banda 2 Verde (VIS)      | 0,52 hasta 0,59   | 5 (6,5)    | 77                 |
| Banda 3 Roja (VIS)       | 0,63 hasta 0,685  | 5 (6,5)    | 77                 |
| Banda 4 Borde rojo (VIS) | 0,69 hasta 0,73   | 5 (6,5)    | 77                 |
| Banda 5 NIR (NIR)        | 0,76 hasta 0,85   | 5 (6,5)    | 77                 |

Fuente: University of Twente. <https://webapps.itc.utwente.nl/sensor/getsat.aspx?name=RapidEye>

Nota: La tabla muestra las características que posee el sensor Rapideye.

Este sensor es de la Organización estadounidense Planeta cuenta con 5 satélites, 5 bandas espectrales, la cual tiene un barrido de 5 millones de km<sup>2</sup>/día, este fue lanzado el 29 de agosto del 2008 y será retirado en marzo del 2020.

### 9.3.3 Sensor Sentinel-2

Este sensor provee de imágenes periódicamente con resolución multiespectrales, permite la obtención de imágenes de alta resolución, por lo que se utilizó para el monitoreo de las zonas con ecosistemas manglares, se utilizó porque nos proporciona 13 bandas espectrales, cuatro bandas son de 10 metros lo que permite que se mejore la resolución de las imágenes y 6 bandas a 20 metros y 3 bandas a 60 metros de resolución espacial. (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/overview>). Ver Tabla 7.

Tabla 7. Tabla muestra la resolución de las imágenes del sensor Sentinel-2.

| Banda               | Longitud de onda  | Ancho de banda    | Resolución | Ancho de la franja | Tiempo de revisión |
|---------------------|-------------------|-------------------|------------|--------------------|--------------------|
|                     | ( $\mu\text{m}$ ) | ( $\mu\text{m}$ ) | (m)        | (km)               | (días)             |
| Banda 1 (VIS)       | 0,443             | 0,02              | 60         | 290                | 5                  |
| Banda 2 Azul (VIS)  | 0,49              | 0,065             | 10         | 290                | 5                  |
| Banda 3 Verde (VIS) | 0,56              | 0,035             | 10         | 290                | 5                  |
| Banda 4 Roja (VIS)  | 0,665             | 0,03              | 10         | 290                | 5                  |
| Banda 5 (VIS)       | 0,705             | 0,015             | 20         | 290                | 5                  |
| Banda 6 (VIS)       | 0,74              | 0,015             | 20         | 290                | 5                  |
| Banda 7 (VIS)       | 0,775             | 0,02              | 20         | 290                | 5                  |
| Banda 8 (NIR)       | 0,842             | 0,115             | 10         | 290                | 5                  |
| Banda 8A (NIR)      | 0,865             | 0,02              | 20         | 290                | 5                  |
| Banda 9 (NIR)       | 0,94              | 0,02              | 60         | 290                | 5                  |
| Banda 10 (SWIR)     | 1,375             | 0,02              | 60         | 290                | 5                  |
| Banda 11 (SWIR)     | 1,61              | 0,09              | 20         | 290                | 5                  |
| Banda 12 (SWIR)     | 2,19              | 0,18              | 20         | 290                | 5                  |

Fuente: Recuperado de Sentinel-2 University of Twente.

<https://webapps.itc.utwente.nl/sensor/getsat.aspx?name=Sentinel-2A>

Nota: La tabla muestra las características que posee el sensor Sentinel-2.

### 9.3.2 Imágenes de satélite

Las imágenes de satélite ópticas son una representación gráfica que es captada por un sensor el cual se localiza en el satélite, la información codificada es enviada a una estación la cual procesa y genera las imágenes, estas tienen coordenadas graficas o proyectadas de los objetos captados por el sensor. (COPERNICUS, 2018).

### 9.3.3 Pixel

Este es la unidad más pequeña y componente básico de las imágenes, según es establecido en lenguaje digital es la unidad menor de una imagen y este es medido en milímetros, cada uno está conformado por unidades homogéneas de colores que al ser unidos conforman una variación de colores lo cual se obtienen una imagen, (Chuvieco, 1995).

#### **9.4 Aplicación de algoritmos**

El algoritmo se sustenta en los principios, de las celdas de cada muestreo en un espacio el cual es multidimensional y el otro en el teorema de Bayes para la toma de decisiones, (Chuvienco, 2008), el cual estudia los números digitales en cada seno y el cual está adaptado a la distribución estándar, este permite poder establecer una clasificación al número digital, en otras palabras, asocia la dispersión real de los números digitales.

Este coeficiente de verisimilitud generalizado es el más utilizado por la característica y cuenta con disposición de datos originales.

#### **9.5 Dispersión espacial**

La dispersión espacial se basa en la forma en que la población se distribuye en un espacio físico, características de las especies, para lo cual se define como un producto o fruto su tamaño o grado de concentración, la disponibilidad de las condiciones ideales para el desarrollo y la complejidad de los ecosistemas boscosos los cuales están inmersos dentro de la heterogeneidad ambiental, (Baddi, Guillen, Cerna & Landeros, 2011).

#### **9.6 Sistemas de Información Geográfico (SIG)**

Esta es una herramienta la cual es aplicable a diferentes disciplinas para el desarrollo de investigación, planificación, controles y monitoreos de los recursos naturales, vulnerabilidad, fenómenos naturales, meteorología, efectos de cambios climáticos, geografía, geo marketing, etc.

Los Sistemas de Información Geográfica permiten a los usuarios analizar, modelar la información espacial, ubicada en un lugar de interés.

## 10 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio piloto y determinar el análisis multitemporal del ecosistema manglar del caribe guatemalteco en el periodo 2012-2019 en las áreas protegidas de Zona de Uso Múltiple de Rio Sarstún, Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique y Parque Nacional Rio Dulce, se propone realizarlo en 4 fases siendo las siguientes: fase I: Recopilación de la información; fase II: Tratamiento y calibración de las imágenes descargadas; fase III; Aplicación de Algoritmos fase IV: Análisis de la información fase

En la primera fase se realizó la recopilación de la información: se elaboró un cronograma de planificación de actividades de campo y ubicación geográfica del ecosistema manglar del caribe guatemalteco utilizando hojas cartográficas, base de datos de MARN 2012, para identificar las áreas piloto.

En la segunda fase: la clasificación supervisada aplicando el algoritmo de Máxima Verisimilitud, se utilizaron imágenes ópticas del sensor Landsat-7, RapidEye, Sentinel-2 para determinar la multitemporalidad espacial del ecosistema manglar en el caribe guatemalteco.

La fase tres: se analizará la comparación de la correspondencia espacial de la multitemporalidad del ecosistema manglar del caribe guatemalteco aplicando el algoritmo de Máxima Verisimilitud en el período 2012-2019 del ecosistema manglar y establecer la correlación entre ambos métodos.

Para la fase cuatro: se evaluó el porcentaje de precisión con que se realizó la clasificación para evaluar el ecosistema manglar del caribe guatemalteco en un lapso de 7 años periodo 2012-2019.

Con base a la información disponible comparativa se definieron estrategias generales para la protección y restauración del bosque de Mangle.

## 10.1 Fase1: Recopilación de información

En esta fase se desarrollaron actividades de levantamiento de información del conjunto de actividades las cuales estaban destinadas a la recopilación de datos de campo, para realizar la evaluación de la multitemporalidad del ecosistema de mangle utilizando áreas piloto.

### 10.1.1 Selección de áreas de muestro

El 98% del ecosistema manglar en la región del caribe guatemalteco se encuentra distribuido dentro de áreas protegidas tan solo el 2% se encuentran fuera de áreas protegidas. Se realizó una cuidadosa selección considerando aspectos de importancia como: Riesgos de deforestación, importancia para la sostenibilidad de los recursos marino-costeros, capacidad de resiliencia, áreas con regeneración, áreas de importancia para detener turbulencias atmosféricas principalmente sirviendo de protección a las comunidades cercanas, presiones a cambio de uso de suelo las cuales son inducida por algunas acciones socioeconómicas, las cuales son: Ver Tabla 8.

Tabla 8. Muestra las áreas seleccionadas para el estudio.

| AREA PROTEGIDA                               | SIGLAS  | ÁREAS PILOTO                    |
|--|---------|---------------------------------|
| Reserva de Vida Silvestre Punta de Manabique | (RVSPM) | Cobertura Bahía la Graciosa     |
| Parque Nacional Rio Dulce                    | (PNRD)  | Salvador Lagunita, Cayo Quemado |
| Área de Usos Múltiples Rio Sarstún           | (AUMRS) | Sarstún Arriba y Sarstún Abajo  |

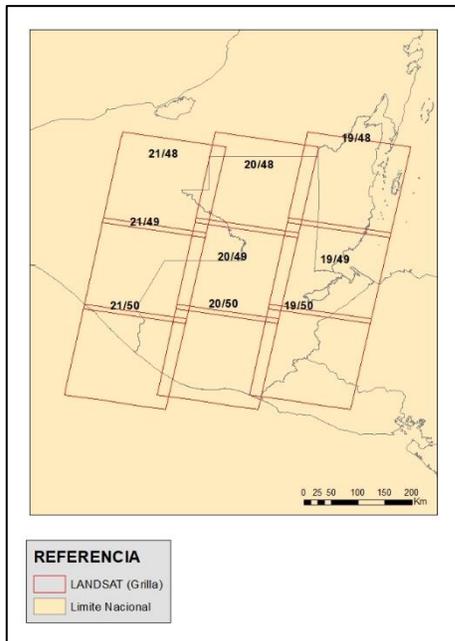
Fuente: Modificado de (MARN-CATHALAC,2013).

### 10.1.2 Selección de imágenes

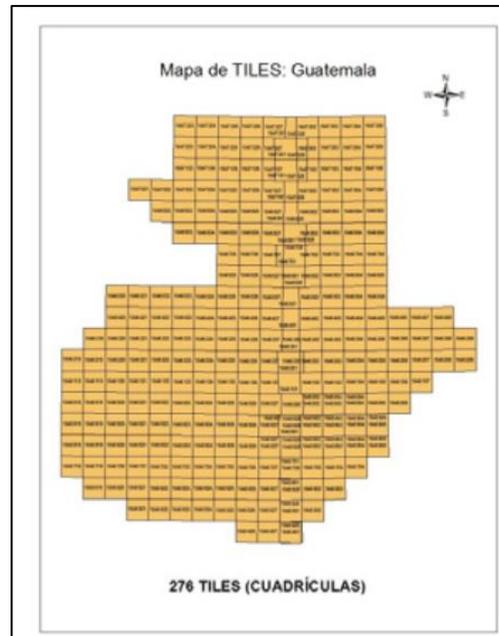
Se realizó la selección de imágenes ópticas de sensores Landsat, Rapideye, y Sentinel-2, utilizando plataformas de Agencia Espacial Europea, COPERNICUS, Land Viewer/EOS, EarthExplorer y Planet.

Para la selección de las imágenes ópticas se consideraron aspectos como: disponibilidad de biblioteca de imágenes, porcentaje de nubosidad, calidad de imagen, evitar el bandeo de algunas imágenes, las cuales son características del área, razón por la que se obtuvieron imágenes de diferentes plataformas.

Las imágenes seleccionadas tienen una cobertura de 30 x30 metros y de 5x5 metros las cuales perteneces a las escenas (tildes) siguientes:



Grillas para LANDSAT.



Grillas para sensor RapidEye.

*Figura 2. Tiles del Sensor LandSat y sensor RapidEye.*

### 10.2.3 Descarga de imágenes

Las descargas de imágenes fueron realizadas a través de la nube utilizando las plataformas, se utilizaron los filtros que tienen las plataformas las cuales facilitan la selección de las imágenes, principalmente por año, mes, porcentaje de nubosidad, sombra y elevación solar.

Todas las imágenes seleccionadas fueron en la temporalidad de los meses de marzo-septiembre, esto porque en estos meses en el caribe guatemalteco, se pueden obtener imágenes con menor ruido.

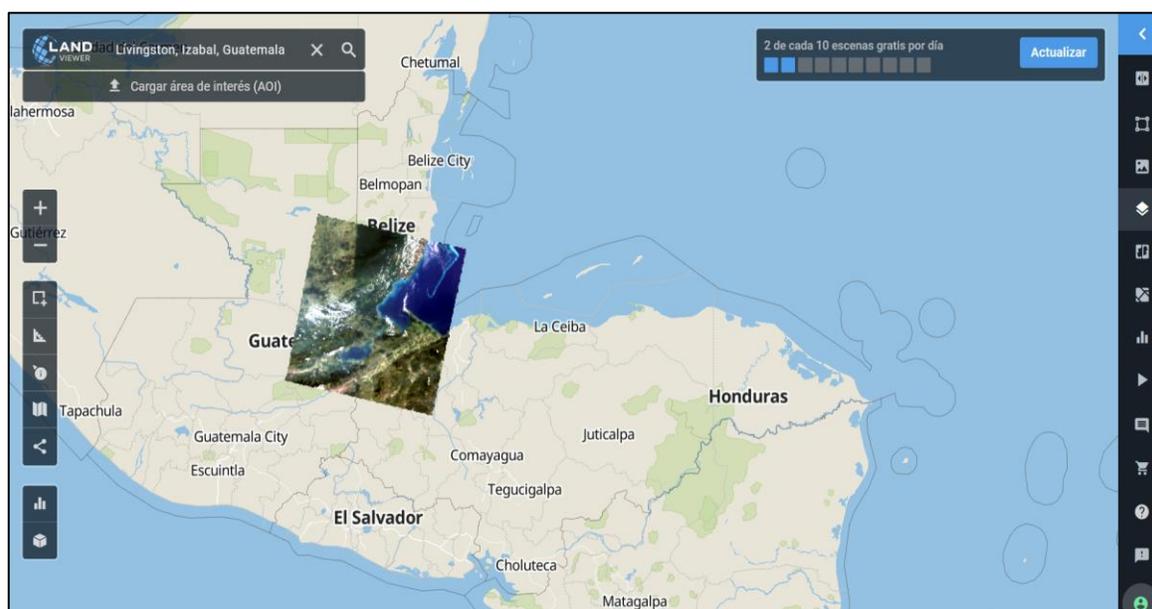
Se utilizaron las plataformas Earth Science, Land Viewer EOS, Planet Explorer (estas imágenes tienen costo, pero para investigaciones para academias CUNIZAB se puede acceder a imágenes de extensiones de 12 km<sup>2</sup> de forma gratuita), USGS science for a changing World, Copernicus Open Acces Hub, [asf.alaska.edu](http://asf.alaska.edu), las cuales brindan servicios y

productos para poder acceder a cambios en la cubierta terrestre tanto locales como sistemas globales son imágenes gratuitas.

#### 10.2.4 Earth Science, Land Viewer EOS

Es una plataforma en la nube, de las más avanzadas para búsqueda, almacenamiento, análisis, visualización de datos geoespacial, y son de libre acceso.

Figura 3. Plataforma que se utilizó para la descarga de imágenes.



Fuente: <https://eos.com/landviewer>

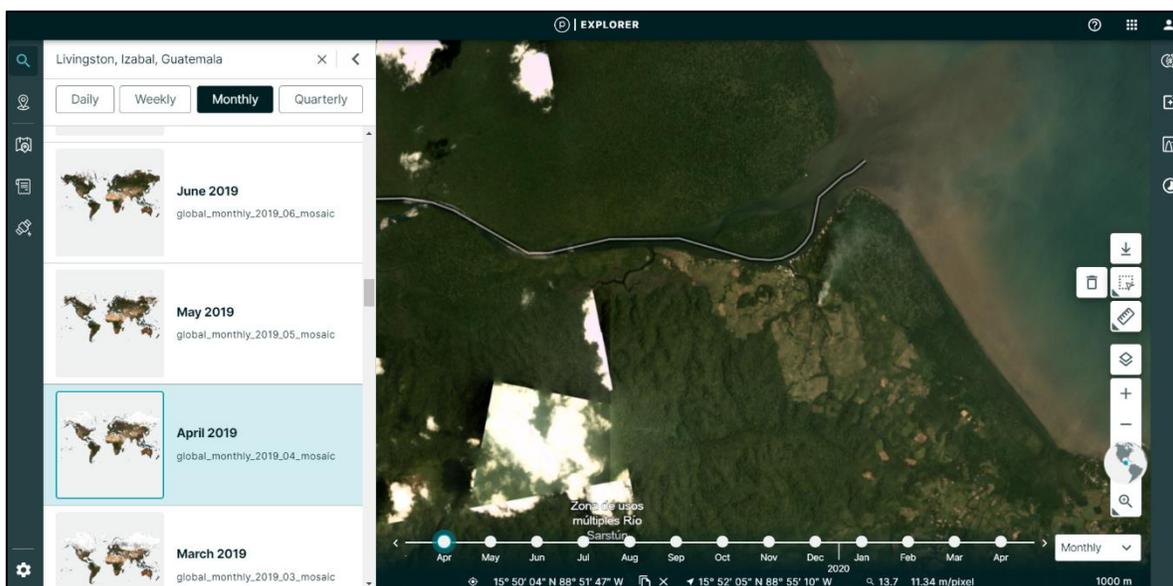
Recuperado de: [eos.com/landviewer/?lat=15.82397&lng=-86.46790&z=7&id=LC08\\_L1TP\\_019049\\_20210218\\_20210304\\_01\\_T1&b=Red,Green,Blue&anti&pansharp](https://eos.com/landviewer/?lat=15.82397&lng=-86.46790&z=7&id=LC08_L1TP_019049_20210218_20210304_01_T1&b=Red,Green,Blue&anti&pansharp)

ening

#### 10.2.5 Planet

Es una plataforma empresarial líder en la industria aeroespacial, la cual utiliza la electrónica ajustada para la innovación en los campos aeroespaciales, esta empresa ha desplegado con éxito 351 satélites y tiene más de 100 satélites en órbita y tiene la capacidad de un barrido de 250 millones de kilómetros cuadrados de imágenes diarias con una resolución de 5 metros. Ver Figura 4.

Figura 4. Plataforma de Planet la cual se utilizó para la descarga de imágenes RapidEye.



Fuente: <https://www.planet.com/>

### 10.2.6 Imágenes Seleccionadas

Las imágenes que se utilizaron para evaluar la multitemporalidad del ecosistema manglar de las áreas piloto se describe en la siguiente tabla. Ver tabla 9.

Tabla 9. Describe los detalles de las imágenes seleccionadas para el estudio multitemporal.

| Detalle de las Imágenes                     | Sensor    |
|---|-----------|
| LC08_L1TP_019049_20210219_20210304_01_T1    | LandSat-8 |
| 20190414_160429_1646408_RapidEye-3          | Rapideye  |
| 20190414_160430_1646407_RapidEye-3          | Rapideye  |
| Multispectral_1646308_2019-04-14_RapidEye-3 |           |
| Multispectral_1646307_2019-04-14_RapidEye-3 | Rapideye  |
| Multispectral_1646408_2019-04-14_RapidEye-3 |           |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de los sensores.

### **10.3 Fase 2 Tratamiento y calibración de las imágenes seleccionadas**

Esta fase es necesaria desarrollarla para realizar correcciones a las imágenes descargadas de los sensores.

#### *10.3.1 Preprocesamiento*

Consistió en el procesamiento inicial de las imágenes crudas, esto consistió en darle un tratamiento, calibración y filtrado de imágenes, se utilizó para corregir las distorsiones radiométricas y geométricas, la eliminación del ruido.

#### *10.3.2 Calibración radiométrica*

En este proceso se realizó para corregir los factores siguientes: valores de brillo de los pixeles causados por interferencias atmosféricas y por efectos relacionados a instrumentación, el cual se eliminaron los valores más altos del rebote de los pixeles.

#### *10.3.3 Calibración Geométrica*

Se realizó el proceso de calibración geométrica para corregir los desplazamientos, distorsiones geométricas las cuales se producen por la inclinación del sensor, esto puede darse por la posición en la que se encuentra en el momento de la captura de la fotografía, con esto corregimos los errores de distorsiones las cuales son derivadas por el rango oblicuo (Slant range), la sombras y el desplazamiento.

#### *10.3.4 Filtrado*

Este proceso fue realizado con el propósito de eliminar los ruidos atmosféricos, lo cual se utilizó un procesador y el filtrado matriz de Kernel (matriz de convulsión), el cual consiste en utilizar una matriz de la cual corresponde a la primera imagen tratada, la imagen es una imagen bidimensional de pixeles la cual está en coordenadas rectangular, se utilizó una matriz de 3x3 se considera debido a que esta son las más utilizadas y con mejores efectos para realizar este análisis.

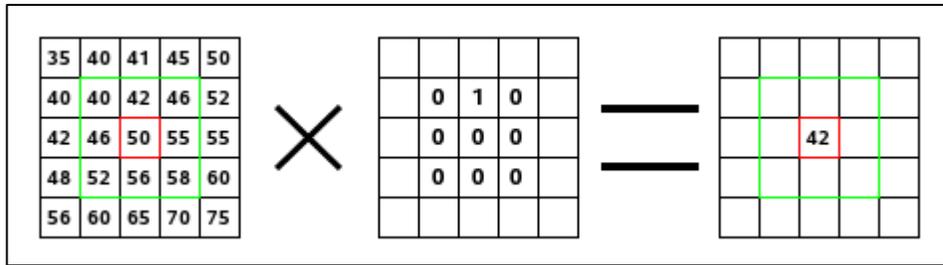


Figura 5. Explica el procedimiento de filtrado realizado a las imágenes.

Nota: el pixel inicial tiene un borde rojo, el filtrado de Kernel tiene borde verde, en el medio el filtro de Kernel y el del borde verde es el resultado del filtrado, el filtro lee de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, todos los pixeles del área de acción de Kernel, multiplica el valor de cada uno de ellos y suma el resultado.  $(40*0)+(42*1)+(46*0) + (46*0)+(50*0)+(55*0) + (52*0)+(56*0)+(58*0) = 42$ .

Con este filtrado se realizó el análisis digital, y se buscó aislar los componentes de interés, con esto se suavizo los contrastes especiales de los números digitales (DN) transformándolos a los pixeles vecinos y así obtuvimos las variaciones del dominio espacial, (Chuvioco, 2008).

Con este filtrado se mejoró la visualización de las imágenes utilizadas, se eliminaron valores detectados o considerados anómalos y se marcaron los rasgos lineales de interés para el análisis multitemporal del ecosistema manglar, esto permitió obtener imágenes mejoradas y resaltando, suprimiendo de forma seleccionada la información de las imágenes.

### **10.4 Fase 3: Aplicación de Algoritmos**

En esta fase se entrenó el algoritmo para realizar la clasificación supervisada utilizando 6 clases.

#### *10.4.1 Generación de áreas de entrenamiento*

Para generar las áreas de entrenamiento fue necesario realizar los siguientes pasos:

- a. Se generaron puntos georreferenciaron de las áreas provistas con la especie manglar en las áreas de estudio.
- b. Se generaron 6 clases para realizar la clasificación: para la clase manglar se utilizaron los puntos georreferenciados, para las clases, agua abierta, bosque latifoliado, suelo, actividad agropecuaria e infraestructura estas fueron seleccionadas de manera visual.
- c. Esta metodología se utilizó para las tres áreas piloto objeto de análisis de estudio.

#### *10.4.2 Entrenamiento del Algoritmo*

Una vez seleccionadas las áreas de entrenamiento se procedió a entrenar el algoritmo de clasificación supervisada de Máxima Verisimilitud, el cual está basado en dos principios básicos que son:

1. Las celdas en cada muestra de clases del espacio multidimensional que se distribuyen normalmente.
2. El teorema de Bayes de toma de decisiones.

Esta clasificación considera las varianzas y covarianzas de las firmas de las clases asignada a cada celda y cada clase representa el archivo de firma. Considerando estas dos características para cada valor de celda, se calcula la probabilidad estadística para cada clase a fin de determinar la celda a que clase pertenece.

Es decir, se utilizaron factores importantes como la media y la matriz de covarianza donde se obtienen datos de entrada, los cuales son necesarios para la ejecución del modelo, donde la probabilidad desconocida de encontrar un pixel de la clase (I,II,III, .....),  $p(!ijx)$  = es igual a la que interesa. Existe la probabilidad de que un  $p(!ijx)$ = pixel de cualquier clase se pueda encontrar en la posición X.

## 10.5 Fase IV Análisis de los datos

Se realizó un análisis de confiabilidad de los datos que se obtuvieron de la clasificación supervisada, a través de la matriz de confusión se evaluó el desempeño del algoritmo, para clasificar el cual se utilizó para hacer la relación con el estudio técnico del año 2012 y poder analizar el comportamiento en este periodo de tiempo en las áreas piloto del ecosistema manglar.

### 10.5.1 Generación de puntos de marca

Se fueron estableciendo puntos de control o marca en las visitas de campo georreferenciando áreas con cobertura manglar, los cuales fueron utilizados para la selección de áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de las áreas piloto del ecosistema manglar de las zonas piloto en las áreas protegidas de Rio Dulce, Rio Sarstún y Punta de Manabique.

Para establecer los puntos de marca se utilizó una antena receptora de señal de satélite, con capacidad de recepción de señal de sistema de posicionamiento global GPS y GLONASS. La antena receptora tiene como característica la capacidad de recibir señal en los canales L1 y L2 compatible con SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS) y conector de cable de antena tipo TNC.

Se establecieron 457 puntos de marca en las áreas piloto los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera: Ver Tabla 12.

Tabla 10. Establecimiento de puntos de marca en las áreas piloto para la clasificación.

| <b>Áreas piloto</b>             | <b>Área Protegida</b>                        | <b>Puntos</b> |
|---------------------------------|--|---------------|
| Bahía la Graciosa               | Reserva de Vida Silvestre Punta de Manabique | 209           |
| Salvador Lagunita, Cayo Quemado | Parque Nacional Rio Dulce                    | 172           |
| Sarstún Abajo, Sarstún Arriba   | Área de Usos Múltiples Rio Sarstún           | 76            |
| Total                           |  | 457           |

Fuente: Elaboración propia.

### 10.5.2 Generación de una malla de puntos para la evaluación

Para la validación de precisión con el que el algoritmo clasifico las imágenes se generó una malla de puntos para esto se utilizó el muestreo aleatorio. Para la generación de la malla se utilizó la herramienta Create Fishnet para cada área piloto.

La cantidad de puntos de la malla fue en relación con la cantidad de píxeles que tiene las imágenes por lo que para las tres áreas no fue la misma cantidad de puntos. Se utilizo la matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de una proporción en poblaciones finitas.

**Figura 6**

Fórmula para calcular los puntos de verificación para la validación de la metodología

| Matriz de Tamaños Muestrales para diversos margenes de error y niveles de confianza, al estimar una proporción en poblaciones Finitas |                                |                                       |      |      |      |      |      |      |      |       |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| N [tamaño del universo]   | 1.134                          | ← Escriba aquí el tamaño del universo |      |      |      |      |      |      |      |       |
| p [probabilidad de ocurrencia]  | 0,2                            | ← Escriba aquí el valor de p          |      |      |      |      |      |      |      |       |
| <b>Nivel de Confianza (alfa)</b>  | <b>1-alfa/2</b>                | <b>z (1-alfa/2)</b>                   |      |      |      |      |      |      |      |       |
| 90%   | 0,05                           | 1,64                                  |      |      |      |      |      |      |      |       |
| 95%   | 0,025                          | 1,96                                  |      |      |      |      |      |      |      |       |
| 97%   | 0,015                          | 2,17                                  |      |      |      |      |      |      |      |       |
| 99%   | 0,005                          | 2,58                                  |      |      |      |      |      |      |      |       |
| <b>Fórmula empleada</b>   |                                |                                       |      |      |      |      |      |      |      |       |
| $n = \frac{n_o}{1 + \frac{n_o}{N}} \quad \text{donde:} \quad n_o = p^*(1-p)^* \left( \frac{z(1-\frac{\alpha}{2})}{d} \right)^2$       |                                |                                       |      |      |      |      |      |      |      |       |
| Matriz de Tamaños muestrales para un universo de 1134 con una p de 0,2  |                                |                                       |      |      |      |      |      |      |      |       |
| Nivel de Confianza  | d [error máximo de estimación] |                                       |      |      |      |      |      |      |      |       |
|   | 10,0%                          | 9,0%                                  | 8,0% | 7,0% | 6,0% | 5,0% | 4,0% | 3,0% | 2,0% | 1,0%  |
| 90%   | 41                             | 51                                    | 63   | 82   | 108  | 149  | 217  | 336  | 552  | 897   |
| 95%   | 58                             | 71                                    | 89   | 113  | 148  | 202  | 287  | 426  | 652  | 957   |
| 97%   | 71                             | 86                                    | 107  | 135  | 177  | 238  | 333  | 482  | 708  | 986   |
| 99%   | 97                             | 118                                   | 145  | 182  | 235  | 310  | 419  | 579  | 795  | 1.025 |

Nota: Con esta fórmula se calcula la muestra de puntos para verificar la validación de la metodología. Adaptado de Orozco y Pineda, 2019. *Revista Internacional de Aprendizaje*, 10 (27).

### 10.5.3 Matriz de confusión

El análisis de la evaluación consistió en obtener el error que el algoritmo cometió cuando realizo la clasificación, basado en esta matriz se obtuvo la cantidad total de píxeles de cada clase y el porcentaje de píxeles clasificados de manera correcta para la clasificación de mangle, utilizando el levantamiento de información de campo, (Chuvieco, 2010).

Y el objetivo de la utilización de la matriz es representar el porcentaje de error en la clasificación del ecosistema manglar. Dicha matriz se basó en establecer columnas las

cuales tuvieron la información de las muestras de campo y en las filas el resultado de la clasificación del algoritmo. Ver Tabla 10.

Tabla 11. Describe la distribución de datos de evaluación de la clasificación del ecosistema manglar.

| Clases aplicando Algoritmo |             |             |             |       |                      |                   |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------|----------------------|-------------------|
|                            | Clase 1     | Clase 2     | Clase 3     | Total | Exactitud de Usuario | Error de comisión |
| Clase 1                    | m11         | m12         | m13         |       | m1/m...              | 1-(m1/m...)       |
| Clase 2                    | m21         | m22         | m23         |       |                      |                   |
| Clase 3                    | m31         | m32         | m33         |       |                      |                   |
| Total, de campo            | m1          | m2          | m3          |       |                      |                   |
| Exactitud                  | m1/m...     | m2/m...     | m3/m...     |       |                      |                   |
| Error omisión              | 1-(m1/m...) | 1-(m2/m...) | 1-(m3/m...) | m...  | ma/m...              |                   |

Fuente: Recuperado de “Diseño De Una Metodología De Clasificación De Cobertura De Manglar Empleando Imágenes SAR Polarimétricas”, Vásquez, 2019.

Nota: La tabla muestra la distribución de las muestras y resultados de la clasificación.

Una vez obtenido el porcentaje se calificó utilizando la matriz del índice cual fue el desempeño del algoritmo.

Tabla 12. Tabla de la calificación del desempeño del algoritmo según el índice Kappa

| <b>Índice Kappa</b> | <b>Desempeño</b> |
|---------------------|------------------|
| <0                  | Pésimo           |
| <0 K ≥0.2           | Malo             |
| <0.2 K ≥0.4         | Regular          |
| <0.4 K ≥0.6         | Bueno            |
| <0.6 K ≥0.8         | Muy bueno        |
| <0.8 K ≥1.0         | Excelente        |

Fuente: XVII Simposio brasileño de Sensoramiento remoto.

## **11 RESULTADOS**

Los resultados generados por el levantamiento de información y la aplicación de la tecnología espacial utilizando un algoritmo para la clasificación supervisada de las áreas piloto localizadas geográficamente en las áreas protegidas del Caribe Guatemalteco, fueron evaluadas para el periodo del 2012-2019.

### **11.1 Resultado de las imágenes las cuales fueron corregidas**

Para realizar este análisis multitemporal de cobertura manglar en las áreas piloto fue necesario seleccionar, descargar y realizar correcciones de las imágenes de los sensores remotos, en la siguiente tabla se muestran las imágenes descargadas, y las imágenes ya con el tratamiento geométrico, radiométrico y la aplicación de filtros para mejorar la percepción y el análisis de las áreas piloto.

Se calculó cambios entre las capas utilizando comparación pixel sobre pixel y se generó las imágenes utilizadas para el análisis de áreas piloto del ecosistema manglar. Ver Figura 6.

Tabla muestra la imagen descargada de la plataforma Planet.

Figura 7. Imagen de Rio Sarstún sin tratamiento y con tratamiento.

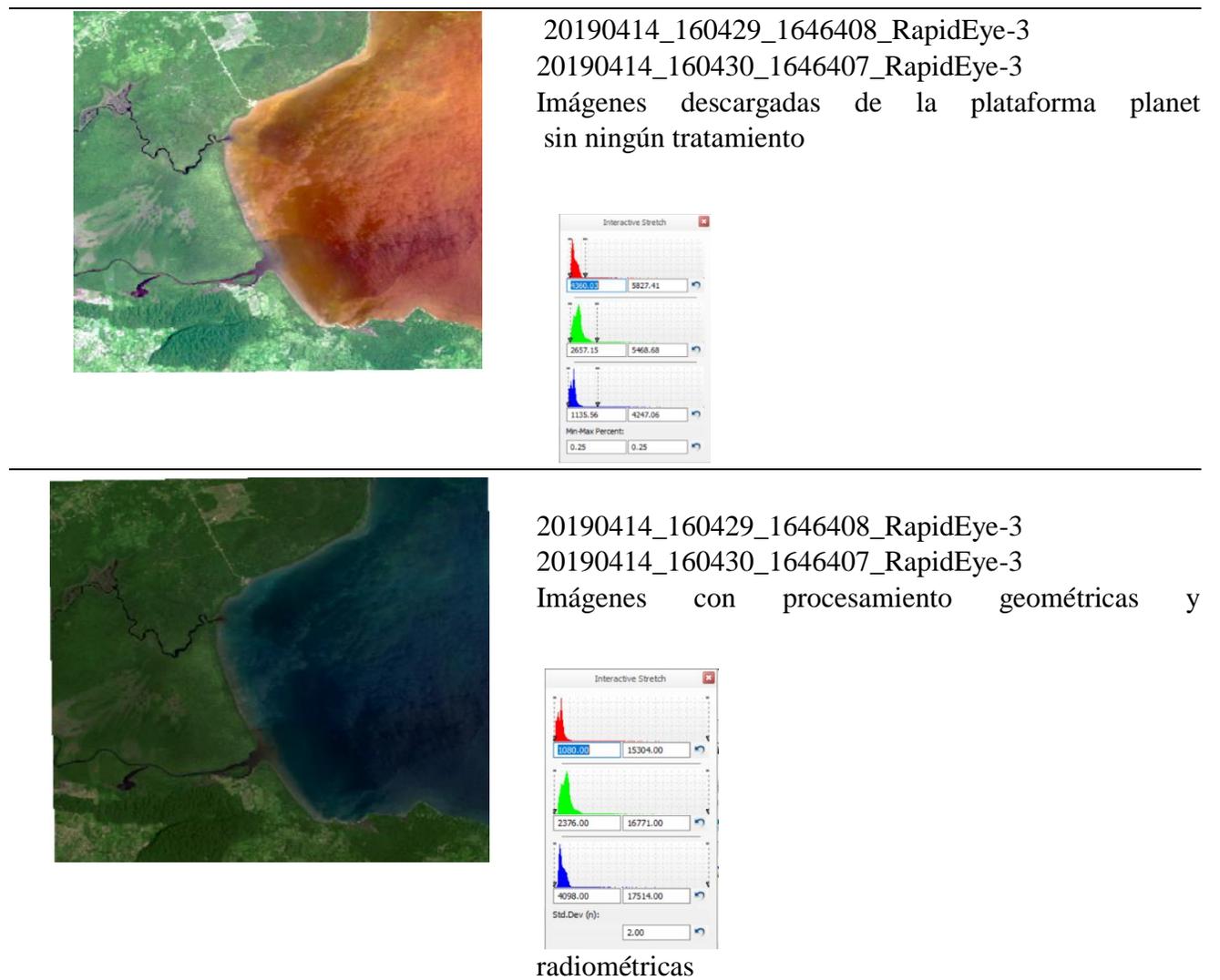
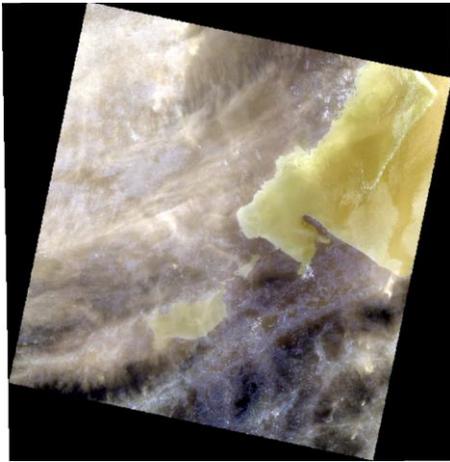


Figura 8. Imagen Landsat sin tratamiento y posterior aplicando el tratamiento geométrico y radiométrico



LC08\_L1TP\_019049\_20200420\_201  
Imágenes descargada sin tratamientos



LC08\_L1TP\_019049\_20200420\_201  
Imágenes con procesamiento  
geométricas y radiométricas

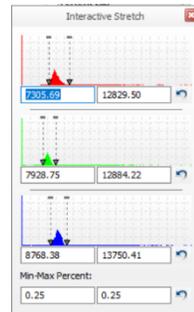
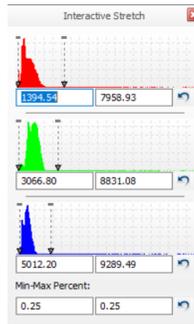


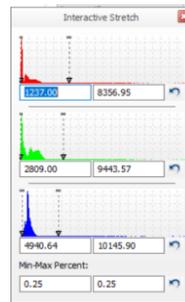
Figura 9. Imágenes del sensor Rapideye de la plataforma Planet sin tratamiento y posterior con tratamiento y elaboración de mosaico.



Multispectral\_1646308\_2019-04-14  
Multispectral\_1646307\_2019-04-14  
Multispectral\_1646408\_2019-04-14



Mosaic\_Multispectral\_1646308\_2019-04-14

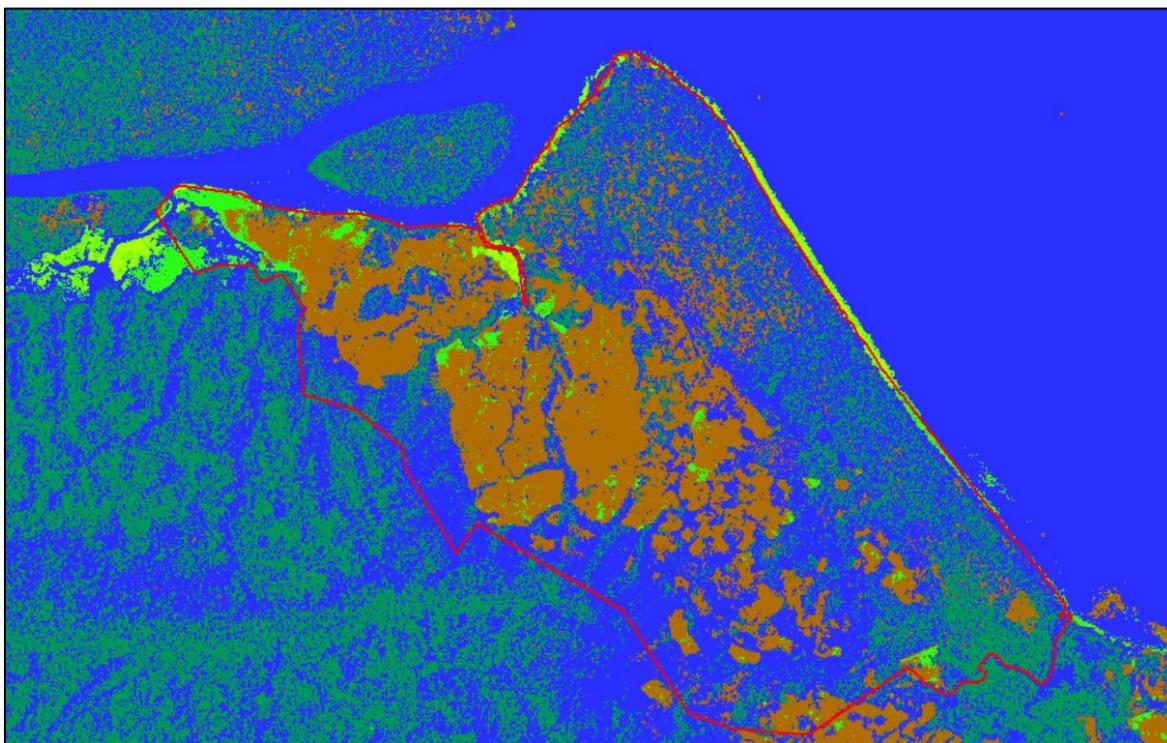


## 11.2 Resultados de reclasificación del ecosistema manglar

### 11.2.1 Resultados de evaluación del área piloto Sarstún Arriba y Sarstún Abajo del Área Protegida de Usos Múltiples Río Sarstún

La imagen descargada de la plataforma de Planet del sensor Rapideye y la cual fue utilizada con una combinación de bandas RGB y la aplicación del algoritmo de Máxima Verisimilitud con el que se realizó una clasificación supervisada y posterior se realizó una reclasificación para comprobar el porcentaje de exactitud, para esto se generó una malla de puntos utilizando matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de una proporción en poblaciones finitas se generó de manera automática y al azar 2000 puntos esto se realiza de acuerdo a la cantidad de pixeles de la imagen y se utilizó el índice de Kappa o matriz de confusión para evaluar la exactitud del algoritmo para clasificar el ecosistema manglar. Ver Tabla

Figura 10. Imagen Raster de la clasificación del ecosistema manglar del área de piloto Río Sarstún.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Evaluación del índice Kappa de la clasificación del área piloto del Río Sarstún.

| Clase                  | Mangle | Agua | Bosque Lat | Suelo | Agropecuario | Infraestructura | Total | Precisión | Kappa |
|------------------------|--------|------|------------|-------|--------------|-----------------|-------|-----------|-------|
| <b>Mangle</b>          | 199    | 0    | 0          | 0     | 0            | 0               | 199   | 1         | 0     |
| <b>Agua</b>            | 0      | 869  | 0          | 0     | 0            | 0               | 869   | 1         | 0     |
| <b>Bosque Lat</b>      | 0      | 0    | 459        | 0     | 0            | 0               | 459   | 1         | 0     |
| <b>Suelo</b>           | 0      | 0    | 0          | 76    | 0            | 0               | 76    | 1         | 0     |
| <b>Agropecuario</b>    | 0      | 0    | 0          | 0     | 248          | 0               | 248   | 1         | 0     |
| <b>Infraestructura</b> | 0      | 0    | 0          | 0     | 0            | 149             | 149   | 1         | 0     |
| <b>Total</b>           | 151    | 869  | 459        | 36    | 148          | 149             | 2001  | 0         | 0     |
| <b>Precisión</b>       | 1      | 1    | 1          | 1     | 1            | 1               | 0     | 1         | 0     |
| <b>Kappa</b>           | 0      | 0    | 0          | 0     | 0            | 0               | 0     | 0         | 1     |

Según el nivel del índice Kappa: 1 = Excelente.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Distribución de Frecuencia de las muestras de la clasificación del área piloto Río Sarstún.

| Elemento           | Clasificación | Frecuencia  |
|--------------------|---------------|-------------|
| Mangle             | 1             | 199         |
| Agua               | 2             | 869         |
| Bosque latifoliado | 3             | 459         |
| Suelo desnudo      | 4             | 76          |
| Agropecuario       | 5             | 248         |
| Infraestructura    | 6             | 149         |
| <b>Total</b>       |               | <b>2000</b> |

Fuente: Elaboración propia.

En la aplicación del algoritmo pone en evidencia que el área piloto es una altamente influenciada por agua, esto comprueba que son áreas de zona inundable, lo cual permite que la zona sea ideal para el desarrollo del ecosistema manglar.

A pesar de que estas zonas son ideales para el desarrollo de uno de los ecosistemas más productivos, están siendo objeto de cambio de uso de suelo para el desarrollo de actividades agropecuarias. Es evidente que el ecosistema manglar ha sido el más afectado por estas actividades, las cuales llevan con si el cambio de uso de suelo.

Por lo que los efectos en el ecosistema manglar son evidentes, en la Área de Usos Múltiples Río Sarstún donde se delimitó una de las áreas piloto para la evaluación multitemporal del ecosistema manglar del Caribe guatemalteco, se pudo determinar que el deterioro es evidente, para el año 2012 según evaluación realizada por MARN-CATHALAC, se contaba con una cobertura de 50.72 hectáreas para el año 2019 se evaluó la misma zona la cual determinó que existen 30.90 hectáreas, 19.82 hectáreas son las que se han perdido, por actividades antropogénicas, que se reflejan en el nivel productivo de la zona.

#### *11.2.2 Resultados de evaluación del área piloto de Parque Nacional Río Dulce*

Según el análisis multiespectral realizado en el informe técnico por SIA/MARN, CATHALAC con el apoyo de PNUMA se estimó que para el área piloto se contabilizaban 192.45 hectáreas de la cobertura del ecosistema manglar.

Para el análisis multitemporal del área piloto se descargó de la plataforma de Earth Explorer la imagen LC08\_L1TP\_019049\_20210218\_20210304\_01 de Landsat-8 la cual fue utilizada con una combinación de bandas RGB con una resolución de 30 metros (30,30) utilizando la banda pancromática se mejoró la resolución a 15 metros (15,15), para las áreas de entrenamiento se utilizaron 172 puntos referenciados del ecosistema manglar para generar las áreas de entrenamiento de la clase manglar, para las demás clases fue de manera de interpretación visual, se entrenó el algoritmo y se procedió a realizar la clasificación supervisada y tener un mejor resultado en la clasificación el cual dio como resultado 160.68 hectáreas del bosque manglar.

Para la validación fue necesario generar una malla de puntos utilizando matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de una proporción en poblaciones finitas se generó de manera automática y al azar 2000 puntos esto se realiza de acuerdo con la cantidad de píxeles de la imagen y se utilizó el índice de Kappa o matriz de confusión para evaluar la exactitud del algoritmo para clasificar el ecosistema manglar.

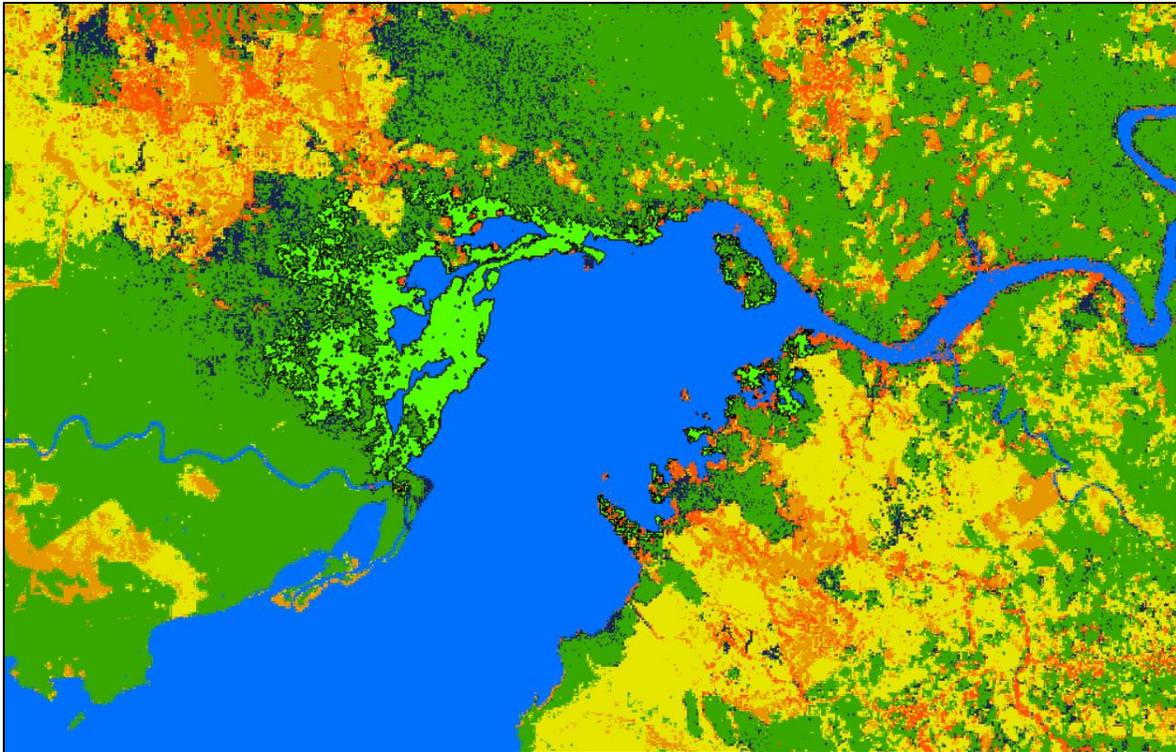
Ver Tabla 15.

Tabla 15. Distribución de frecuencia de puntos de muestreo al azar para la verificación de la exactitud de la clasificación.

| <b>Elemento</b>    | <b>Clasificación</b> | <b>Frecuencia</b> |
|--------------------|----------------------|-------------------|
| Mangle             | 1                    | 186               |
| Agua               | 2                    | 310               |
| Bosque latifoliado | 3                    | 800               |
| Suelo desnudo      | 4                    | 88                |
| Agropecuario       | 5                    | 392               |
| Infraestructura    | 6                    | 224               |
| <b>Total</b>       |                      | <b>2000</b>       |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Imagen de la clasificación supervisada del área piloto del PNRD.



En la aplicación del algoritmo pone en evidencia que el área piloto se encuentra en un área de planicies de inundaciones asociadas al golfete del Río Dulce, lo cuales están influenciadas por los efectos de las mareas, lo que convierte gran parte del año en aguas salobregas, lo permite que la zona sea ideal para el desarrollo del ecosistema manglar.

Esto indica que son zonas altamente productivas, las cual en un mayor porcentaje son afectadas por deforestaciones para el establecimiento de chalets (casa de campo) y la elaboración de muelles y caminos para las comunidades que están en la zona.

Los impactos ocasionados al ecosistema manglar son evidentes, en el área protegida Parque Nacional Río Dulce donde se delimito una de las áreas piloto para la evaluación multitemporal del ecosistema manglar del caribe guatemalteco, se pudo determinar que el deterioro es evidente, para el año 2012 según evaluación realizada por MARN-CATHALAC, se contaba con una cobertura de 192.45 hectáreas para el año 2019 se evaluó la misma zona la cual determino que existen 160.68 hectáreas, 31.77 hectáreas son las que se han perdido, por actividades antropogénicas, que se reflejan en el nivel productivo de la zona.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Describe la matriz kappa, para ver la exactitud de la clasificación supervisada.

| <b>Clase</b>           | <b>Mangle</b> | <b>Agua</b> | <b>Bosque Lat</b> | <b>Suelo</b> | <b>Agropecuario</b> | <b>Infraestructura</b> | <b>Total</b> | <b>Precisión</b> | <b>Kappa</b> |
|------------------------|---------------|-------------|-------------------|--------------|---------------------|------------------------|--------------|------------------|--------------|
| <b>Mangle</b>          | 186           | 0           | 0                 | 0            | 0                   | 0                      | 186          | 1                | 0            |
| <b>Agua</b>            | 0             | 310         | 0                 | 0            | 0                   | 0                      | 310          | 1                | 0            |
| <b>Bosque Lat.</b>     | 0             | 0           | 800               | 0            | 0                   | 0                      | 800          | 1                | 0            |
| <b>Suelo</b>           | 0             | 0           | 0                 | 88           | 0                   | 0                      | 88           | 1                | 0            |
| <b>Agropecuario</b>    | 0             | 0           | 0                 | 0            | 392                 | 0                      | 392          | 1                | 0            |
| <b>Infraestructura</b> | 0             | 0           | 0                 | 0            | 0                   | 223                    | 223          | 1                | 0            |
| <b>Total</b>           | 186           | 310         | 800               | 88           | 392                 | 223                    | 1999         | 0                | 0            |
| <b>Precisión</b>       | 1             | 1           | 1                 | 1            | 1                   | 1                      | 0            | 1                | 0            |
| <b>Kappa</b>           | 0             | 0           | 0                 | 0            | 0                   | 0                      | 0            | 0                | 1            |

Nota: Se estableció la matriz kappa, obteniendo un resultado según la tabla donde 1= Excelente.

Fuente: Elaboración propia.

### *11.2.3 Resultados de evaluación del área piloto de La Graciosa, Punta de Manabique*

Las imágenes utilizadas fueron descargadas de la plataforma Planet del sensor Rapideye: para este caso fue necesario realizar un mosaico con las imágenes

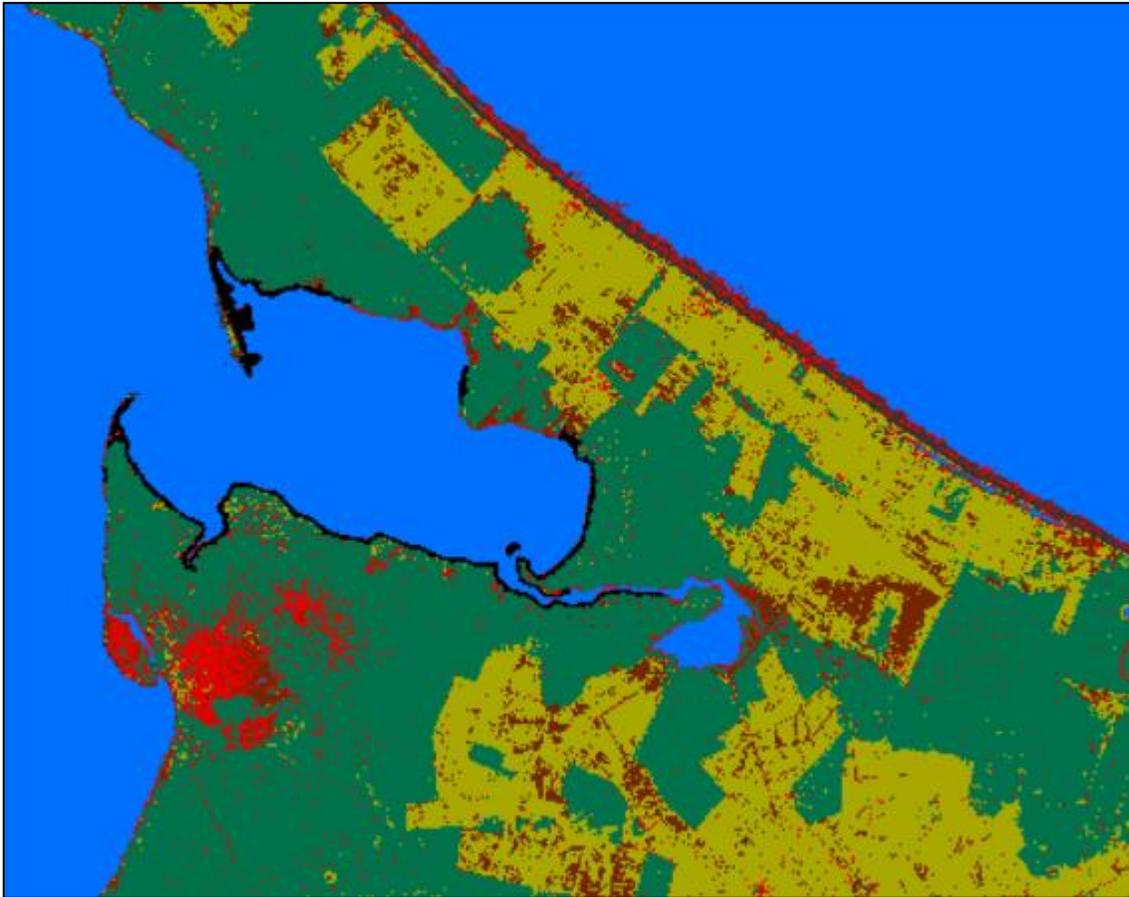
- ✓ Multispectral\_1646308\_2019-04-14
- ✓ Multispectral\_1646307\_2019-04-14
- ✓ Multispectral\_1646408\_2019-04-14

Las cuales fueron utilizadas con una combinación de bandas RGB, se entrenó el algoritmo de Máxima Verisimilitud con las áreas de entrenamiento de las clases Manglar, Bosque Latifoliado, Aguas abiertas, suelo, infraestructura, agropecuaria, y posterior se realizó una reclasificación para comprobar la exactitud con la que clasifico el algoritmo.

Para este procedimiento se generaron áreas de entrenamiento para la clase manglar se utilizaron 209 puntos georreferenciados para generar la clase manglar, para las otras clases fueron seleccionadas de manera visual.

Para la validación fue necesario generar una malla de puntos utilizando matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de una proporción en poblaciones finitas se generó de manera automática y al azar 506 puntos, esto se realiza en relación con la cantidad de pixeles que tiene la imagen y se utilizó el índice de Kappa o matriz de confusión para evaluar la exactitud del algoritmo para clasificar el ecosistema manglar.

Figura 12. Imagen de clasificación del área piloto de RVSPM.



Fuente: Elaboración propia.

La clasificación generada por el algoritmo estimó que para esta área piloto hay 68.25 hectáreas de ecosistema manglar, mientras que para el año 2012 el análisis del informe técnico del MARN-CATHALAC, estimaba 86.19 hectáreas, lo cual representa una pérdida del ecosistema manglar de 17.94 hectáreas en un periodo de 7 años.

Tabla 17. Describe la matriz kappa, para ver la exactitud de la clasificación supervisada.

| Clase           | Mangle | Agua | Bosque Lat | Suelo | Agropecuario | Infraestructura | Total | Precisión | Kappa |
|-----------------|--------|------|------------|-------|--------------|-----------------|-------|-----------|-------|
| Mangle          | 10     | 0    | 0          | 0     | 0            | 0               | 10    | 1         | 0     |
| Agua            | 0      | 305  | 0          | 0     | 0            | 0               | 305   | 1         | 0     |
| Bosque Lat      | 0      | 0    | 94         | 0     | 0            | 0               | 94    | 1         | 0     |
| Suelo           | 0      | 0    | 0          | 13    | 0            | 0               | 13    | 1         | 0     |
| Agropecuario    | 0      | 0    | 0          | 0     | 74           | 0               | 74    | 1         | 0     |
| Infraestructura | 0      | 0    | 0          | 0     | 0            | 10              | 10    | 1         | 0     |
| Total           | 10     | 305  | 94         | 13    | 74           | 10              | 506   | 0         | 0     |
| Precisión       | 1      | 1    | 1          | 1     | 1            | 1               | 0     | 1         | 0     |
| Kappa           | 0      | 0    | 0          | 0     | 0            | 0               | 0     | 0         | 1     |

Nota: Se estableció la matriz kappa, obteniendo un resultado según la tabla donde 1= Excelente.

Fuente: Elaboración propia.

La frecuencia del número de muestras al azar que se repiten por clasificación en el raster del área piloto se muestra en la siguiente tabla. Ver Tabla 18.

Tabla 18. Distribución de frecuencia de puntos de muestreo al azar para la verificación de la exactitud de la clasificación.

| Elemento           | Clasificación | Frecuencia |
|--------------------|---------------|------------|
| Mangle             | 1             | 10         |
| Agua               | 2             | 305        |
| Bosque latifoliado | 3             | 94         |
| Suelo desnudo      | 4             | 13         |
| Agropecuario       | 5             | 74         |
| Infraestructura    | 6             | 10         |
| Total              |               | 506        |

Fuente: Elaboración propia.

Esta clasificación realizada para el área piloto se encuentra en una zona de humedales y clasificada como un sitio RAMSAR, lo que establece como una zona de conservación e importancia internacional.

Esta zona representa una gran importancia por su alta productividad, pero están siendo sometidas a altas presiones por efectos de contaminación de desechos sólidos, y fuertes cambios de uso de suelo por actividades antropogénicas mayormente para actividades de ganadería, también está sufriendo impacto por eventos hidrometeorológicos que causan deforestación y el incremento de los niveles del mar.

Los efectos negativos ocasionados al ecosistema manglar son evidentes, en el área de la Graciosa donde se delimitó una de las áreas piloto para la evaluación multitemporal del ecosistema manglar del Caribe guatemalteco, se pudo determinar que el deterioro es evidente, para el año 2012 según evaluación realizada por MARN-CATHALAC, se contaba con una cobertura de 86.19 hectáreas comparado con la clasificación realizada para el año 2019 donde se evaluó la misma zona la cual determinó que existen 68.25 hectáreas, 17.94 hectáreas son las que se han perdido, por actividades antropogénicas, que se reflejan en el nivel productivo de la zona.

## **12. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA RESTAURACION Y PROTECCION DEL ECOSISTEMA DEL MANGLE.**

### **12.1 Incentivos forestales una alternativa para la protección del Mangle.**

Una de las principales estrategias para promover la protección y restauración del ecosistema del Mangle en el Caribe lo constituye actualmente el Programa de PROBOSQUE del Instituto Nacional de Bosques, INAB, el cual recientemente no se podía aplicar a las zonas de reservas territoriales del Estado debido a que no se aceptada el contrato de arrendamiento que la oficina de OCRET otorgada a los que ocupaban y tenían bajo su posesión dichas reservas, sin embargo actualmente se ha logrado un convenio entre INAB y el OCRET, lo cual ha dado paso a que este requisito pueda ser aceptado lo cual habrá las oportunidades para que los expedientes de planes de manejo puedan ser recibidos con el debido contrato de arrendamiento otorgado por OCRET, para nuestro caso que todas las áreas de reservas del Estado están en áreas protegidas, también se debe contar con el aval técnico y jurídico del CONAP, por lo que es otro requisito que se debe considerar y que es importante poder tener como parte de los requisitos solicitados. Por lo tanto actualmente en el Departamento de Izabal en el área protegida de Rio Sarstún y en Punta de Manabique se han iniciado con diferentes proyectos pilotos de expedientes que están en proceso de ser ingresados al INAB y ya cuentan con el aval del contrato ante OCRET, con el visto bueno técnico y jurídico de CONAP, por lo tanto la intención es poder ingresarlos al INAB para que puedan ser sujetos de ser incentivados dentro del programa PROBOSQUE a partir del año 2022, logro que seguramente habrá la puerta para una de las mejores estrategias para asegurar la conservación del bosque de mangle y otras especies en el área de reservas del Estado a nivel costero en el Caribe.

## 12.2 Técnicas para restauración del bosque de mangle

En el estudio multitemporal del ecosistema del bosque en zonas piloto de las áreas protegidas de Río Sarstún, Río Dulce y Punta de Manabique, realizando el análisis comparativo del año 2012 al año 2019, donde de 329.36, a los 7 años se cuenta con 260.13, o sea que se han perdido una cobertura de bosque de mangle de 69.23 hectáreas, donde la evaluación realizada representa un 28.16% del Mangle en el Caribe, entonces se deduce que la pérdida de bosque de mangle es acelerada, por lo tanto es indispensable poder asegurar la protección de las áreas aún existentes de mangle, pero a la vez poder promover la restauración del bosque, sabiendo que el mismo tiene características muy particulares, como el caso de las áreas inundables en su mayoría donde existe este bosque que la hace muy especial, lo mismo el sistema de reproducción donde el propagulo germina en el árbol y cae posteriormente a la superficie mucha de ella en áreas anegadas donde la posibilidad de pegue es relativamente baja, sin embargo en las lecciones aprendidas en los últimos 2 años en las áreas protegidas de Río Sarstún, Río Dulce y Manabique se han desarrollado experimentos para realizar la restauración de áreas degradadas, donde se han realizado pruebas distintas, desde la utilización de un tubo de plástico o pvc para poder asegurar el pegue de la plántula, además de utilizar una estaca, como también realizar viveros y restauración con la obtención de plántulas de regeneración natural, donde el éxito del mismo ha sido relativamente bajo, debido a las mismas condiciones, se ha evidenciado que en ensenadas o en áreas de laguna las condiciones son las ideales para la regeneración natural, en este caso son viveros naturales que se tienen y que es posible utilizar para restaurar áreas degradadas, pero sigue siendo la restauración a través de la reforestación una alternativa o estrategia que se puede siempre promover y se debe continuar a manera de poder recuperar las hectáreas que se han perdido en los últimos 7 años.

### **12.3 Promoción del turismo comunitario**

En varias comunidades dentro de las áreas protegidas del Caribe de Guatemala, entre ellas las que han sido sujetas de evaluación de este estudio como son principalmente Rio Sarstún y Rio Dulce ya las comunidades han tenido un aprendizaje y un nivel de conocimiento que les ha generado una concientización para poder proteger los bosques de mangle, donde además han iniciado con algunas acciones de poder potencializar este recurso, una de las estrategias en diferentes áreas de lagunas es utilizarlo como áreas de senderos acuáticos que son ya utilizados como áreas de recreación principalmente para promover el turismo sostenible, en este caso el mejor ejemplo es en la comunidad de Cayo Quemado donde las áreas de mangle tienen una belleza escénica única y que son áreas donde grupos de turistas que visitan el área vía acuática pueden observar y conocer, por lo que ha resultado ser otro atractivo turístico, por lo que muy bien este modelo puede replicarse en otras comunidades de la región, donde es evidente que los grupos comunitarios inicialmente deben de organizarse, contar con infraestructura mínima, poder capacitarse para brindar servicios a los visitantes y con ello poder realizar cobros que puedan ser una opción de ingresos económicos para las familias locales, es una estrategia que ya está funcionando y que es importante continuar mejorando y fortaleciendo en la región del Caribe de Guatemala.

## 12 CONCLUSIÓN

Finalmente, el análisis multitemporal del ecosistema manglar para el periodo 2,012-2019 en las áreas piloto de áreas protegidas de Rio Sarstún, Refugio de Vida Silvestre Punta de Manabique y Parque nacional Rio Dulce, se han perdido 69.53 hectáreas en 7 años.

Tabla 19. Tabla comparativa del ecosistema manglar del periodo 2012-2019.

| Áreas piloto                    | Área Protegida                               | Cobertura/ha/2012 | %    | Cobertura/ha/2019 | %      | Perdida/área/ha |
|---------------------------------|--|-------------------|------|-------------------|--------|-----------------|
| Bahía la Graciosa               | Reserva de Vida Silvestre Punta de Manabique | 86.19             | 26.2 | 68.25             | 26.27  | 17.94           |
| Salvador Lagunita, Cayo Quemado | Parque Nacional Rio Dulce                    | 192.45            | 58.4 | 160.68            | 61.84  | 31.77           |
| Sarstún Abajo, Sarstún Arriba   | Área de Usos Múltiples Rio Sarstún           | 50.72             | 15.4 | 30.9              | 11.89  | 19.82           |
| Total                           |  | 329.36            | 100  | 259.83            | 100.00 | 69.53           |

Fuente: Elaboración propia.

Con la información compilada del Informe técnico Estudio de la cobertura de mangle en la República de Guatemala del año 2012 se utilizó para establecer una línea base para realizar el análisis de correspondencia espacial con lo que se pudo verificar la concordancia entre las áreas piloto para el periodo 2012-2019.

Para establecer el análisis comparativo de las áreas piloto de la cobertura del ecosistema manglar en la región del caribe guatemalteco en el periodo 2012-2019, se utilizaron imágenes del año 2019 de las plataformas: Earth Science, Land Viewer EOS, Planet, se aplicó el algoritmo de Máxima Verisimilitud para realizar la clasificación y para evaluar el grado de confiabilidad del algoritmo se utilizó la matriz de confusión o Kappa.

En la evaluación que se realizó de la estructura del ecosistema manglar, la distribución espacial, características de especie con mayor distribución y abundancia como el mangle rojo por las características de la especie como la capacidad de soportar condiciones extremas de salinidad del agua, esto representa una riqueza biológica y la biodiversidad que estos ecosistemas manglares albergan.

La disponibilidad del espacio donde se desarrolla el ecosistema manglar, está siendo perturbado por actividades antropogénicas de cambio de uso de suelo para realizar diferentes actividades (navegación, ganadería, turismo, agricultura de supervivencia, uso energético etc.), a pesar de esto se observó la capacidad que existe de resiliencia del ecosistema manglar , regeneración natural (fuente de generación de propágulos, germinación, agentes de dispersión etc.), este sigue representando por una tasa de crecimiento muy frágil, y resulta complejo realizar acciones de reforestación con especies de mangle.

### **13 RECOMENDACIONES**

Se debe realizar el análisis multitemporal del ecosistema manglar del caribe guatemalteco utilizando imágenes de radar estas por las características que nos son afectadas por las condiciones climáticas, ni la temporalidad pueden generar información más precisa, debido a que las imágenes ópticas tienen como limitante los ruidos atmosféricos. Es necesario analizar la distribución espacial del ecosistema manglar del caribe guatemalteco y determinar su distribución actualmente, utilizando tecnología espacial.

Se debe analizar el sistema y las afectaciones intrínsecas y extrínsecas para poder comprender la dinámica de estos valiosos ecosistemas y también por presiones que sufren los sistemas lacustres, debido a que este se ubica generalmente en la parte más baja de las cuencas hidrográficas.

Es indispensable asegurar la protección del ecosistema del mangle actual, donde es evidente que existe un deterioro del mismo, haciendo un cambio de uso del suelo, por lo tanto las estrategias generales establecidas en este estudio como sugerencias preliminares son importante promoverlas a nivel local, donde ya existen ejemplos y experiencias y lecciones aprendidas, como el caso del ingreso del programa de incentivos forestales para poder generar ingresos económicos para los propietarios de las áreas de bosque, con ello asegurar su conservación a la vez ser un generador de ingresos económicos locales, seguramente es una excelente estrategia que hay que seguir promoviendo y fortaleciendo, lo mismo las estrategias de restauración y el impulso del turismo comunitario, sabidos que

los bosque de mangle representa áreas de belleza escénica atractivos para el turismo local e internacional.

## 14 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

B. Hernández, et.al., (2012). Clasificación de cobertura actual de mangle en las costas del Pacífico y Atlántico de Guatemala, a través de técnicas de percepción remota. pp. (10) 1-10.

Baddi, Guillen, Cerna & Landeros, 2011. Dispersión Espacial: El prerrequisito esencial para el Muestreo. International Journal of Good Conscience. Universidad Autónoma de Nuevo León. Mexico. pp.(32) 40-71.

Bolaños, (2019). Identificación De Patrones Espectrales De Los Manglares De Colombia Con Imágenes Hiperespectrales Y Multiespectrales: Caso De Estudio Ciénaga Grande De Santa Marta. Tesis de Maestría. Universidad Católica De Manizales.Colombia. pp. (162) 1- 162.

Chander, Markham, & Helder. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote sensing of environment, pp.113 (5), 893-903.

Chuvieco, E., (1995). Fundamentos de la Teledetección. Madrid España. RIALP, S.A.

Chuvieco, E., (2008). Teledetección Ambiental. Barcelona España. Ariel, S.A

Guatemala. CONAP (2015). Guía De Campo Mangles De La Costa Sur. Guatemala. pp. (22) 1-22.

Guatemala. CONAP. (2005). Política Nacional de Humedales de Guatemala. Guatemala. pp. (40)1-40.

Guatemala. CONAP. (2015). Plan Maestro Parque Nacional Río Dulce. (2da. ed). Guatemala: Izabal. pp. (261), 1-261.

Guatemala. Consejo Nacional de Áreas Protegidas, CONAP, (2019) Segunda actualización del Plan Maestro del Parque Nacional Rio Dulce. Guatemala. pp 344.

Guatemala. MARN. (2012). Informe técnico Estudio de la cobertura de mangle en la República de Guatemala. Guatemala. pp. (63). 1-63.

Ilka et al. (2017). The state of the world's mangroves in the 21st century under climate change. Hydrobiologia. USA. pp. (12) 1-12.

Jones. (2017). How machine learning could help to improve climate forecasts. Nature, pp. (1) 379-380.

Long & Giri. (2011). Mapping the Philippines' Mangrove Forests Using Landsat Imagery. Open Access Sensor. Filipinas. pp. 1-10 (2972-2981).

Maciel-Mata, C. A., Manríquez-Morán, N., Octavio- Aguilar, P. & Sánchez-Rojas, G. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria*, 25(2), 3

Mingming Jia et.al. (2019). A New Vegetation Index to Detect Periodically Submerged Mangrove Forest Using Single-Tide Sentinel-2 Imagery. *Remote sensing. China*. pp. (17) 1-17.

Muñoz. (2013). Índices de Vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales. Información para el Desarrollo y la Innovación. Chile pp. (15) 1-15.

Núñez. (s.f). Uso De Tecnologías Geoespaciales Para Evaluar Cambios En La Cobertura Forestal En La Región Usumacinta, México. Centro de Investigación en Geografía y Geomática. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México. pp. (18) 60-77.

P. Ardila, O. Barrero, L. Villamil, (2019). Cartografía de bosques de manglar mediante imágenes de sensores remotos: estudio de caso Buenaventura, Colombia. *Revista de Teledetección*. Asociación Española de Teledetección. España. pp. (14) 73-86.

Parra. (2010). Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores.

Paz. (2014). Alcances y Limitaciones de los Índices Espectrales de la Vegetación: Marco Teórico. Veracruz, México. pp. (18) 177-194.

Peña. (2014). Sensores hiperspectrales: Los últimos avances en teledetección. pp. (6) 67-71.

Podest, (s.f). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética. NASA. pp. (51) 1-51.

Ponce et al. (2014). Inteligencia Artificial. México. Proyecto Latin.

Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. PNUMA. (2013). Manejo Integrado De Las Zonas Costeras Y Gestión Sostenible De Los Manglares En Guatemala, Honduras y Nicaragua. Honduras. pp. (29), 1-29.

Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. PNUMA. (2018). Objetivos del desarrollo sostenible. Guatemala. PNUD Guatemala. <https://www.gt.undp.org/content/guatemala/es/home/presscenter/articles/2018/10/ecosistema-manglar.html>

Speranza & Zerda. (s.f) Potencialidad de los Índices de Vegetación para la discriminación de coberturas forestales. Cordoba. Argentina. pp.(10) 1-10.

Suratman. (2014). Remote Sensing Technology: Recent Advancements for Mangrove Ecosystems. Universiti Teknologi. Malasia. pp. (23) 295-317.

Vásquez, (2010). Diseño De Una Metodología De Clasificación De Cobertura De Manglar Empleando Imágenes SAR Polarimétricas. Maestría en Teledetección Universidad Católica de Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Colombia. pp. (89) 1-89.

Vázquez. (2019) Diseño De Una Metodología De Clasificación De Cobertura De Manglar Empleando Imágenes Sar Polarimétricas. Tesis de Maestría. Universidad Católica de Manizales. Colombia. pp. (89) 1-89.