



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA**  
**"ING. JORGE L. TAMAYO", A.C.**  
**CentroGeo**  
**Centro Público de Investigación CONACYT**

Correlación temporal de cobertura de bosque de manglar con variables ambientales en El Palmar Yucatán

**TESIS**

Que para obtener el grado de Maestro en Geomática

Presenta

**Cesáreo Ruiz Escamilla**

Supervisor Principal  
**Dr. José Luis Silván Cárdenas**

Co-supervisor Principal  
**Dr. Rodolfo Rioja Nieto**

Jurado  
**Dra. Alejandra Aurelia López Caloca**

Ciudad de México, 9 de agosto de 2017

© CentroGeo. Derechos reservados. El autor otorga a CentroGeo el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.

## RESUMEN

El análisis del comportamiento del bosque de manglar frente a la variabilidad climática constituye un paso necesario en el conocimiento para el diseño de planes de manejo y conservación. En este trabajo se analizaron cuatro variables ambientales y su correlación con la cobertura de bosque de manglar en la reserva estatal El Palmar, Yucatán y zona aledaña sin esquema histórico de protección a lo largo de once años (de 2004 a 2014). Las variables ambientales incluidas en el trabajo son: precipitación, temperatura superficial del mar, anomalía del nivel del mar y velocidad del viento a los diez metros de altura. Los datos ambientales provienen de diferentes satélites meteorológicos y fueron obtenidos de los diferentes Centros Nacionales de Información Ambiental (NCEI) de la NOAA por lo que su método de adquisición y distribución es variado pero la calidad de los mismos es asegurada. Se utilizaron dos escalas espaciales, meso- $\alpha$  que comprende un rectángulo de 5 grados de longitud por 4 de latitud y meso- $\beta$  delimitada por un cuadrado de un grado de lado alrededor de la zona de estudio, para analizar las relaciones entre los datos climáticos y la cobertura de manglar y poder así diferenciar si la escala influye en el estudio realizado. La cobertura vegetal se analizó a partir de un trabajo previo y se complementó la información usando modelación de cadenas de Markov para predecir las coberturas en cuatro años carentes de información. Se realizó un análisis exploratorio de datos, se obtuvieron las estadísticas básicas como la media, varianza y desviación estándar de los datos y se generaron series de tiempo para cada una de las variables ambientales. Se realizaron dos análisis de correlación, el primero entre la media anual de cada una de las variables ambientales en toda la zona de estudio a ambas escalas y la cobertura de bosque de manglar. El segundo se construyó entre cada pixel de datos de cada una de las variables ambientales y la cobertura de bosque de manglar. Como resultado del primer estudio de correlación se obtuvieron diagramas de dispersión y tablas de datos. Se encontró que a mesoescala alfa hay correlación del bosque de manglar con la temperatura ( $\rho = 0.75$ ,  $p = 0.01$ ) y con la velocidad del viento ( $\rho = 0.78$ ,  $p = 0.007$ ) mientras que a mesoescala beta sólo se encontró correlación con la velocidad del viento ( $\rho = 0.809$ ,  $p = 0.004$ ). En el segundo estudio de correlación se generaron mapas de correlación en cuyos pixeles se toman los valores de -1 a 1 que corresponden al coeficiente de correlación de Spearman entre el promedio anual de cada variable ambiental en cada rejilla de datos y la cobertura de bosque de manglar, identificando de esta forma las regiones que pixel a pixel tienen mayor correlación con la dinámica del manglar en la reserva estatal El Palmar. Se aprecia que las escalas utilizadas en el análisis y la utilización de información ambiental

proveniente de diferentes sensores proporcionaron elementos estadísticos para aproximar cuáles son las variables ambientales que pueden ser los principales agentes de cambio en la cobertura de bosque de manglar.

## **Dedicatoria**

A mi madre Antonia y mi padre Cesáreo (QEPD) por darme la vida, por haberme educado y por apoyarme cuando más lo he necesitado.

A mi esposa Irma, a mis hijos Alejandro, Emmanuel y Fátima Yamilet por su amor, comprensión, por creer en mí y estar conmigo siempre.

A quién me aconsejó e inspiró y me permitió conocer el nuevo mundo.

## **Reconocimientos**

Hago un sincero reconocimiento a mis directores de tesis Dr. José Luis Silván Cárdenas y Dr. Rodolfo Rioja Nieto por guiarme y aconsejarme en la realización de este proyecto. A la Dra. Alejandra Aurelia López Caloca por sus comentarios finales que enriquecieron mucho este trabajo.

Al personal docente del CentroGeo por su apoyo y motivación durante mi formación Geomática.

A todos mis compañeros de la especialidad y maestría, en especial a Tanía, Erick e Iván por su amistad y compañía.

# Contenido

Resumen.....	ii
Dedicatoria .....	iv
Reconocimientos.....	v
1 Introducción.....	1
1.1 El bosque de manglar.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivo general .....	4
1.5 Objetivos específicos.....	5
2 Antecedentes.....	6
2.1 El cambio climático.....	6
2.2 Cobertura de bosque de manglar en México .....	8
2.3 Características del bosque de manglar en Yucatán.....	10
2.4 Dinámica costera en el norte de la Península de Yucatán.....	12
2.5 Área de Estudio.....	13
2.6 Estado del arte.....	15
3 Marco Teórico-Methodológico .....	18
3.1 Marco conceptual.....	18
3.1.1 Ecología del paisaje.....	19
3.1.2 Percepción Remota .....	20
3.1.3 Estudios a mesoescala.....	21
3.2 Descripción de los datos.....	25
3.2.1 Datos de precipitación .....	26
3.2.2 Datos de temperatura superficial del mar .....	27
3.2.3 Datos de anomalía de nivel del mar.....	28
3.2.4 Datos de velocidad del viento.....	28

3.2.5	Cobertura de bosque de manglar.....	29
3.3	Análisis de datos.....	32
3.3.1	Visualización espacial y temporal de datos.....	32
3.3.2	Análisis exploratorio de datos.....	37
3.3.3	Series de tiempo.....	40
3.3.4	Análisis de cobertura de manglar.....	40
3.3.5	Análisis de correlación.....	42
3.3.6	Mapas de correlación.....	43
4	Resultados.....	45
4.1	Datos históricos de sensores remotos.....	45
4.2	Cobertura de bosque de manglar.....	56
4.3	Correlación entre variables ambientales y superficie de manglar.....	62
4.4	Mapas de correlación.....	65
5	Discusión y Conclusiones.....	71
5.1	Datos de cobertura de bosque de manglar y variables climáticas.....	72
5.2	Correlación con cobertura de bosque de manglar.....	74
5.3	Conclusiones.....	77
6	Lista de Tablas.....	79
7	Lista de Figuras.....	81
8	Bibliografía.....	84

# 1 Introducción

## 1.1 El bosque de manglar

Para Feller y Sitnik (1996, p.1) el término "manglar" se refiere a un conjunto de árboles y arbustos tropicales que crecen en la zona costera, incluyen aproximadamente 16 familias y de 40 a 50 especies (dependiendo de la clasificación) por lo que manglar es un término no taxonómico utilizado para describir un grupo diverso de plantas que están todas adaptadas a un hábitat húmedo y salino. El manglar puede referirse típicamente a una especie individual. Términos tales como comunidad de manglares, ecosistemas de manglar o manglar se utilizan indistintamente para describir a toda la comunidad de manglares.

Los manglares son un tipo de bosque tropical único en su género debido a que se sitúan en el área de transición entre el continente y el mar caracterizándose esta zona por un gran dinamismo. Éstos bosques están considerados como uno de los ecosistemas más ricos del planeta (Rodríguez Zúñiga et al., 2013, pp.14-18) y podemos encontrarlos en las zonas costeras y estuarinas en el trópico y subtrópico. Los manglares se han adaptado como pocas especies a las aguas saladas y componen un ecosistema muy rico y productivo que es hábitat natural de diversas especies y refugio de aves marinas, migratorias y endémicas, siendo de gran riqueza biológica, forman una barrera natural contra la erosión de vientos y mareas, protegen contra el impacto huracanes y actúan como filtro biológico al capturar y procesar sólidos en suspensión. A pesar de que constituyen menos del uno por ciento del total de bosques tropicales del mundo, forman un ecosistema muy valioso proporcionando también bienes y servicios esenciales para el sustento, bienestar y seguridad de muchas comunidades costeras (UNEP, 2014, p14).

La actividad biótica dentro del bosque de manglar ha propiciado la formación de un sustrato único, en el cual la biota depende de la topografía del manglar e inversamente, el paisaje del bosque de manglar depende de la biota alojada en el sustrato donde crece. Por ejemplo, un gran número de peces, larvas, cangrejos y algas viven y dependen del terreno donde crece el manglar, construyen sus refugios en el suelo y a su vez los organismos muertos ayudan a la formación del suelo que es protegido de las corrientes y



mareas por las raíces del bosque de manglar. Además de los factores bióticos, el crecimiento del bosque de manglar es influenciado por varios fenómenos físicos como los flujos de marea, y los cambios ambientales que acompañan a la inundación y a la sequía. Acorde a esta influencia, el bosque de manglar es sensible a los gradientes ambientales que responden a los cambios en el paisaje y los procesos físicos (Mazda & Wolanski, 2003, p.3).

La distribución y abundancia de las especies de mangle está sujeta al tipo y salinidad del suelo así como a los regímenes de inundación (Islebe, Sánchez-Sánchez, Valdéz-Hernández, & Weissenberger, 2015, p.24). La propagación de manglar es vivípara, esto es, sus semillas germinan estando aún en la planta y las plántulas que se desprenden del árbol son dispersadas por las corrientes de agua (Herrera Silveira & Ceballos-Cambranis, 1998).

Los procesos físicos que ocurren dentro del manglar son tan importantes como los árboles individuales y todos los procesos biológicos que ocurren en él, por lo que es necesario obtener un conocimiento cuantitativo de ellos y de la hidrodinámica que ocurre en las zonas intermareales (Mazda & Wolanski, 2003, p.4). Los procesos físicos que intervienen en el ecosistema de manglar incluyen el flujo de marea, las olas del mar y flujos de agua subterránea, el estudio de estos procesos nos da un mejor conocimiento de la dinámica del bosque de manglar. Sin embargo, el comportamiento de estos fenómenos es muy complejo y el análisis cuantitativo de los mismos requiere de herramienta matemática muy sofisticada por lo que el uso de técnicas avanzadas de Percepción Remota y el aprovechamiento de los datos provenientes de satélites equipados con modernos sensores es muy pertinente ya que provee una poderosa base científica y tecnológica para el monitoreo rápido y constante de la cubierta vegetal y su dinámica a escala local, regional y global.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Los bosques de manglar tienen una distribución global aproximadamente entre los 30°N y los 30°S de latitud (Tomlinson, 1986). Se cree que es delimitada por las principales

corrientes oceánicas y la isoterma de 20°C de aguamarina en invierno. Los bosques de manglar ocurren típicamente desde el nivel medio del mar hasta la marea más alta de primavera (Giri et al., 2011). Se estima que la cobertura actual de bosque de manglar en el mundo es menos de la mitad de lo que alguna vez fue. Tan sólo cerca del 35% de los manglares fueron perdidos de 1980 a 2000 (MEA, 2005) citado en (Giri et al., 2011) y mucho de lo que actualmente permanece tiene un alto grado de degradación. El bosque de manglar funciona como un sistema de amortiguamiento costero, su pérdida y degradación debido al cambio climático y a los impactos humanos directos disminuye la protección costera que proporcionan durante eventos extremos y aumenta su vulnerabilidad, con importantes consecuencias ambientales, económicas y sociales para las poblaciones costeras (Ellison, 2015).

El ecosistema de bosque de manglar es uno de los más amenazados del mundo, están siendo destruidos a un ritmo de 3 a 5 veces mayor que el promedio de pérdida de bosque (UNEP, 2014, p.14). Los principales factores que amenazan el bosque de manglar son los cambios de uso de suelo por agricultura y acuicultura, el turismo y el desarrollo urbano costero.

La problemática que afecta a los manglares es diversa, en particular en la zona de estudio el cambio de uso de suelo, el desarrollo de infraestructura, el paso de huracanes (Mendoza & Trejo-Rangel, 2013) y la contaminación son los principales. Si a estos hechos le agregamos las consecuencias del cambio climático global, se puede predecir un medio ambiente muy adverso para el ecosistema de bosque de manglar y la gran cantidad de biodiversidad y de servicios ambientales brindados por el bosque de manglar pueden verse afectados severamente por lo que es necesario un mejor conocimiento de los procesos que intervienen en su desarrollo y preservación. En este sentido, los escenarios de cambio climático para esta región predicen un incremento de temperatura y una disminución de la precipitación provocando estrés ambiental sobre el ecosistema de bosque de manglar (Rioja-Nieto, Barrera-Falcón, Torres-Irineo, Mendoza-González, & Cuervo-Robayo, 2017) por lo que el estudio de los factores ambientales y su influencia sobre la cobertura de bosque de manglar son indudablemente valiosos en el diseño de estrategias de manejo adecuadas.

### **1.3 Hipótesis**

La influencia de las variables ambientales y de las modificaciones antropogénicas del paisaje sobre el bosque de manglar ha sido estudiada alrededor del mundo (e.g. Lovelock & Ellison, 2007, pp. 237–269 ) a través de mediciones in situ de la elevación del nivel del mar (Krauss et al., 2013), de la temperatura (Cavanaugh et al., 2014) así como mediante el análisis de imágenes de satélite de alta resolución y datos de estaciones meteorológicas de amplia cobertura temporal (Rioja-Nieto et al., 2017) encontrando que hay una fuerte dependencia entre la cobertura de bosque de manglar y las mismas y en el caso particular del área de estudio hay una correlación espacial con aumento en la tasa de crecimiento del manglar de Oeste a Este. Así mismo, la precipitación total y la temperatura resultan ser muy importantes por lo que un panorama de afectación por efectos de cambio climático debe ser estudiado y previsto adecuadamente.

Si las variables medioambientales tienen efecto en los patrones de distribución del bosque de manglar, entonces se espera una correlación entre el área de cobertura de manglar y las variaciones a lo largo del tiempo en la temperatura, precipitación, velocidad del viento y nivel del mar.

El presente trabajo pretende hacer un estudio de correlación entre los cambios ocurridos en la capa de bosque de manglar y las variables ambientales que intervienen en la dinámica de la Reserva Estatal El Palmar (REP) en el periodo comprendido de 2004 a 2014, para lo cual se usarán parámetros relevantes obtenidos a partir de datos provenientes de diferentes satélites meteorológicos en el periodo de tiempo mencionado obtenidos para dos escalas espaciales alrededor de la zona de estudio con el supuesto inicial de que tal correlación existe dada la evidencia aportada por estudios recientes realizados en la misma zona de estudio (Rioja-Nieto et al., 2017).

### **1.4 Objetivo general**

Explorar la relación de la variación en la cobertura del bosque de manglar con la variabilidad ambiental ocurrida en un periodo de 11 años.

## **1.5 Objetivos específicos**

Con base en el objetivo general anterior tenemos los siguientes objetivos específicos:

- Analizar y estudiar los cambios en la cobertura de bosque de manglar en el periodo 2004-2014.
- Obtener, analizar y estudiar datos históricos de sensores remotos sobre temperatura superficial del mar, velocidad del viento, precipitación y nivel del mar en el periodo 2004-2014.
- Explorar la relación entre la variación en los parámetros ambientales y la cobertura del bosque de manglar en el periodo de estudio.

## 2 ANTECEDENTES

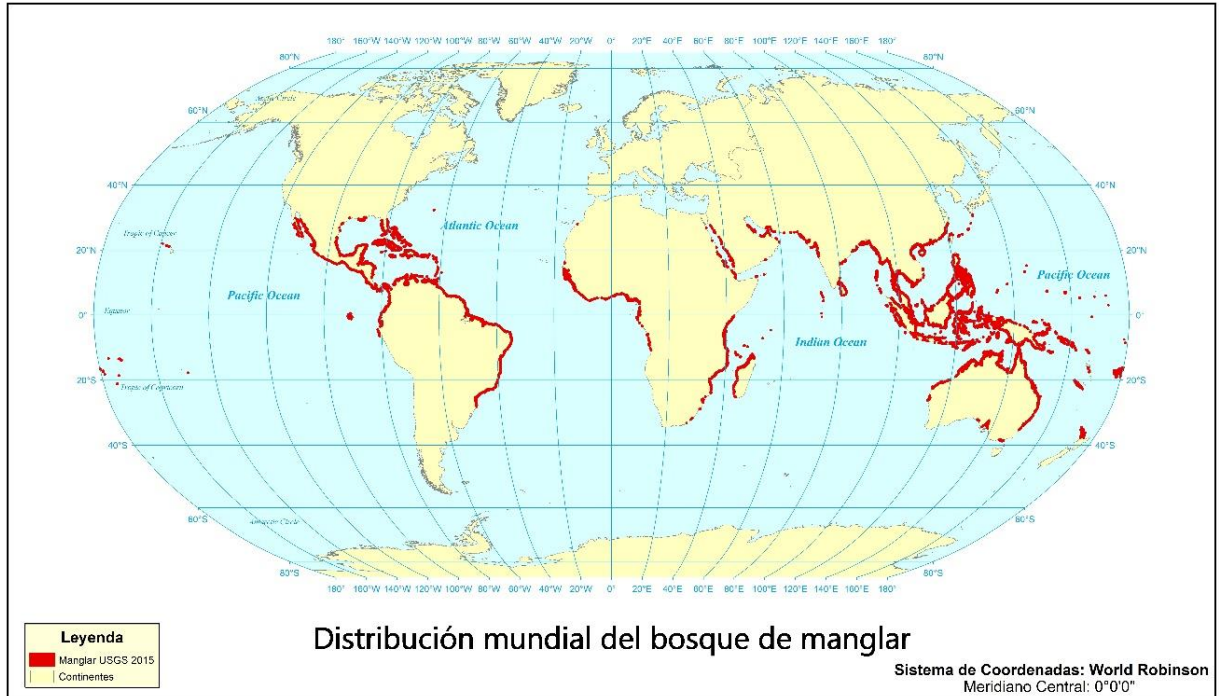
### 2.1 El cambio climático

La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera excede por mucho los niveles existentes antes de la revolución industrial, llegando incluso a niveles que no existían desde hace medio millón de años (Costanza et al., 1997; Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014). Después de la quema de combustible fósil, el cambio de uso de suelo es la causa más importante de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (IPCC<sup>1</sup>, 2014). Es en las zonas cercanas a los trópicos donde se da la mayor degradación de los bosques y la conversión de zonas boscosas en zonas de otros usos (FAO & Jrc, 2012; Van der Werf et al., 2009, p.19), lo que representa un grave riesgo para la preservación de los ecosistemas de manglar.

Mundialmente, los manglares representan el 0.1% de la superficie continental y el 0.4% de las áreas forestales (**Figura 2-1**) aun así, juegan un importante rol en el ciclo global del carbono (Giri et al., 2011). La fijación de bióxido de carbono atmosférico durante la fotosíntesis por las plantas de mangle constituye a menudo la principal entrada de carbono orgánico al ecosistema de manglar. La producción primaria neta de carbono (NPP) de este ecosistema se valúa en  $218 \pm 72 \text{ Tg C yr}^{-1}$  (Bouillon et al., 2008) habiendo una tendencia general latitudinal a ser más productivo cerca del ecuador y menor a latitudes mayores. Como consecuencia de esta producción primaria neta, tenemos que la cantidad de biomasa aérea (above-ground biomass o AGB) almacenada por los manglares es la segunda en cantidad ( $7\,990 \text{ gCm}^{-2}$ ) solo detrás de los bosques tropicales terrestres ( $12\,015 \text{ gCm}^{-2}$ ) (Laffoley & Grimsditch, 2009, p.48). Los manglares representan un vínculo importante en el ciclo biogeoquímico del carbono que se da entre la tierra y el mar, ya que no sólo recibe entradas de materia orgánica de origen terrígeno, sino que además lo hace con la zona costera que le rodea, gracias al flujo de marea.

---

<sup>1</sup> Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.



**Figura 2-1** Distribución mundial del bosque de manglar, elaboración propia con datos de Ocean Data Viewer (2015).

Debido al cambio climático hay mucho riesgo sobre los ecosistemas de bosque de manglar. Las predicciones sugieren que debido al aumento del nivel medio del mar en los próximos cien años, se podrían perder del 30% al 40% de los humedales costeros y un 100% del bosque de manglar si la tendencia actual de pérdida continúa (Duke et al., 2007; IPCC, 2014). Para las siguientes décadas se proyecta un acelerado aumento del nivel del mar pudiendo llegar desde los 0.52 a 0.98 m para el año 2100 a razón de 8 a 16 mm por año (IPCC, 2014). El aumento del nivel medio del mar unido a fenómenos terrestres como la subsidencia puede afectar los manglares alrededor del mundo ya que el ecosistema de manglar no puede mantener la misma tasa de crecimiento que el nivel medio del mar (Mitra, 2013, p.135).

En cuanto al cambio en los patrones de precipitación, se estima un aumento del 25% en la precipitación para 2050 como consecuencia del calentamiento global (Mitra, 2013, p.137). Aunque los modelos predicen un cambio desigual, esto es, en algunas zonas habrá

un aumento mientras que en otras la precipitación disminuirá. Como consecuencia en las regiones donde la precipitación disminuya (Centroamérica en los meses de invierno por ejemplo) habrá menos disponibilidad de agua fresca para el manglar y para el agua subterránea, lo que aumentaría la salinidad del subsuelo y disminuiría la productividad del manglar y por lo tanto en su área de cobertura, en las regiones donde se proyecta un aumento de precipitación (latitudes norte medias) el área y la diversidad del manglar puede aumentar como consecuencia de la disminución de salinidad en las marismas que pueden ser reemplazadas por manglar como se observa en el sureste de Australia (Mitra, 2013, p.134).

El IPCC (2014) en su escenario más optimista proyecta un aumento de temperatura para 2100 de 1.8° C relativo a 1980-1999. La mayoría de las especies de manglar producen mayor densidad de vástagos cuando la temperatura del aire alcanza los 25 °C y deja de producir hojas cuando la temperatura media del aire baja a menos de 15 °C. A temperaturas mayores de los 25 °C, puede disminuir la formación de hojas y de 38 a 40 °C casi no hay fotosíntesis. A pesar de estos datos, se estima que el manglar no sea impactado de forma adversa por el aumento en la temperatura media mundial (Mitra, 2013, p.132).

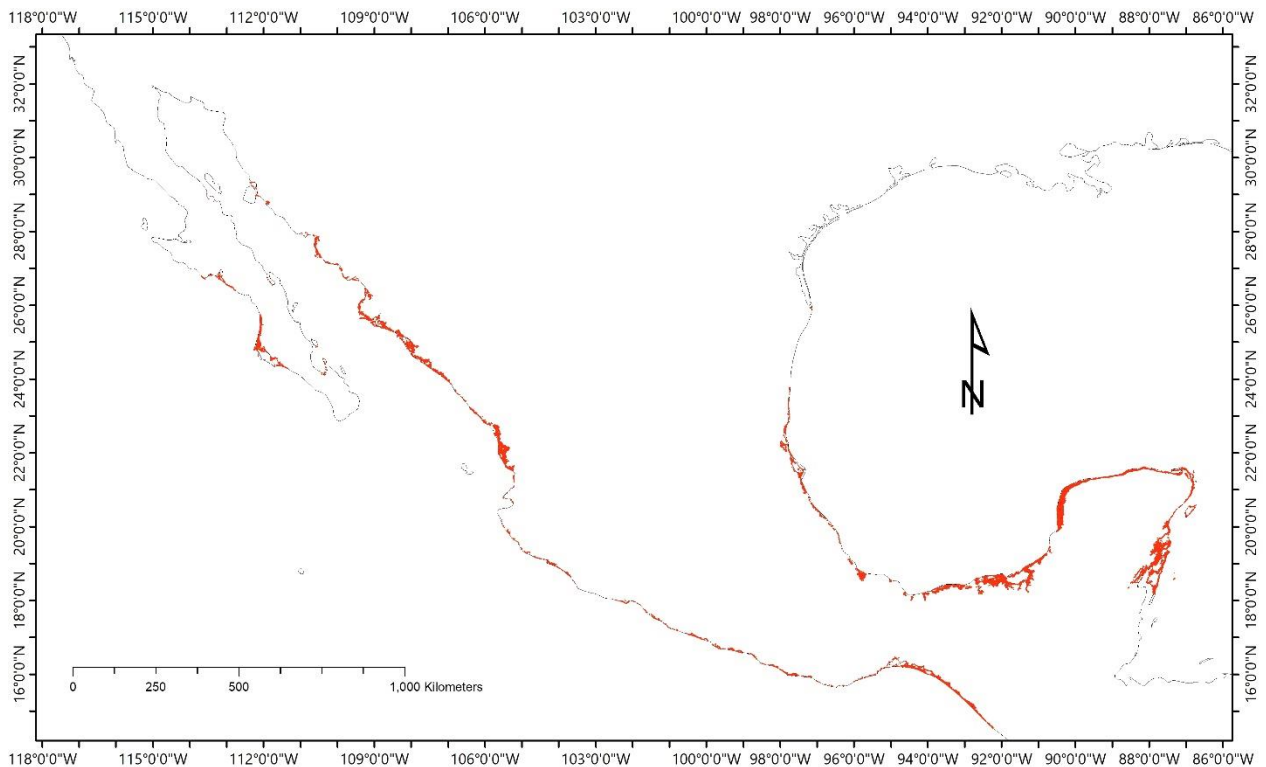
## **2.2 Cobertura de bosque de manglar en México**

La extensión de los manglares de México coloca a este en el cuarto lugar mundial, detrás de Indonesia, Brasil y Australia; representa el 5% del total de los manglares del mundo (Rodríguez Zúñiga et al., 2013, p.10). De entre las cerca de 50 especies reportadas alrededor del mundo en México encontramos principalmente cuatro: el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), el mangle prieto (*Avicennia germinans*) y el mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*) las cuales están protegidas por la Norma Oficial Mexicana 059 ya que son consideradas como especies amenazadas (Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2010).

En la **Figura 2-2** se puede observar la distribución de los manglares en nuestro país a lo largo de los 17 estados con litoral. La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) los divide para fines de estudiar y monitorear los manglares

del país de forma más precisa en cinco regiones: Pacífico Norte, Pacífico Centro, Pacífico Sur, Golfo de México y Península de Yucatán.

Según estudios realizados por la CONABIO en 2005 (Rodríguez Zúñiga et al., 2013, p.40) la cobertura de bosque de manglar a nivel nacional era de 774 090 ha mientras que para 2010 ésta disminuyó a 764 486 ha, lo que representa una pérdida de 1.24% en tan solo cinco años. La mayor cantidad de superficie cubierta por bosque de manglar está situada en la Región Península de Yucatán que incluye a los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Para 2005 esta región contaba con 423 751 ha, hacia 2010 la cobertura se redujo a un total de 417 025 ha, es decir, en un 1.58% que es mayor al promedio nacional. A nivel estatal, Yucatán contaba en 2005 con 91 701 ha de manglar, en 2010 este cuenta con 91 356 ha que representan el 11.9% del total nacional y una pérdida de 345 ha de bosque de manglar es decir el 0.37% estatal. En contraste con la tendencia nacional y estatal Barrera Falcón, (2016) encuentra para esta misma zona de estudio un incremento positivo en la cobertura de manglar para el periodo 2004-2014, con una ganancia de 1257.8 ha.

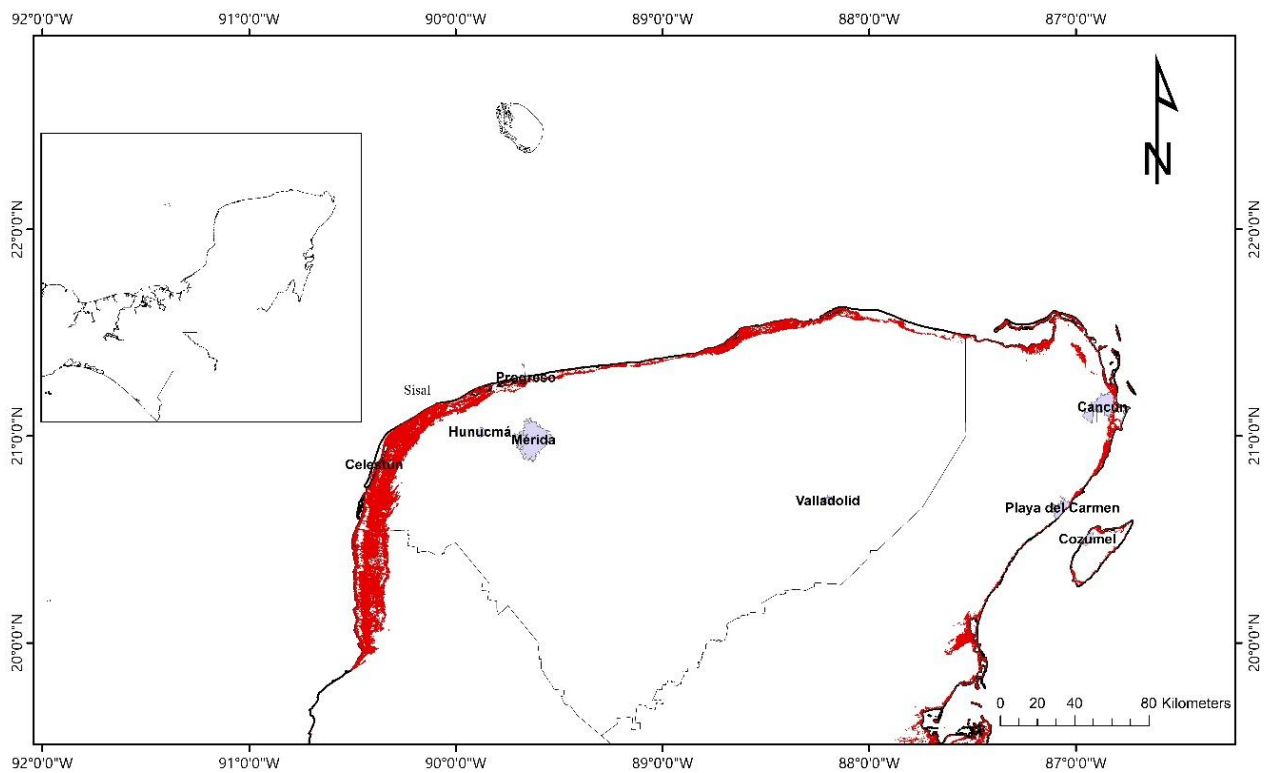


**Figura 2-2** Distribución del manglar en el litoral mexicano en 2015, elaboración propia con datos de CONABIO.



## 2.3 Características del bosque de manglar en Yucatán

En el estado de Yucatán el bosque de manglar es parte de playas, lagunas costeras, petenes y ciénagas. Puede ser encontrado a lo largo de toda la Península de Yucatán (**Figura 2-3**) en donde se distribuyen las cuatro especies existentes en nuestro país (Islebe et al., 2015, p.46). Su importancia ecológica se basa principalmente en que forman hábitat para organismos que se encuentran bajo algún estatus de protección nacional o internacional además del valor comercial que poseen (Zaldívar et al., 2004). El elaborado sistema radicular de los manglares amortigua la energía de las mareas, disminuyendo la erosión y protegiendo a la biodiversidad costera de los fenómenos destructivos como los huracanes. Una característica particular de los manglares en Yucatán es el fuerte vínculo que tienen con las descargas de agua subterránea, siendo esta relación local un factor que determina su productividad primaria, fisonomía y trayectorias de restauración ecológica (Zaldívar et al., 2004).



**Figura 2-3** Distribución del bosque de manglar en la Península de Yucatán en 2015, elaboración propia con datos de CONABIO (2015).

En la Península de Yucatán encontramos cuatro tipos de bosque de manglar (Zaldívar et al., 2004):

1. Manglar de franja. Ubicado principalmente en la línea de costa (Dzilam de Bravo) y lagunas costeras (Celestún). Es influenciado directamente por la marea y el viento. La especie dominante es *Rhizophora mangle* tiene una altura promedio de 11.2 m (J. A. Herrera-Silveira, R., & J., 1998).
2. Manglar de cuenca. Se encuentra en depresiones topográficas detrás del manglar de franja tierra adentro. En este la influencia de la marea es menor, la especie dominante depende de la salinidad y concentración de nutrientes. Encontrándose bosques de *Avicennia germinans* con una altura promedio de 11 m (en Sisal por ejemplo) si el sitio registra salinidades mayores a 40g/kg o bosques de *Laguncularia racemosa* (Dzilam por ejemplo) si la salinidad es menor a 35 g/kg (J. A. Herrera-Silveira et al., 1998) .

3. Manglar Chaparro. Se encuentran en escenarios húmedos en los extremos del anillo de cenotes principalmente Con una altura promedio de entre 1.5 y 2.5m, en zonas con limitación de nutrimentos en el sedimento y elevada salinidad.
4. Manglar de Petén. Este tipo de manglar está asociado a cuerpos de agua como manantiales y ojos de agua conocidos como petenes, estos son lugares con alta concentración de nutrientes, baja salinidad y suelos con una gruesa capa de materia orgánica, por lo que este manglar alcanza alturas de hasta 15m, predomina *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa* y se encuentra en lugares como Celestún, El Palmar y Dzilam de Bravo (J. A. Herrera-Silveira et al., 1998).

## **2.4 Dinámica costera en el norte de la Península de Yucatán**

La península de Yucatán es una gran plataforma de rocas calcáreas marinas, el terreno es en su mayoría plano con un promedio de altitud menor a los 50 m sobre el nivel del mar (García & Mosiño, 1968, p.12). Por sus características cársticas, el agua fluye en una gran red de ríos subterráneos con flujo predominante hacia el oriente y poniente de lo que se conoce como "anillo de cenotes" hacia Dzilam y Celestún respectivamente.

Para Herrera-Silveira y Morales-Ojeda (2010, p.308) las lagunas costeras son cuerpos de agua poco profundos, cerrados o semicerrados que generalmente se orientan de forma paralela a la costa, separadas del mar por alguna barrera arenosa, pudiendo tener una o más entradas al mar y estar conectadas al mar de forma intermitente o permanente. Según los mismos autores en la península de Yucatán existen cinco lagunas costeras principales reconocidas en la costa del Golfo de México: Celestún, Chelem, Dzilam, Río Lagartos y Holbox y destacan que estas cinco lagunas varían en tamaño. Aunque en general son someras (de 0.2 a 5 m de profundidad) con un rango de mareas moderado (0.06 a 1.5m) y una alta temperatura media del agua (mayor de 20°C). Todas reciben aportación de agua dulce por manantiales o escorrentías. Hay un considerable flujo de descargas de aguas residuales de las zonas urbanas y de la actividad agrícola.

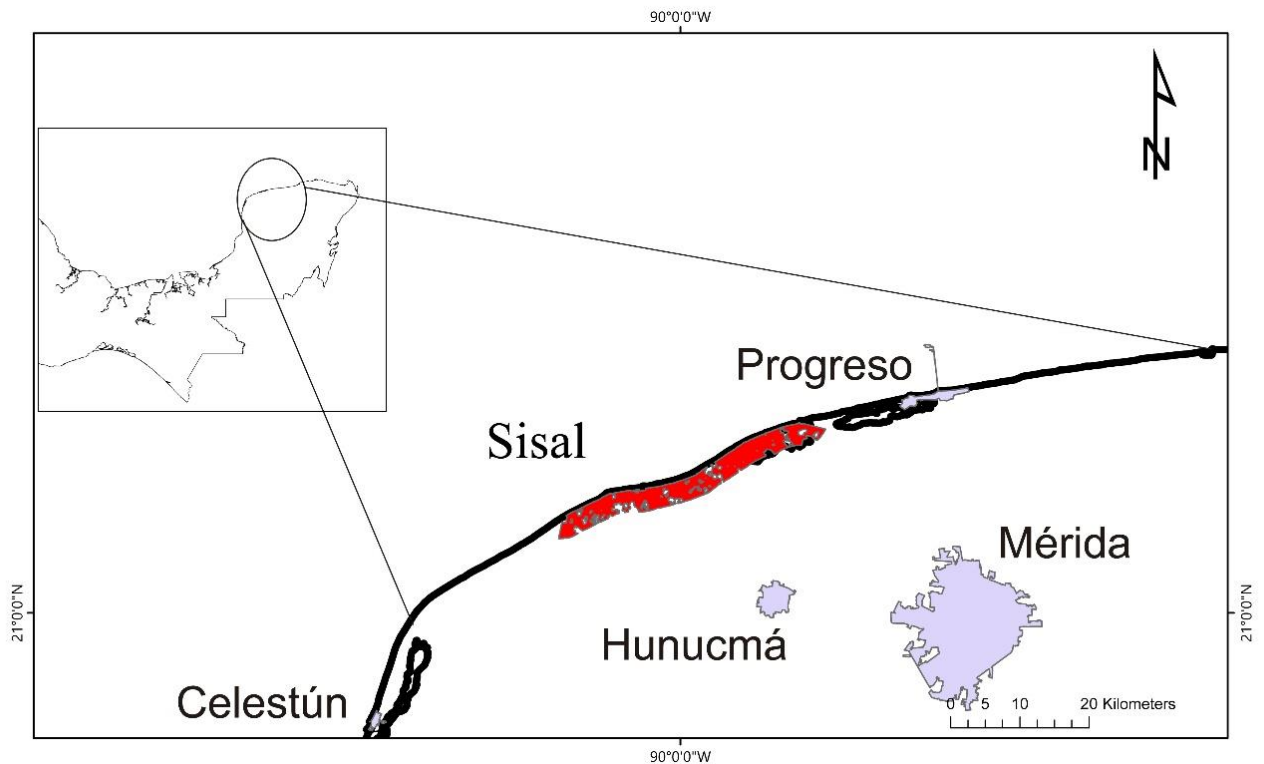
Podemos distinguir en la zona costera de la Península de Yucatán tres estaciones bien definidas: secas (de marzo a mayo), lluvias (de junio a octubre) y nortes (de noviembre a febrero). Además la temporada de huracanes (de agosto a septiembre) puede tener una

gran influencia en la estabilidad o perturbación de estas lagunas costeras en caso de algún evento (Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2010, p.310).

## **2.5 Área de Estudio**

El área de estudio comprende una franja de aproximadamente 36 km de costa por 3km tierra adentro en el norponiente del Estado de Yucatán (**Figura 2-4**). La mitad de la zona se encuentra dentro de la Reserva Estatal El Palmar y la otra dentro de la Reserva Estatal Humedales y Manglares de la costa norte de Yucatán, aunque de esta última todavía no entra en vigor ningún programa de manejo operante.

El Palmar fue declarada Reserva Estatal por el Gobierno del Estado de Yucatán el 23 de enero de 1990 (Gobierno del Estado de Yucatán, 2007), está comprendida dentro de los municipios de Celestún y Hunucmá entre las coordenadas 90°00'00" y 90°22'30" de longitud Oeste y 20°55'00" y 21°11'00" de latitud Norte, colinda al Oeste con la Reserva de la Biosfera Ría Celestún y al Este con el Puerto de Sisal, comprendiendo una extensión total de 49 605.39 ha, incluyendo una franja marítima de 9 442.11 ha Las poblaciones importantes más cercanas son Celestún y Sisal.



**Figura 2-4** Localización del área de estudio en la costa noroeste del Estado de Yucatán, elaboración propia con datos de Erick Barrera (2016).

El clima de la Reserva Estatal El Palmar corresponde al subtipo BS<sub>1</sub> (h') W, cálido-seco, con lluvias en verano y una precipitación invernal de entre el 5 y el 10%. (Batllori et al., 2006; García Echeverría & Piña Herrera, 2003). El promedio anual de temperatura es de 26°C, CONAGUA<sup>2</sup> reporta una precipitación promedio anual de 600 mm y una evaporación de 1 682 mm. El suelo posee gran permeabilidad debido a sus características calizo-cársticas y está sujeto a una gran erosión, es poco propicio para la agricultura ya que tiene poca profundidad y exceso de sales, los diferentes tipos de suelo que se encuentran en la reserva pertenecen al orden azonal, lo que quiere decir que el desarrollo de su perfil es incipiente y que está sujeto a un movimiento continuo de material por la acción del viento, flujo laminar de agua pluvial e inundación por mareas.

El 19 de marzo de 2010 fue declarada como Área Natural Protegida La Reserva Estatal Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán, situada en los municipios de

<sup>2</sup> Comisión Nacional del Agua, sitio web: <http://www.gob.mx/conagua>.

Hunucmá, Ucú, Progreso, Ixil, Motul, Dzemul, Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo del Estado de Yucatán con una superficie de 54 776.726 hectáreas (Gobierno del Estado de Yucatán, 2010). La relevancia ecológica de esta reserva es enorme ya que forma una franja de amortiguamiento y conectividad entre el mar y la tierra y es un área de descarga de acuíferos. La franja de la zona de estudio perteneciente a esta reserva se encuentra en su área occidental, en la porción más al oeste de esta área natural protegida, allí se encuentran ciénagas, manglares, petenes, seibadales<sup>3</sup> y pastizales inundables que son el hábitat de una gran variedad de especies de flora y fauna endémica, fauna migratoria y fauna acuática.

## 2.6 Estado del arte

Existen estudios realizados en la costa yucateca en los cuales se ha logrado caracterizar (Batllori et al., 2006) y describir de diferentes maneras los procesos físicos y biológicos que corresponden a esa zona (Enriquez, Mariño-Tapia, Jeronimo, & Capurro-Filograsso, 2013; Mendoza & Trejo-Rangel, 2013) así como también algunos dedicados al estudio de la descarga de nutrientes en donde se hace evidente la importancia de las descargas subterráneas a falta de ríos importantes (e.g. Aranda-Cirerol, Herrera-Silveira, & Comín, 2006). Hay también estudios dedicados a la temperatura superficial del mar y a la velocidad del viento (e.g. Soler-Bientz, Watson, Infield, & Ricalde-Cab, 2011) y los que describen la circulación oceánica y el afloramiento costero producido por efectos del viento en la plataforma continental de Yucatán (Ruiz-Castillo, Gomez-Valdes, Sheinbaum, & Rioja-Nieto, 2016). Recientemente se han realizado estudios para identificar los principales factores ambientales del cambio de cobertura de manglar en el paisaje de la costa norte de la Península de Yucatán (Rioja-Nieto et al., 2017) y para evaluar el efecto del manejo en la Reserva Estatal El Palmar utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota (Rioja-Nieto, Moreno-Ruiz, & Gómez-Valdés, 2015).

El uso de datos obtenidos por percepción remota ofrece muchas ventajas para el estudio de áreas de bosque de manglar ya que se pueden monitorear cambios en el tiempo con

---

<sup>3</sup> Conocidos también como seiba o pasto de tortuga están formados por una fanerógama *Thalassia testudinum*.

mucha certidumbre, rapidez y relativo bajo costo (E. P. Green, Clark, Mumby, Edwards, & Ellis, 1998; Kuenzer, Bluemel, Gebhardt, Quoc, & Dech, 2011).

Por otra parte, existen abundantes trabajos que muestran la dependencia de la cobertura espacial de bosque de manglar a las variaciones climáticas. Krauss et al. (2013) establecen que la persistencia del bosque de manglar dentro de la zona intermareal es influenciada por la elevación regional del nivel del mar y la geomorfología dominante, sugiere que la variabilidad en la precipitación, el incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, y cambios en el nivel medio del mar tienen el potencial de influenciar la estabilidad del hábitat a través de retroalimentaciones (feedbacks). Datos de altimetría satelital arrojan un aumento de nivel del mar a razón de  $3.2 \pm 0.4$  mm/año (Krauss et al., 2013). Aunado a este aumento, el mismo autor señala que muchos bosques de manglar experimentan movimientos superficiales de suelo como la subsidencia, que aumentan el grado de inundación pudiendo esto llevarlos a la muerte ya que los bosques de manglar están en un balance muy delgado. Los manglares son extremadamente sensibles al aumento del nivel del mar, con demasiada inundación se "ahogan" y muy poca disminuye su productividad pudiendo incluso ser reemplazados por marismas o comunidades de cianobacterias (C Lovelock, Skilleter, & Saintilan, 2009, p.5).

En cuanto a temperatura Krauss et al. (2013) dice que ya que los procesos fotosintéticos y la respiración de las plantas en general son altamente sensibles a la temperatura, la fotosíntesis en el bosque de manglar cercano al trópico se ve limitada por las altas temperaturas del mediodía sobre las hojas, lo que resulta en un déficit de presión de vapor entre las hojas y aire y por lo tanto en el cierre de los estomas, al contrario de lo que pasa en latitudes más extremas donde las bajas temperaturas limitan la fotosíntesis y los ciclos reproductivos. Para la respiración (el eflujo de CO<sub>2</sub>), argumenta que cada aumento de 10°C duplica la emisión de CO<sub>2</sub>, por lo que concluye que es de esperarse una alteración en el balance de estos procesos. En el mismo artículo declara que la diversidad de manglar decrece conforme se incrementa la latitud.

En estudios relacionados con las variables ambientales y sus efectos sobre el bosque de manglar Cavanaugh et al. (2014) concluyen que el área histórica de manglar en la costa atlántica de Florida de los 29° a los 29.75° se duplicó de 1984 a 2011 y asocia este incremento más que a un aumento en la temperatura global, a la menor incidencia de frentes fríos o eventos climáticos con frío extremo. Los cambios en los patrones de precipitación son más difíciles de asociar, pues a nivel global mientras algunos lugares

sufren un aumento de la misma, en otros las temporadas de sequía disminuyen, aunque en promedio la precipitación no cambie mucho, ha aumentado la aparición de eventos meteorológicos extremos. La precipitación tiene influencia en la composición, diversidad y productividad de los humedales intermareales y modula la extensión de la región hipersalina donde los manglares son excluidos (C Lovelock et al., 2009, p.6). Con relación a estas últimas dos variables Rioja-Nieto et al. (2017) encuentran que la precipitación acumulada y el máximo de temperatura son las variables ambientales más influyentes sobre la cobertura de bosque de manglar en la zona de estudio que es de interés para el presente trabajo.



### **3 MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO**

Antes de comenzar el análisis de datos es necesario establecer el conjunto de conocimientos que se usarán como base en la presente investigación, es decir, estableceremos el marco conceptual. Posteriormente se describirá el origen y características generales de los datos usados en el análisis de las variables climáticas incluidas en el estudio y de las correspondientes coberturas de bosque de manglar. Continuando con la metodología, se hace un análisis exploratorio de datos para posteriormente usar técnicas estadísticas más avanzadas que incluyen análisis de correlación y generación de mapas de correlación.

#### **3.1 Marco conceptual**

En los manglares tenemos una mezcla de plantas, animales, microorganismos, agua y suelo que tienen entre sí intensas interacciones biológicas, físicas y químicas que combinadas, junto con el valor de diversidad biológica y cultural otorgan a este ambiente una enorme importancia para el desarrollo social y económico de cualquier latitud (Yáñez-Arancibia & Day, 2010).

El cambio climático global tiene diferentes consecuencias en la zona costera del Golfo de México, entre las que podemos citar incremento de la temperatura superficial del mar, ascenso en el nivel del mar, cambios en el patrón de precipitación, aumento en la frecuencia de ciclones tropicales, incremento en la presencia de tormentas tropicales e incremento en la temperatura tierra adentro (Yáñez-Arancibia, Day, Twilley, & Day, 2010). "Los manglares como hábitat forestado crítico de la zona costera presentan respuestas de acomodación frente a la variabilidad ambiental que induce el cambio global, desarrollando un papel estructural y funcional clave en la estabilidad de la línea de costa, la persistencia de hábitats y biodiversidad, el metabolismo del ecosistema, reduciendo riesgos e incertidumbre para el desarrollo sustentable del uso de sus recursos" (Yáñez-Arancibia et al., 2010).

Los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas de bosque de manglar, pueden ser potenciados por las modificaciones antropogénicas del paisaje, las cuales afectan la

hidrología de humedales, la sedimentación y los regímenes de nutrientes (Eslami-Andargoli, Dale, Sipe, & Chaseling, 2010).

Son muchos los factores que influyen en la conformación del ecosistema del bosque de manglar y también los son la gran cantidad de interrelaciones que éste tiene con el medio que le rodea, debido a esta complejidad adoptaremos como marco conceptual a la Ecología del Paisaje.

### **3.1.1 Ecología del paisaje**

En 1939 el biogeógrafo alemán Carl Troll acuña el término "Ecología del paisaje" esperando poder combinar el enfoque espacial (horizontal) de los geógrafos con el enfoque funcional (vertical) de los ecólogos (Farina, 2006, p.1).

La ecología del paisaje es el estudio de los efectos recíprocos de los patrones espaciales en los procesos ecológicos; promueve: el desarrollo de modelos y teorías de las relaciones espaciales, la recolección de nuevos tipos de datos sobre patrones espaciales y dinámicas, y la inspección de escalas espaciales que raras veces se abordan en ecología (Pickett & Cadenasso, 1995).

Son dos los aspectos que distinguen a la ecología del paisaje de otras subdisciplinas de la ecología (Turner, Gardner, & O'Neill, 2001, pp.3-4):

En primer lugar, la ecología del paisaje aborda explícitamente la importancia de la configuración espacial en los procesos ecológicos.

En segundo lugar, la ecología del paisaje a menudo se centra en extensiones espaciales que son mucho más grandes que las estudiadas tradicionalmente en la ecología que normalmente son como las vistas por un observador humano.

La ecología del paisaje se enfoca en la estructura espacial y la función paisajística, por lo que su enfoque es adecuado para analizar el paisaje en múltiples escalas espaciales (Pettit, C., Cartwright, W., Bishop, I., Lowell, K., Pullar, D., Duncan, 2008) en donde la estructura describe la composición y configuración de los elementos naturales para apoyar las funciones del paisaje, y la función engloba a los servicios ambientales proveídos por él, tales como regulación, protección y producción (De Groot, 2006).

El paisaje incluye la mayoría de las características que definen un sistema complejo y son varios los modelos que guían los procesos relacionados con el paisaje (Farina, 2006, p.5). Debido a esta complejidad, la ecología del paisaje acepta varias definiciones del paisaje, citadas en Farina (2006, p.5):

- El carácter total de una región (von Humboldt).
- El paisaje atendiendo a su totalidad tanto a lo físico, lo ecológico, las entidades geográficas, integrando todo lo natural y humano, las causas y los procesos (Naveh, 1987).
- Es una superficie heterogénea compuesta por grupos de ecosistemas que interactúan y que se van repitiendo en forma similar (Forman Richard T. T. & Godron Michel, 1986).
- Una configuración particular de la topografía, cubierta vegetal, uso del suelo y patrón de asentamiento que delimita cierta coherencia natural y cultural, procesos y actividades (B. H. Green, Simmons, & Woltjer, 1996).
- Haber (2004) define el paisaje como "un pedazo de tierra la cual percibimos integralmente a nuestro alrededor, sin mirar de cerca ningún componente, y el cual es familiar para nosotros".

En la ecología del paisaje se estudian sistemas complejos que necesitan ser referenciados a un organismo para su mejor comprensión ya que el paisaje percibido por los humanos es diferente al percibido por una especie en particular (J. a. Wiens & Milne, 1989).

Los principales enfoques cuantitativos indican características (parches, límites, uso de suelo, topográficas, etc.) del paisaje (Farina, 2006, p.313) como son las técnicas de Percepción Remota. Los datos de percepción remota pueden ser adquiridos, procesados y mejorados a través de diversas técnicas y algoritmos disponibles en diferentes plataformas.

### **3.1.2 Percepción Remota**

El término Percepción Remota fue ideado a principios de la década de los sesenta para designar cualquier medio de observación remota, es decir, alejado de superficie la tierra. De forma más amplia la Percepción Remota no solo engloba los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación (Chuvieco, 2010, p.1).

La Percepción Remota es definida como la medición de las propiedades de un objeto sobre la superficie de la Tierra usando datos adquiridos por aviones y satélites, es por tanto, un intento de medir algo a cierta distancia, más que in situ (Schowengerdt, 2007, p.2).

Entre las aplicaciones más destacadas de la Percepción Remota enfocadas a la observación de la tierra podemos mencionar (Camps-Valls, Tuia, Gómez-Chova, Jiménez, & Malo, 2011, p.3):

1. Monitoreo y modelación de procesos en la superficie de la Tierra y su interacción con la atmósfera.
2. La adquisición de estimaciones y medidas cuantitativas de variables geográficas, biológicas y físicas.
3. La identificación de materiales en la corteza superficial de la Tierra analizando las firmas espectrales obtenidas por satélite o en sensores aerotransportados.

Estas actividades son posibles gracias a que los objetos en estudio absorben, emiten o reflejan radiación electromagnética de diferentes longitudes de onda dependiendo de la composición del material en estudio, de esta forma radiación es captada por sensores remotos que pueden encontrarse típicamente en satélites artificiales o en aviones.

Acorde a la fuente de radiación usada para la adquisición de los datos, podemos agrupar la Percepción Remota en dos grupos principales: Percepción Remota *Pasiva* si usamos al Sol como fuente de iluminación y Percepción Remota *Activa* si es mediante una antena a bordo de algún satélite o avión de la cual se envía una señal a la superficie de la Tierra y esta es captada de regreso por el mismo dispositivo que la envió.

En la actualidad existen un gran número de sensores dedicados a la observación y adquisición de datos de la superficie de la Tierra.

### **3.1.3 Estudios a mesoescala**

En geografía el concepto de escala ha sido muy debatido, el término escala es ambiguo y es usado para referirse tanto al nivel de detalle geográfico como a la extensión espacial de una cobertura geográfica (Goodchild & Proctor, 1997). En cartografía es reportado como la razón entre una unidad de distancia en el mapa y su equivalente distancia en la Tierra (Atkinson & Tate, 2000). En el contexto de la percepción remota la escala es análoga a la resolución espacial (Woodcock & Strahler, 1987) donde resolución espacial se

entiende como el tamaño del área sobre la superficie de la tierra de la cual se derivan las mediciones que conforman la imagen. Para Marceau & Hay (1999) la escala representa la ventana de percepción al cambiar la escala se afectan los valores de la realidad, lo que tiene implicaciones en la dinámica de cualquier sistema.

Existen varias acepciones de escala en la literatura, Cao y Lam (1997, p.57) describen cuatro tipos:

1. La escala cartográfica o del mapa se refiere a la proporción de distancia en el mapa con respecto a la que esta representa sobre la superficie de la Tierra.
2. La escala geográfica u observacional, se refiere al tamaño o la extensión espacial del estudio.
3. La escala operacional se refiere a la escala en la cual ciertos procesos suceden en el medio ambiente, es decir es la escala en la cual un fenómeno determinado es observable.
4. La escala de medida o resolución espacial se refiere a las partes distinguibles más pequeñas de un objeto como los pixeles en percepción remota o el intervalo de muestreo en ecología.

La escala de una investigación puede tener profundos efectos en los patrones encontrados (J. A. Wiens, 1989). La escala apropiada para nuestras observaciones es una función del sitio de estudio y del tipo de información esperada, las técnicas usadas para extraer la información de una imagen también influyen en la selección, por lo que el problema de seleccionar la escala es altamente complejo (Woodcock & Strahler, 1987). Uno de los juicios centrales a cerca de la escala es que los datos pueden aportar diferente información cuando son presentados a diferentes escalas lo que da lugar a la formulación de representaciones jerárquicas y a la aparición de propiedades emergentes para modelarlos por lo que uno de los problemas clave es que muchos modelos son dependientes de la escala (Bian, 1997, p.13). La capacidad de detectar patrones es una función de la extensión (área) que abarca el estudio y del tamaño del pixel de una imagen, cuando la escala en la medición de una variable cambia, su varianza cambia, el cómo depende de la extensión del estudio y del tamaño del pixel, así por ejemplo, el incremento en el área de estudio incorporara una mayor heterogeneidad espacial por lo que la varianza entre los pixeles aumentara si mantenemos el tamaño del pixel constante (J. A. Wiens, 1989).

El cambio climático es un fenómeno global que tiene enormes repercusiones sobre el ecosistema de bosque de manglar (Ellison, 2015). Sin embargo, algunos autores (e.g. Ward, Friess, Day, & MacKenzie, 2016) han propuesto para el estudio de sus efectos sobre el ecosistema de manglar un enfoque regional ya que resaltan que aunque el manglar se distribuye a lo largo de todo el trópico, estos varían sustancialmente en términos de biodiversidad, estructura ecológica, fisiología, características hidrodinámicas y geomorfológicas y tolerancia a factores ambientales como temperatura y salinidad, por lo que es probable que el impacto del cambio climático sea diferente a escala regional y local y por lo tanto que sugieren revisar la literatura región por región, de acuerdo a su clasificación nuestro país se encuentra en la región Norteamérica, Centroamérica y el Caribe.

La American Meteorological Society (2017)<sup>4</sup> define a la mesoescala (mesoscale) como: Perteneciente a los fenómenos atmosféricos que tienen escalas horizontales que van desde unos cuantos hasta varios cientos de kilómetros, incluyendo tormentas, frentes fríos, bandas de precipitación en ciclones tropicales y extratropicales y sistemas meteorológicos generados topográficamente como olas de montaña y brisas marinas y terrestres.

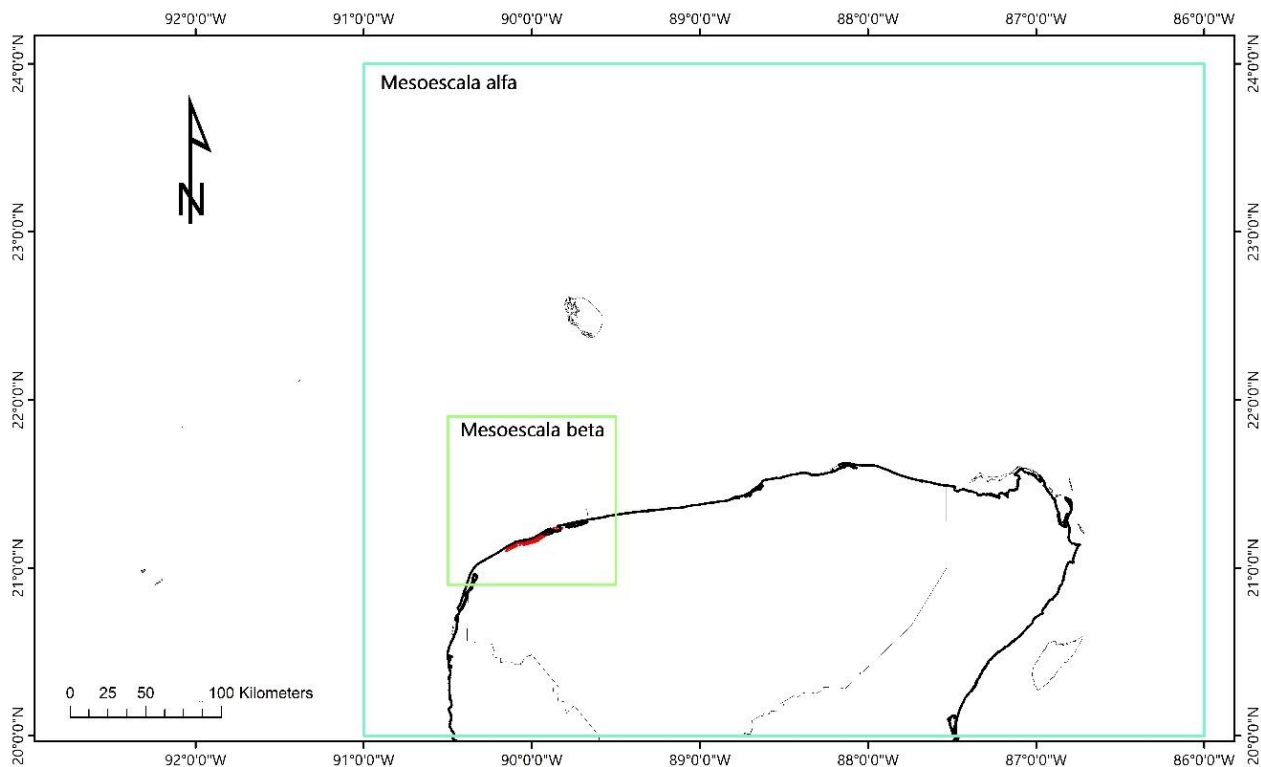
Desde una perspectiva dinámica, la mesoescala se refiere a procesos con escalas de tiempo que van desde la inversa de la frecuencia de Brunt-Väisälä hasta un día de péndulo, abarcando la convección húmeda profunda y el espectro completo de las ondas de inercia-gravedad, pero sin incluir fenómenos de escala sinóptica que tienen números de Rossby menores de 1

La zona de estudio comprende una franja 36 km de costa en el noroeste del Estado de Yucatán con un buffer de 3 km tierra adentro, debido a estas dimensiones y con la finalidad de explorar la zona desde diferentes perspectivas de acuerdo a la disponibilidad de nuestros datos, se hicieron paralelamente dos estudios a mesoescala. De acuerdo a la clasificación de Fujita (1986, pp.18-35) el primer análisis se realizó a una escala meso- $\alpha$  (de 200 a 2000 km) que comprende una región de estudio entre los -86 y los -91°E de longitud y los 20 y los 24°N de latitud (**Figura 3-1**), esto bajo el supuesto de que los

---

<sup>4</sup> Mesoscale - AMS Glossary. (2012). Recuperado el 3 de agosto de 2017, a partir de <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Mesoscale>

fenómenos meteorológicos locales tienen una gran dependencia de lo que ocurre con las variables ambientales a esta escala, en ella se analizan datos de una red de puntos de 5 grados de ancho por 4 de alto. En el segundo se delimitó un cuadrado de 1 grado por 1 grado alrededor de la zona de estudio de los -85.5 a los -90.5° de longitud y de los 20.29 a los 21.29° de latitud, por lo que es una región de estudio a escala meso- $\beta$  (de 20 a 200 km). Otra manera referirse a los fenómenos a mesoescala es diciendo que son eventos que suceden entre la microescala (menos de 2 km) y la escala sinóptica (synoptic-scale) para zonas de más de 2000 km.



**Figura 3-1** Zonas consideradas para analizar datos a mesoescala alfa y mesoescala beta alrededor de la reserva El Palmar, elaboración propia.

Una característica interesante de los estudios a mesoescala es que incluyen términos y datos que a otras escalas se pueden despreciar como por ejemplo las aceleraciones verticales del aire que a escala sinóptica no son importantes, la fuerza de Coriolis y los gradientes de presión verticales con efectos que normalmente son ignorados en la microescala.

Una ventaja del uso de la percepción remota en los estudios geofísicos es su gran cobertura, pues se pueden desplegar estructuras horizontales de parámetros ambientales y observar su evolución, por ejemplo los satélites meteorológicos muestran los ejes de los meandros de la Corriente del Golfo y la de Kuroshio en base a observaciones de la temperatura superficial del mar (Ikeda, 1995a). Así mismo estudios a mesoescala hechos con altímetros abordo de satélites demuestran ser apropiados para estudiar la variabilidad en altura de la superficie del mar la cual es un indicador de la circulación oceánica cerca de la superficie (Ikeda, 1995b).

En este trabajo se consideran cuatro variables meteorológicas relevantes para el crecimiento y propagación del manglar: precipitación, temperatura superficial del mar (SST), anomalía del nivel del mar (SSH) y velocidad del viento a 10 m sobre el nivel del mar.

### **3.2 Descripción de los datos**

Esta investigación incluye dos tareas dentro de la percepción remota, la primera es obtener las variaciones temporales de las variables climáticas consideradas como más relevantes para el mismo, a saber: precipitación, temperatura superficial del mar, velocidad del viento y anomalía del nivel del mar, la segunda es explorar las correlaciones que existen entre los cambios temporales de estas variables y el cambio en la cobertura de bosque de manglar en el mismo lapso de tiempo (de 2004 a 2014). Las variables ambientales son obtenidas de diferentes centros de datos de acceso abierto pertenecientes a la red de Centros Nacionales de Información Ambiental<sup>5</sup> de la NOAA<sup>6</sup>. El cambio en la cobertura de bosque de manglar es obtenido mediante el análisis de imágenes del satélite SPOT 5 y validado a través de datos de campo.

---

<sup>5</sup> Los Centros Nacionales de Información Ambiental (NCEI por sus siglas en inglés de National Centers for Environmental Information) de la NOAA albergan y proporcionan acceso a uno de los archivos más importantes de la Tierra, con datos oceánicos, atmosféricos y geofísicos completos. Desde las profundidades del océano hasta la superficie del sol y desde los registros de hielo de millones de años hasta las imágenes de satélite en tiempo casi real, NCEI es la principal autoridad nacional de los Estados Unidos para la información ambiental.

<sup>6</sup> Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.



### 3.2.1 Datos de precipitación

Los datos de precipitación fueron obtenidos el 25 de septiembre de 2014 del NOAA's National Climatic Data Center, a través de su programa de registro de datos climáticos obtenidos por satélite: Climate Data Record (CDR), dirección web: <http://www.ncdc.noaa.gov/cdr/index.html>. El National Research Council (NRC) de los Estados Unidos define al producto CDR como una *serie de tiempo de mediciones de longitud, consistencia y continuidad suficientes para determinar la variabilidad y el cambio climático*.

Específicamente estos datos corresponden al producto denominado NOAA Climate Data Record (CDR) of Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN-CDR) Version 1 Revision 1<sup>7</sup>, página web: <https://www.ncdc.noaa.gov/cdr/atmospheric/precipitation-persiann-cdr>. Este producto es desarrollado usando el Gridded satellite infrared data (GridSat-B1), cuyos datos son derivados mezclando datos del International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP B1) página web <https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/isccp-b1-info.php> y del Global Precipitation Climatology Project. (GPCP) que pertenece al World Climate Research Programme (WCRP) dirección web: <http://wcrp-climate.org/>.

Los datos de precipitación fueron descargados directamente del servidor FTP del programa: <ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/cdr/persiann/files/>. Consisten en la información de la precipitación cuasi-global diaria para el período de 2004 a 2014. Originalmente cubren una zona mundial desde los 60°S a los 60°N y desde los 0° a los 360° longitud este (es decir al este del meridiano de Greenwich) con una resolución espacial de 0.25 grados o 25 km aproximadamente (Ashouri et al., 2015). En su forma original, los archivos obtenidos son diarios, es decir un archivo por día correspondiente a la precipitación diaria acumulada en ese día en esa rejilla cuadrada de un cuarto de grado por lado, son distribuidos en formato NetCDF (Network Common Data Form) página electrónica <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/> el cual es ampliamente usado

---

<sup>7</sup> Soroosh Sorooshian, Kuolin Hsu, Dan Braithwaite, Hamed Ashouri, and NOAA CDR Program (2014): NOAA Climate Data Record (CDR) of Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN-CDR), Version 1 Revision 1. [2004 a2014]. NOAA National Climatic Data Center. DOI:10.7289/V51V5BWQ [abril de 2015].

para el manejo de grandes cantidades de datos científicos y cumple un estándar internacional del Open Geospatial Consortium (OGC)<sup>8</sup>.

### 3.2.2 Datos de temperatura superficial del mar

La temperatura superficial del mar (sea surface temperature o SST) es fundamental para comprender el sistema climático, los datos de temperatura superficial del mar obtenidos por percepción remota corresponden a la capa más cercana a la superficie y que está en contacto directo con la atmósfera, es la que recibe, emite y transmite radiación electromagnética y que por lo tanto define el brillo que reciben los sensores satelitales (Clave et al., 2007).

La información relativa a la temperatura superficial del mar fue obtenida el 12 de septiembre de 2014 directamente del Colorado Center for Astrodynamics Research (CCAR) de la University of Colorado Boulder, página web <http://ccar.colorado.edu/>, el acceso a su servidor FTP (<ftp://eddy.colorado.edu>) fue facilitado por Michael R. Shannon investigador de la University of Colorado Boulder. Originalmente estos datos son producidos por el Group for High Resolution SST (GHRSSST) página web <https://www.ghrsst.org> y distribuidos por el Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) organismo situado y manejado por el NASA's Jet Propulsion Laboratory (JPL) en Pasadena, California. Vínculo web <http://podaac.jpl.nasa.gov/GHRSSST> y <http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/JPL-L4UHfnd-GLOB-MUR>.

El análisis y obtención inicial de estos datos se basa en observaciones superficiales y subsuperficiales de temperatura de varios instrumentos, incluyendo: el NASA Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSRE), el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sobre las NASA Aqua and Terra platforms, the US Navy microwave WindSat radiometer y observaciones *in situ* de temperatura superficial del mar (SST) del NOAA iQuam Project (*in situ* SST quality monitor) dirección electrónica <https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/sst/iquam/about.html> .

---

<sup>8</sup>El OGC (Open Geospatial Consortium) es una organización internacional sin fines de lucro comprometida con la creación de estándares abiertos de calidad para la comunidad geoespacial global. Estos estándares se hacen a través de un proceso de consenso y están disponibles libremente para que todos los usen para mejorar el intercambio de los datos geoespaciales del mundo, página web <http://www.opengeospatial.org/>.

El CCAR distribuye datos únicamente para el Golfo de México, son archivos de promedio diario de temperatura superficial del mar con una resolución espacial de 0.011 de grado. Al igual que los datos de precipitación los datos de temperatura superficial del mar vienen distribuidos en forma de rejillas en donde el valor promedio proporcionado representa el valor promedio de la variable en todo el cuadrado. Son aportados en formato NetCDF.

### **3.2.3 Datos de anomalía de nivel del mar**

La anomalía del nivel del mar, en inglés sea surface height anomaly (SSH) o también sea surface height above sea level, es la distancia del nivel del mar con respecto al nivel medio del mar que normalmente está muy cerca del geode. Este conjunto de datos fue obtenido de igual manera del Colorado Center for Astrodynamics Research a través de su servidor FTP el 29 de abril de 2015, incluyen información sólo para en Golfo de México, los mismos son una fusión de diferentes productos<sup>9</sup> basados en el Geophysical Data Records (GDR) para el GEOSAT ERM, ERS-1, Topex/Poseidon, ERS-2, GEOSAT Follow-On (GFO), Envisat, las misiones Jason-1 y OSTM/Jason-2. Los datos originales son proveidos por el Radar Altimeter Database System (RADS), dirección <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>, alojado por el Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS), el cual es un Instituto especializado en el análisis de mediciones geofísicas de alta precisión, se encuentra en la Delft University of Technology en Holanda, página web <http://www.as.lr.tudelft.nl/>.

El formato en el cual son descargados los datos es NetCDF, son datos de anomalía diaria y la rejilla tienen una resolución espacial de 0.25 grados (Leben, Born, & Engebretth, 2002).

### **3.2.4 Datos de velocidad del viento**

El conjunto de datos de velocidad del viento, representa la velocidad del viento calculada a 10 m sobre el nivel del mar. El producto que se usó en este trabajo es denominado

---

<sup>9</sup> Para más información consultar el apéndice: Leben, R.R., G.H. Born, and B.R. Engebretth. 2002. Operational altimeter data processing for mesoscale monitoring. *Marine Geodesy* 25:3-18, doi:10.1080/014904102753516697

Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP<sup>10</sup>) y es un conjunto de vectores de viento superficial en rejillas producidos usando datos de satélite, boyas ancladas y modelos de viento, es considerado un producto de nivel 3 (L3) para el análisis de viento en el océano (Atlas et al., 2010). Los CCMP Version-2.0 vector wind analyses son producidos por Remote Sensing Systems (RSS) y están disponibles en [www.remss.com](http://www.remss.com); fueron descargados el 21 de junio de 2016 vía FTP.

Los datos CCMP combinan mediciones de viento por microondas provenientes de satélites de calibración cruzada con información obtenida de mediciones directas, esto usando un método de análisis variacional (Variational Analysis Method o VAM) para producir rejillas de datos con una resolución espacial de 0.25 de grado. RSS deriva los datos de satélite de varios instrumentos de microondas activos y pasivos, usa un modelo de emisividad superficial del mar y una función de transferencia radiativa para derivar los vientos superficiales resultando que sus datos son altamente consistentes con mediciones de radiómetros de microondas. También usa datos de dispersómetros de microondas incluyendo QuikSCAT y ASCAT.

La información usada proviene exclusivamente del producto denominado CCMP V2.0 Level-3.5 (L3.5) disponible en formato NetCDF-4, es proporcionada como un promedio mensual de velocidad de viento que contiene dos matrices de tamaño 1440 (longitud) por 628 (latitud de los -78.375 a 78.375 grados). Las dos matrices corresponden a las componentes  $U$  y  $V$  del viento en metros/segundo ( $\frac{m}{s}$ ), la convención estándar para la dirección del viento es que  $U$  es positiva hacia la derecha (este) y  $V$  es positivo hacia arriba (norte).

### **3.2.5 Cobertura de bosque de manglar**

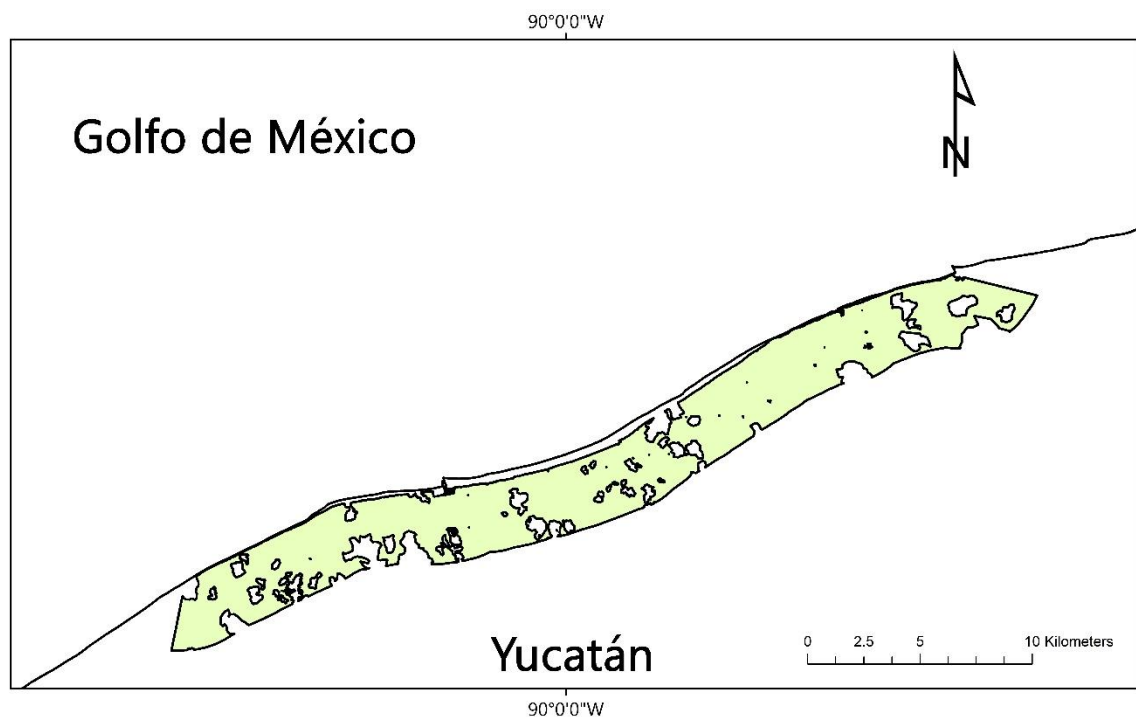
Para el presente trabajo se usaron siete imágenes satelitales multiespectrales y pancromáticas del satélite SPOT 5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre: Satélite Para la Observación de la Tierra). Todas ellas fueron obtenidas y procesadas como parte la tesis de maestría de Erick Barrera Falcón (2016), quién realizó el preprocesamiento y

---

<sup>10</sup> Wentz, F.J., J. Scott, R. Hoffman, M. Leidner, R. Atlas, J. Ardizzone, 2015: Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product on 0.25 deg grid, Version 2.0, [Level-3.5]. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at [www.remss.com/measurements/ccmp](http://www.remss.com/measurements/ccmp). [Accessed 23 jun 2016].

procesamiento de las imágenes, su clasificación y obtención de las coberturas como se describe a continuación en la mencionada tesis:

A las imágenes originales se les realizó su corrección geométrica en el software ERDAS 2015, utilizando de 10 a 12 puntos de control sobre una imagen georreferenciada, no se ortorrectificó debido a que el suelo es prácticamente plano, se realizó corrección atmosférica con el módulo ATCOR incluido en el mismo software. Con el objeto de aumentar la resolución espacial a 2.5 m, se fusionaron las escenas multiespectrales con las escenas pancromáticas, se generó un AOI de aproximadamente 36 km de costa por 3 km hacia el continente, finalmente se eliminaron las zonas cubiertas por nubes y sombras en cada una de las imágenes para así no tener errores en las clasificaciones (**Figura 3-2**).



**Figura 3-2** Zona de estudio delimitada después del procesamiento de las imágenes SPOT, elaboración propia con datos de Erick Barrera (2016).

Bajo el supuesto de que la fecha de toma de la imagen no afecta la observación satelital de su cobertura puesto que el bosque de manglar es perene, se usaron

cuatro imágenes obtenidas en temporada de secas y tres en temporada de nortes (**Tabla 3-1**). Se realizó una clasificación supervisada utilizando 26 campos de entrenamiento y 21 sitios de validación, la validación se corroboró con datos verificados en campo. Los campos de entrenamiento se aplicaron usando la técnica de sembrado y crecimiento de píxeles (E. Green, Mumby, Edwards, & Clark, 2000) citado por Barrera Falcón (2016) basado en características espectrales. Mediante esta clasificación se obtuvieron las coberturas de bosque de manglar para los años mencionados, obteniendo cuatro clases para cada escena: manglar, otra vegetación, suelo desnudo, y zona inundada.

La fecha de la toma de imágenes y la validación del proceso de clasificación usando datos obtenidos en campo son reportados en la **Tabla 3-1** (Barrera Falcón, 2016).

**Tabla 3-1** Fecha de las imágenes, precisiones y coeficientes kappa, post-clasificación 2004-2014

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Precisión</b>	<b>Kappa</b>
2004	Marzo 2004	91.67	0.86
2006	Enero 2006	91.89	0.83
2007	Abril 2007	91.67	0.86
2009	Diciembre 2009	97.44	0.95
2011	Enero 2011	97.5	0.95
2012	Marzo 2012	97.37	0.95
2014	Marzo 2014	87.18	0.78

La cobertura de manglar estimada para este periodo por Barrera (2016) se resume en la siguiente tabla, en la que podemos observar para 2004 una cobertura de bosque de manglar de 3 449.9 ha y de 4 707.7 ha para 2014, que nos indica un incremento de 1 257.8 ha en este periodo con una tasa de cambio anual de 3.1 %.

**Tabla 3-2** Cobertura del bosque de manglar, periodo 2004-20014

<b>Año</b>	<b>Hectáreas</b>
2004	3449.9
2006	3473.4
2007	3780.9
2009	3796.2
2011	3812.8
2012	4184.7
2014	4707.7

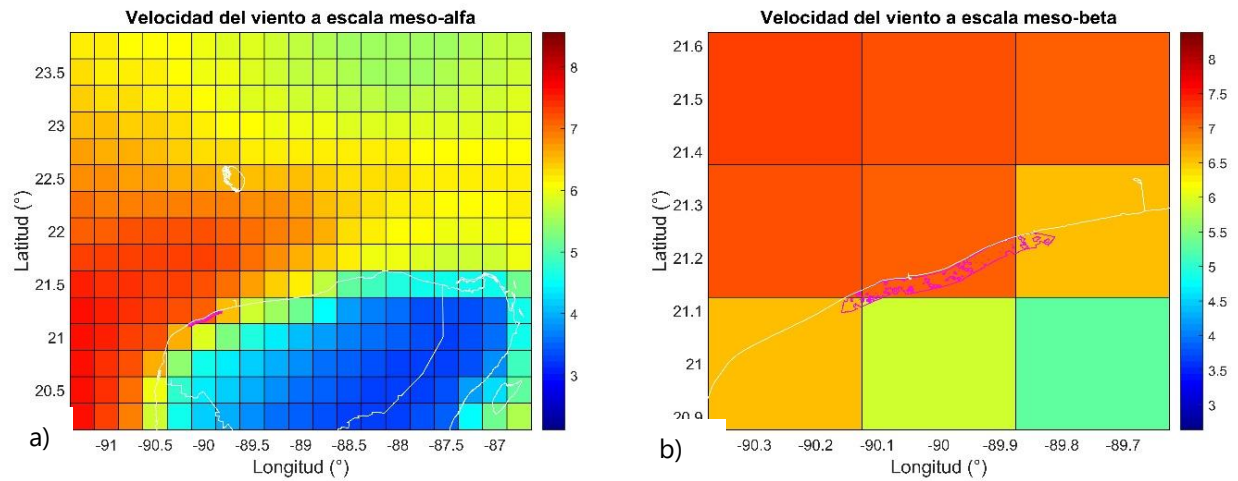
### **3.3 Análisis de datos**

#### **3.3.1 Visualización espacial y temporal de datos**

Una vez reunidos la totalidad de datos, se procedió a ordenarlos y a filtrarlos para obtener la información relevante a la zona de estudio, todos los procesos y análisis de datos fueron realizados con el software matemático MATLAB® 2014b<sup>11</sup> (referido en adelante como Matlab). Aunque los datos en su conjunto tienen diferente formato por venir de diferentes fuentes, el denominador común es la existencia de un archivo de datos por día lo que se traduce en 4018 archivos. Cada archivo de datos diario viene en forma de una matriz de coordenadas geográficas que asocia el valor promedio diario de la variable en cuestión con su ubicación en la superficie terrestre, así que espacialmente tenemos nuestra información dividida en rejillas (grids) como se observa en la **Figura 3-3**, a los que también nos referiremos como píxeles. El valor asignado a cada rejilla representa el valor promedio diario de cada variable dentro del área geográfica delimitada por la rejilla y las coordenadas que vienen asociadas con ella representan el centro geográfico de la misma.

---

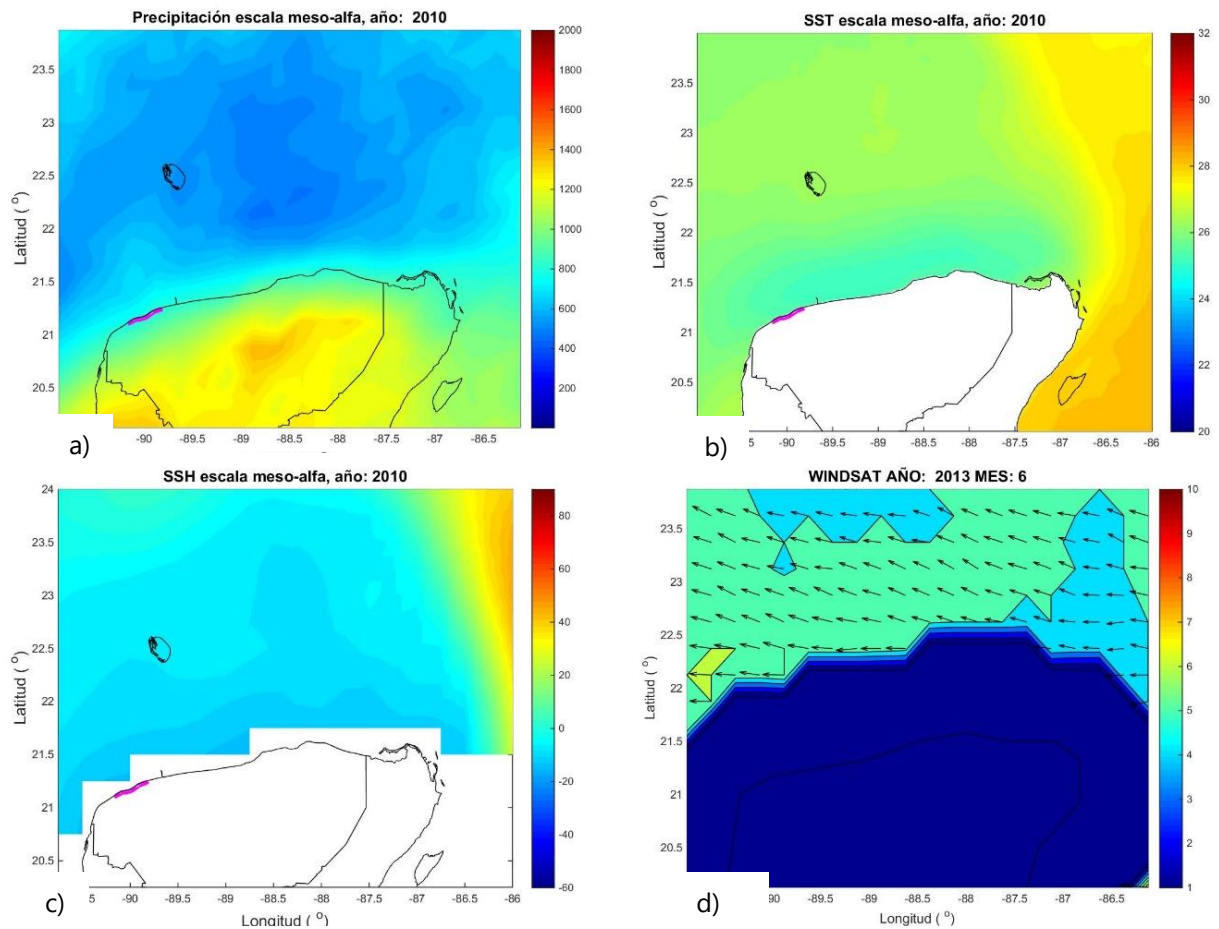
<sup>11</sup> MATLAB Release 2014b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.



**Figura 3-3** Visualización del grid de datos a escalas a) meso- $\alpha$  y b) meso- $\beta$  para la velocidad del viento. Se muestra el promedio anual para el año 2014 donde cada píxel tiene un tamaño de 0.25 grados.

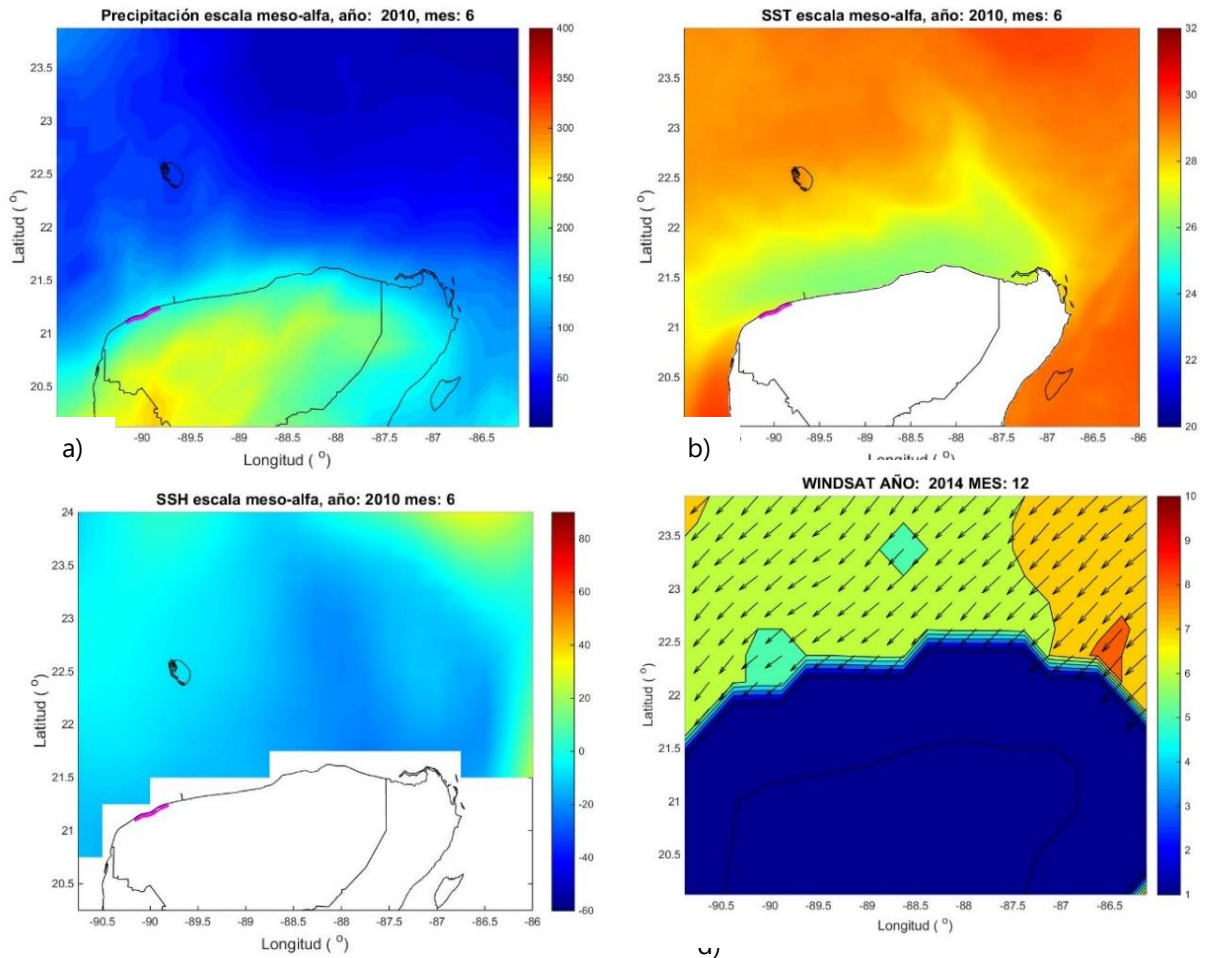
El tratamiento inicial de los datos fue explorarlos a través de la ubicación geográfica y la distribución de los mismos sobre la zona de estudio, para lo cual se obtuvieron mapas de distribución espacial de los promedios anuales de cada variable ambiental (**Figura 3-4** y **Figura 3-6**). Debido a la gran cantidad de información, se obtuvieron mapas mensuales para cada variable obteniendo el promedio mensual de los valores de cada variable ambiental y representándolos espacialmente (**Figura 3-5** y **Figura 3-7**). Como ya se mencionó, se consideraron dos escalas espaciales para el análisis de los datos una región a escala meso- $\alpha$  de cinco grados de longitud y cuatro de latitud alrededor de la zona de estudio y una región a escala meso- $\beta$  de un grado de longitud por uno de latitud (**Figura 3-3**).





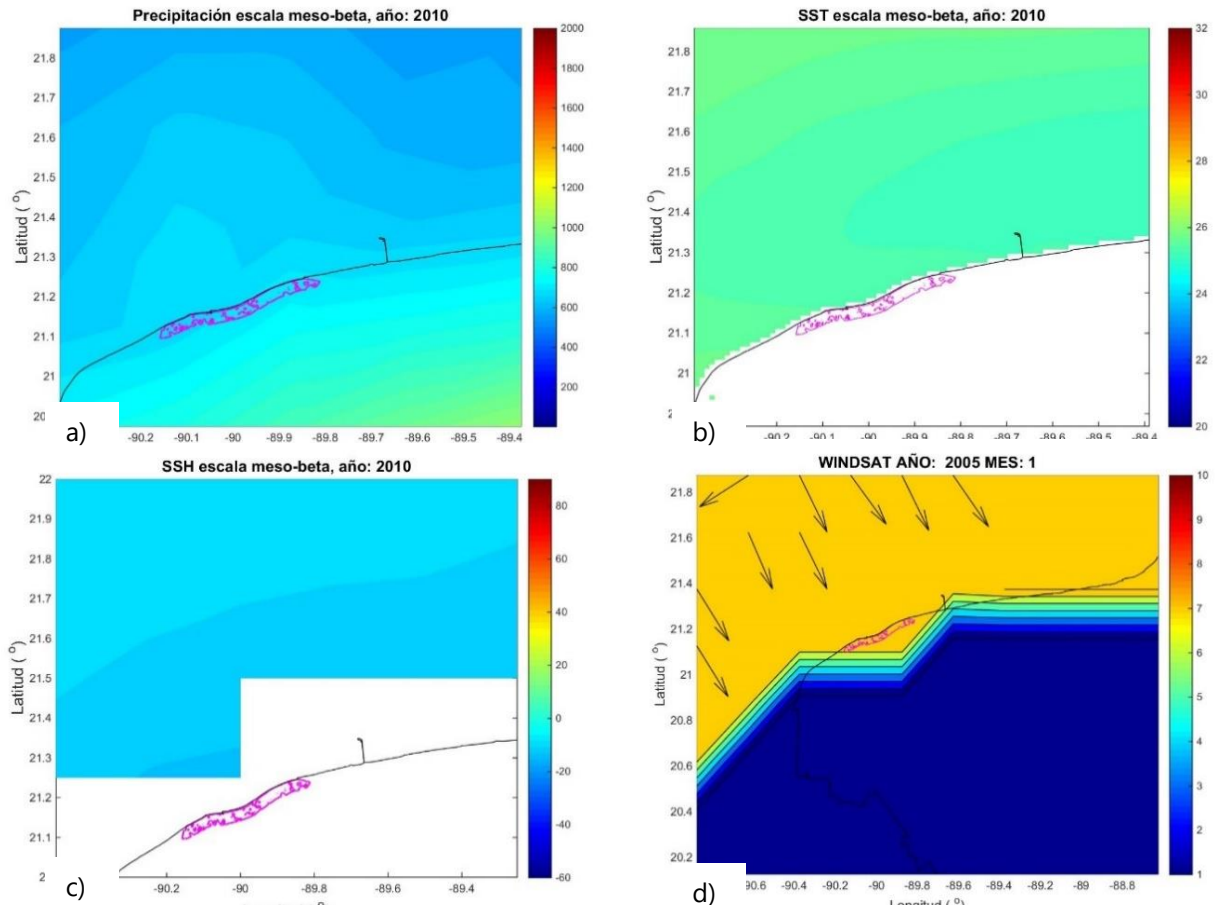
**Figura 3-4** Promedio anual de las variables ambientales para el año de 2010 a escala meso- $\alpha$ , a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.

Por mostrar ejemplos de la distribución espacial para cada variable en cada escala hemos elegido el año 2010 y el mes de julio de ese año por estar situados temporalmente en medio de los datos analizados para mostrar los mapas de distribución mensual y anual de cada variable ambiental. Como podemos observar en las **Figuras 3-4 a 3-7** para el caso de la precipitación y de la velocidad del viento los datos cubren completamente ambas regiones de estudio, es decir la región marina que rodea la reserva El Palmar y la parte continental de la península de Yucatán, mientras que para la temperatura superficial del mar y la anomalía del nivel del mar, la información cubre únicamente la parte marina, habiendo un comportamiento bien diferenciado de las variables en la zona continental y la parte oceánica.

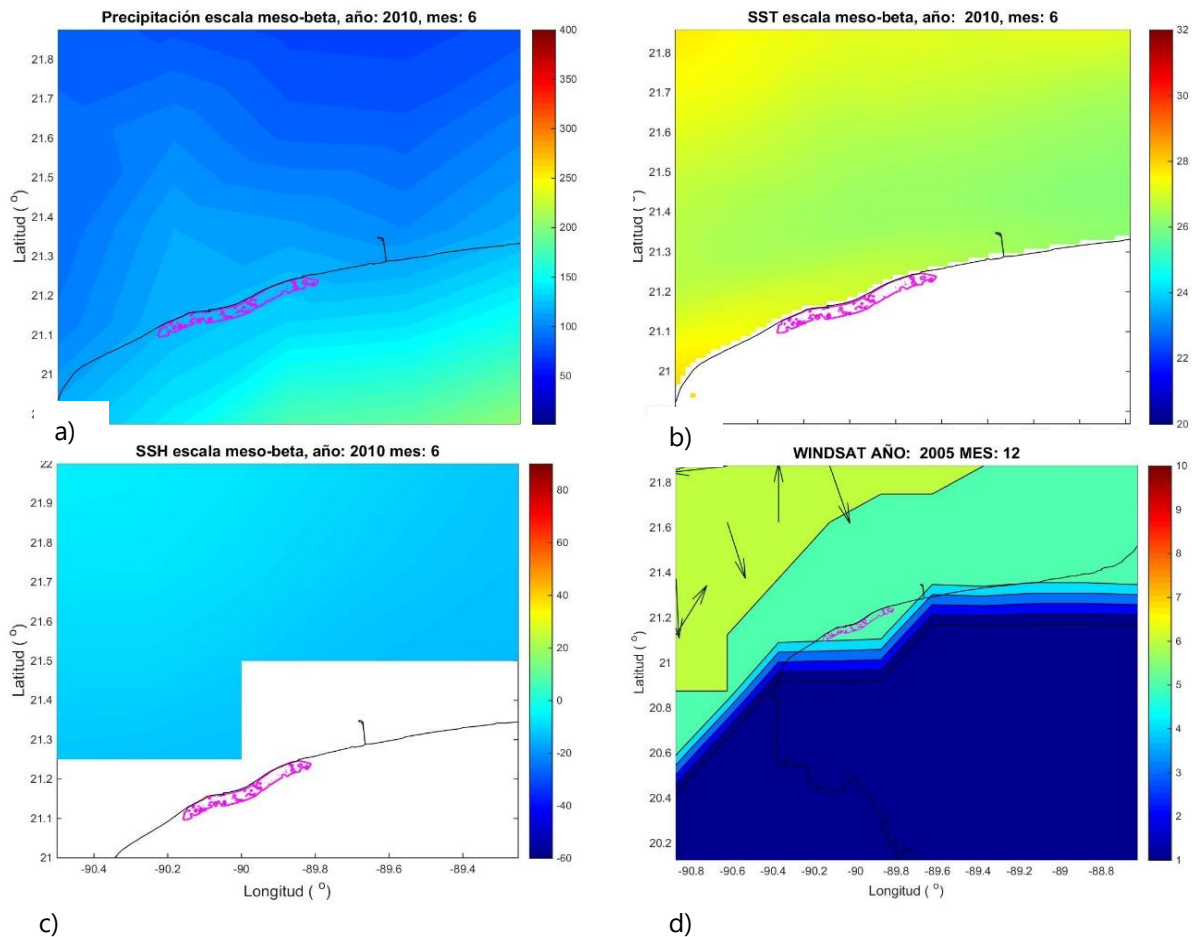


**Figura 3-5** Promedio mensual de las variables ambientales para el mes de junio de 2010 a escala meso- $\alpha$ , a) Precipitación mensual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.

Para la zona a escala meso- $\alpha$  podemos ver que nuestra área de estudio es relativamente pequeña, mientras que para la zona meso- $\beta$  la zona en estudio aparece mejor proporcionada (Figuras 3-4 a 3-7).



**Figura 3-6** Promedio anual de las variables ambientales para el año de 2010 a escala meso- $\beta$ , a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.



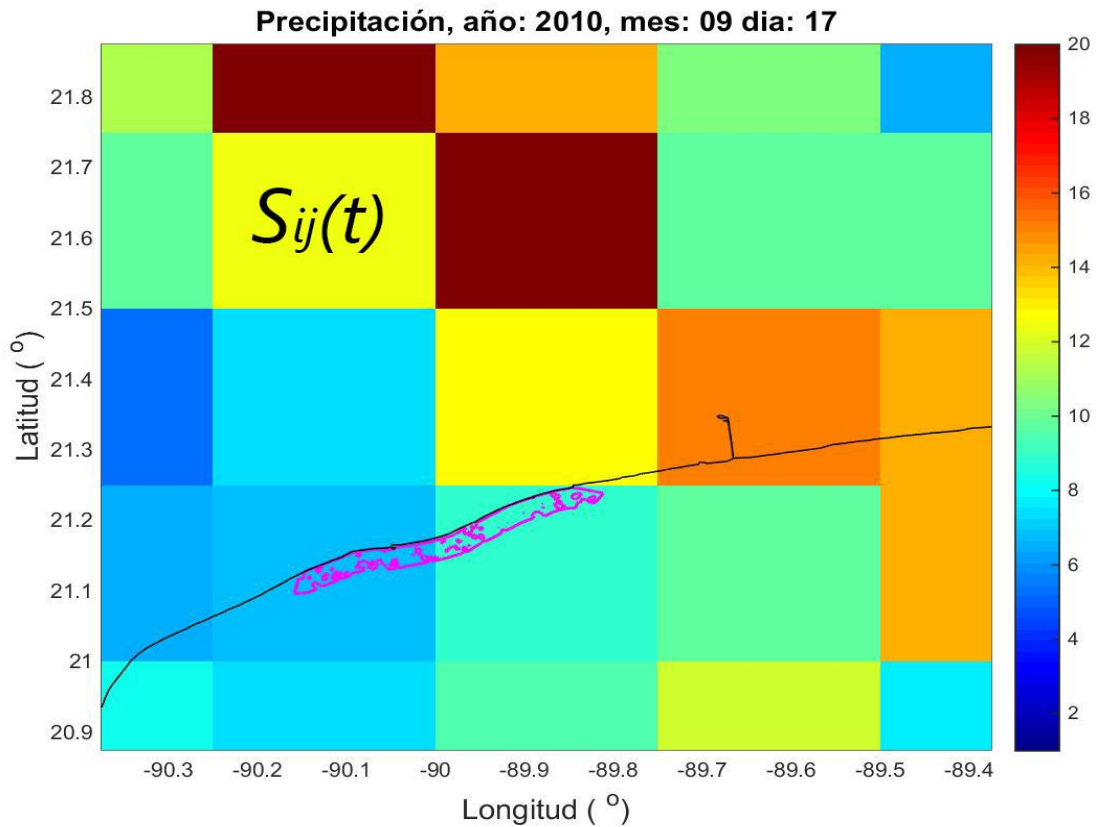
**Figura 3-7** Promedio mensual de las variables ambientales para el mes de junio de 2010 a escala meso- $\beta$ , a) Precipitación acumulada mensual, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.

### 3.3.2 Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos se refiere al uso de métodos analíticos y descriptivos con el objetivo de mostrar la distribución de los valores de las variables de estudio, sin ocultar su comportamiento estructural, lo que frecuentemente pasa al usar los estadísticos clásicos como media, desviación típica, etc. (Tukey, 1977). Incluye el uso de tablas de distribución de valores y gráficos que nos representan los datos sin que necesariamente se predisponga a algún tipo de relación entre ellos.

La extracción de la información de los datos fue directa de los archivos descargados usando programas elaborados en Matlab. En la **Figura 3-8** podemos observar una rejilla de

los datos de precipitación para el 17 de septiembre de 2010 a escala meso- $\beta$  en la que se identifica a cada pixel con una entrada de la matriz de datos:



**Figura 3-8** Pixel de datos de latitud  $i$  y longitud  $j$  en la fecha  $t$ , forman la matriz  $S$  correspondiente a toda la escala de análisis, la variable es precipitación a meso escala- $\beta$  para el 17 de septiembre de 2010.

Consideremos de manera general los datos obtenidos a escalas de estudio meso- $\alpha$  y meso- $\beta$  como una matriz

$$[S_{ij}(t)]$$

Donde las entradas  $i$  y  $j$  de  $S$  representan la latitud y la longitud respectivamente y  $t$  es el día del año, se obtuvieron las matrices anuales  $[M_{ij}]$  que tienen como entradas los promedios anuales de las variables SST, SSH y velocidad del viento para cada rejilla  $ij$ :

$$M_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^n S_{ij}(t)}{n}$$

Siendo  $n$  el número de días del año.

En el caso de la precipitación cada entrada de  $[M_{ij}]$  representa el acumulado anual.

$$M_{ij} = \sum_{t=1}^n S_{ij}(t)$$

Las matrices  $[M_{ij}]$  son importantes porque representan el promedio anual de cada variable en cada rejilla de nuestras zonas de estudio meso- $\alpha$  y meso- $\beta$  alrededor de la reserva estatal El Palmar. Fue precisamente con estas matrices  $[M_{ij}]$  con las que se elaboraron los mapas mostrados en la **Figura 3-4** y la **Figura 3-6**, para el caso de la **Figura 3-5** y **Figura 3-7** se delimitó el tiempo a los días del mes calculado. Hay que hacer notar que en el caso de la precipitación, la velocidad del viento y la anomalía del nivel del mar por tener una resolución espacial de 0.25 de grado, la matriz  $[M_{ij}]$  es una matriz de  $16 \times 20$  que nos da un total de 320 pixeles para la zona meso- $\alpha$  y de  $4 \times 4$  para un total de 16 entradas en la zona meso- $\beta$ . Para el caso de la temperatura superficial del mar cuya resolución espacial como ya se dijo es de 0.011 de grado tenemos una matriz de  $364 \times 455$  para la zona meso- $\alpha$  y de  $91 \times 91$  para la zona meso- $\beta$ , lo que nos da un total de 165 620 entradas para la primera y de 8 281 para la segunda escala.

A partir de estas matrices de datos anuales  $[M_{ij}]$  se calcularon los promedios anuales de cada variable para toda la escala de análisis alrededor de El Palmar, es decir, se calculó la media del valor de los promedios de todos pixeles de la mesoescala que de manera genérica denotaremos por  $\bar{X}(\mathbf{a})$ :

$$\bar{X}(\mathbf{a}) = \frac{\sum_{i,j} M_{ij}}{m}$$

Donde  $\mathbf{a}$  representa el año de estudio,  $i, j$  son índices renglón columna que varían en la suma y  $m = i \times j$  es el número de entradas de la matriz  $[M_{ij}]$  es decir de rejillas en la zona.

Junto con este promedio anual se calculó la varianza  $\sigma^2(\mathbf{a})$  y la desviación típica  $\sigma(\mathbf{a})$  de  $M_{ij}$  usando las definiciones y métodos comunes en estadística considerando cada rejilla de la matriz de promedios anuales como un dato (Cressie & Wikle, 2015; Martinez & Martinez, 2004).

Se construyeron diagramas de caja o boxplots (Tukey, 1977) con los datos obtenidos pudiendo de esta manera observar estadísticos representativos como son la mediana, cuartiles inferior y superior, áreas de concentración de datos, valores extremos y posibles outliers (Martinez & Martinez, 2004). Para hacer esta representación de los datos, se

usaron los valores promedio mensuales de los datos para cada variable, obtenidos estos también de la matriz  $[M_{ij}]$ . Se programó una rutina en Matlab para hacer los cálculos de los estadísticos y desplegar los diagramas de caja.

### 3.3.3 Series de tiempo

De acuerdo a Chatfield (2004) una serie de tiempo es una colección de observaciones ordenadas en el tiempo. Así para conocer la evolución temporal de las variables ambientales consideradas, se obtuvieron series de tiempo para cada variable a lo largo de los años estudiados. Retomando la matriz  $[S_{ij}(t)]$  definida en la sección anterior y sea  $x$  cualquiera de las variables ambientales consideradas, entonces se calculó el promedio diario  $\bar{x}(t)$  en el día  $t$  de cada variable en toda la zona considerada (meso- $\alpha$  o meso- $\beta$ ), donde  $m = i \times j$  es el número de rejillas como se definió anteriormente:

$$\bar{x}(t) = \frac{\sum_{i,j} S_{ij}(t)}{m}$$

Con  $\bar{x}(t)$  se construyó la serie temporal de los 4018 días que considera el estudio y se hizo su representación gráfica mediante Matlab. Se construyeron las series de tiempo para los valores promedio diarios de las variables ambientales.

### 3.3.4 Análisis de cobertura de manglar

De acuerdo al trabajo de Barrera Falcón (2016) solamente se pudieron adquirir imágenes satelitales para siete de los once años que comprende éste. Las imágenes fueron proporcionadas en formato raster<sup>12</sup> por la fuente anterior, consisten en archivos con extensión \*.img de ERDAS (ERDAS IMAGINE File Format (IMG)) que incluyen cuatro tipos de cobertura: Manglar, Otra Vegetación, Suelo Desnudo y Suelo Inundado.

Se completaron los datos de cobertura de los años faltantes haciendo una predicción del comportamiento de las áreas cubiertas por cada clase, es decir, para los años 2005, 2008, 2010 y 2013, para tal efecto, entre cada par de años entre los cuales no hay datos para el año intermedio, se usó el módulo Change Detection Statistics de ENVI<sup>13</sup> para obtener las

---

<sup>12</sup> Datum WGS 1984, proyección UTM Zona 15 Norte, tamaño de pixel de 2.50 m.

<sup>13</sup> Exelis Visual Information Solutions, Inc. 2013

estadísticas de cambio, tal módulo se centra principalmente en los cambios iniciales en la clasificación del estado; es decir, para cada clase de estado inicial, el análisis identifica las clases en las que dichos píxeles cambiaron en la imagen del estado final (“Documentation Center [Harris Geospatial Docs Center]”, s/f), como resultado de este proceso se obtienen la matriz de transición  $[T]$  que resume el cambio de área de cobertura de cada clase entre los dos instantes de tiempo considerados  $t_1$  y  $t_2$  año inicial y año final respectivamente y la matriz de probabilidades de transición  $[P]$  que define la probabilidad de cambio en la cobertura de una clase a otra entre esos mismos  $t_1$  y  $t_2$  (Burnham, 1973). Hay que mencionar que  $[P]$  y  $[T]$  son ambas matrices cuadradas de orden 4 (el número de clases) y que la matriz de probabilidades de transición se deriva de la matriz de transición ya que cada entrada  $[P_{ij}]$  de  $[P]$  se obtiene de  $[T]$  calculando:

$$P_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_i^4 T_{ij}}$$

$P_{ij}$  representa entonces la probabilidad de que la cobertura de la clase  $i$  cambie a cobertura de clase  $j$  en el periodo de tiempo comprendido entre  $t_1$  y  $t_2$ , las entradas en la diagonal  $P_{jj}$  representan la probabilidad de persistencia de la clase  $j$  es decir de que la clase no cambie (Burnham, 1973; Pontius, Shusas, & McEachern, 2004). Para obtener la matriz anualizada de transición  $[P^{\frac{1}{2}}]$  haremos la suposición de que las probabilidades de transición son procesos estocásticos estacionarios y homogéneos en el tiempo, es decir, no cambian a intervalos temporales iguales (Flamenco-Sandoval, Ramos, & Masera, 2007; Jean-Francois Mas et al., 2004), bajo estos términos podemos obtener  $[P^{\frac{1}{2}}]$  calculando la raíz cuadrada de  $[P]$  (Bini, Higham, & Meini, 2005; Smith, 2003), el algoritmo fue implementado en MatLab para obtener las raíces enésimas de matrices cuadradas a través de la herramienta “The Matrix Computation Toolbox for MATLAB” (Higham, 2002).

Para obtener la proyección de la cobertura de cada clase en el año donde no hay datos  $[L^{proy}]$  hacemos:

$$L^{proy} = P^{\frac{1}{2}}L$$

Donde  $L^{proy}$  es el vector columna que representa la cobertura predicho de la clase en el año donde no hay datos,  $L$  es el vector de áreas de cobertura de las cuatro clases en el año inicial  $i$ ,  $P^{\frac{1}{2}}$  es la matriz de probabilidades de que la clase  $i$  cambie a la clase  $j$  en el periodo de un año que estamos calculando (Bell & Hinojosa, 1977) citado por (Jean-



Francois Mas et al., 2004) (Burnham, 1973; Silván-Cárdenas & Wang, 2014). Formamos así el vector [ $L^{proy}$ ] el cual representa las áreas de cobertura de bosque de manglar en el año predicho con los valores obtenidos a través del procesamiento de las imágenes SPOT. La predicción se realizó para los años 2005, 2008, 2010 y 2013 para las cuatro clases de cobertura que incluían los datos originalmente, con estas predicciones.

### 3.3.5 Análisis de correlación

Ya que la normalidad de los datos es un supuesto requerido para muchos procedimientos estadísticos, para cada uno de los conjuntos de datos (cuatro variables ambientales e incrementos en la cobertura de bosque de manglar) se realizó el test de Shapiro-Wilk<sup>14</sup> (S. S. Shapiro, 1965) el cual es válido tanto para muestras pequeñas como para muestras grandes (Royston, 1982), se aplicó la hipótesis nula:

$H_0$ : Los datos son una muestra de una distribución normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$  desconocidas.

Puesto que  $H_0 = 1$  para cada conjunto de datos de variables ambientales, se rechazó la hipótesis nula con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , concluyendo que la precipitación, la temperatura, la anomalía del nivel del mar y la velocidad del viento no están distribuidos normalmente. En el caso de la cobertura de bosque de manglar el test de Shapiro-Wilk arrojó  $H_0 = 0$  por lo que se acepta la hipótesis nula y la distribución normal de los datos.

Una vez demostrado que el conjunto de datos de variables ambientales no tiene una distribución normal se investigó la posible correlación entre ellas y la cobertura de bosque de manglar, haciendo gráficas de dispersión y calculando los coeficientes de correlación de Spearman ( $\rho$ ) entre los promedios anuales de cada una de las variables ambientales y los incrementos en el área de bosque de manglar, esto ya que  $\rho$  es una medida de similaridad entre dos variables y es el más apropiado para datos que no tienen una distribución normal (Davis, 1973, pp. 105–107). Formulamos así las hipótesis nula y alterna:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

---

<sup>14</sup> Llamado estadístico W para normalidad

Usando los promedios anuales para toda la zona de estudio  $\bar{X}(\mathbf{a})$ , se calcularon los coeficientes de correlación para las dos escalas espaciales que incluye el presente trabajo, esto es meso- $\alpha$  y meso- $\beta$ .

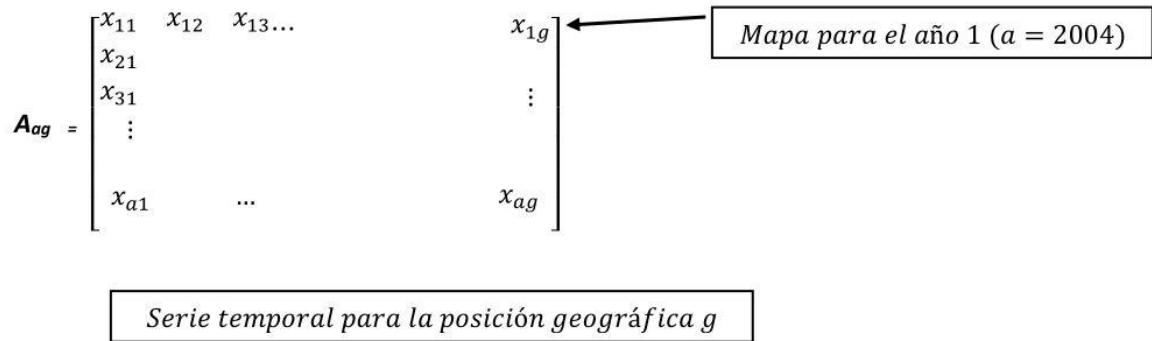
### 3.3.6 Mapas de correlación

Con el objeto de observar el comportamiento de cada rejilla individual de datos a lo largo de los 11 años que abarca el presente estudio y debido a que se observa un comportamiento desigual en la asociación de las variables ambientales con la cobertura de bosque de manglar a las dos escalas espaciales a las que se analizaron los datos, se decidió analizar los valores de cada variable ambiental de forma individual en cada rejilla o pixel de información.

Para realizar este análisis, se consideró la información contenida en cada escala espacial a lo largo de los once años de estudio y se formó una matriz de valores:

$$A_{ag} = [\mathbf{a}] \times [\mathbf{M}_g]$$

En la que cada renglón  $\mathbf{a} = 2004, 2005, \dots, 2014$  representa un año de datos y cada columna  $\mathbf{g} = ij$  representa una posición geográfica determinada correspondiente a cada pixel de la zona de estudio meso- $\alpha$  o meso- $\beta$ , la matriz  $\mathbf{M}_g$  es idéntica a la matriz de datos anuales  $\mathbf{M}_{ij}$  definida previamente, solo que escrita en forma de vector renglón, de esta forma cada entrada de la matriz corresponde a un valor promedio de la variable ambiental definida por las coordenadas geográficas del pixel en el año dado por el índice  $\mathbf{a}$ . Así los promedios anuales para cada pixel son almacenados en la matriz  $[\mathbf{A}]$  en forma de 11 mapas (once años) de  $\mathbf{g}$  localizaciones geográficas (**Figura 3-9**). Podemos interpretar entonces cada una de las  $\mathbf{g}$  columnas de la matriz  $[\mathbf{A}]$  como una serie de tiempo para una determinada ubicación  $\mathbf{g}$  (Björnsson & Venegas, 1997).



**Figura 3-9** Representación de la matriz [A] donde cada renglón representa un año y cada columna una posición geográfica.

A partir de  $A_{ag}$  se calcularon las correlaciones individuales de cada pixel de cada variable ambiental durante los once años del acumulado de la precipitación, la media de la temperatura, la media de la velocidad del viento y de la anomalía del nivel del mar con la cobertura de bosque de manglar y a partir de estas correlaciones nos fue posible generar mapas de correlación para cada variable ambiental e identificar aquellas zonas que tienen una mayor coincidencia en su comportamiento con la cobertura de bosque de manglar.

Se calculó el coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) entre cada columna de  $[A]$  y el vector  $D$  que creamos con los incrementos en la cobertura de bosque de manglar para cada año y se asignó este coeficiente como valor del pixel en la ubicación  $g$  por lo que se formaron las nuevas matrices:

$$C_{ij}$$

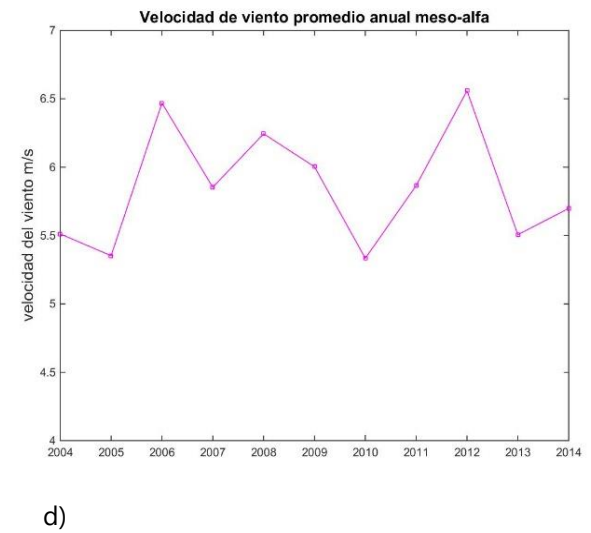
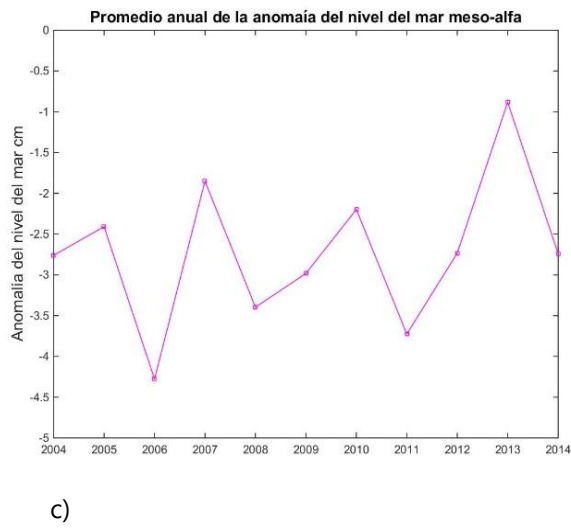
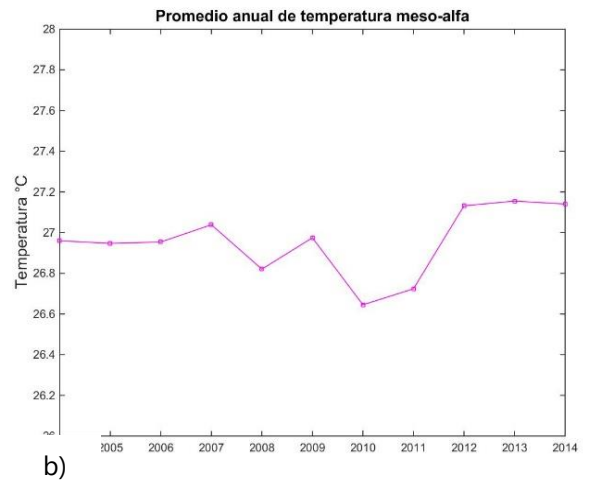
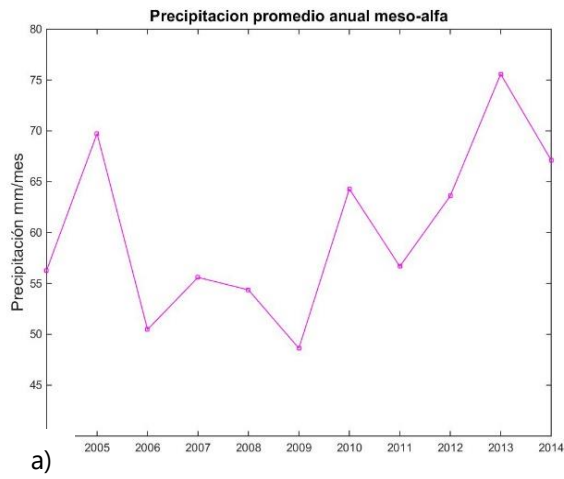
Una para cada variable ambiental a ambas escalas, cuyas entradas son el coeficiente de correlación  $\rho$  y los renglones  $i$  representan la latitud y las columnas  $j$  la longitud por lo que fue posible crear mapas de correlación entre las variables ambientales y la cobertura de bosque de manglar. Dichos mapas, representan por tanto una matriz de correlación entre la serie de tiempo de las medias anuales de cada variable a cada escala ( $[A]$ ) y los incrementos del área de manglar ( $D$ ) para cada rejilla  $ij$ .

## 4 RESULTADOS

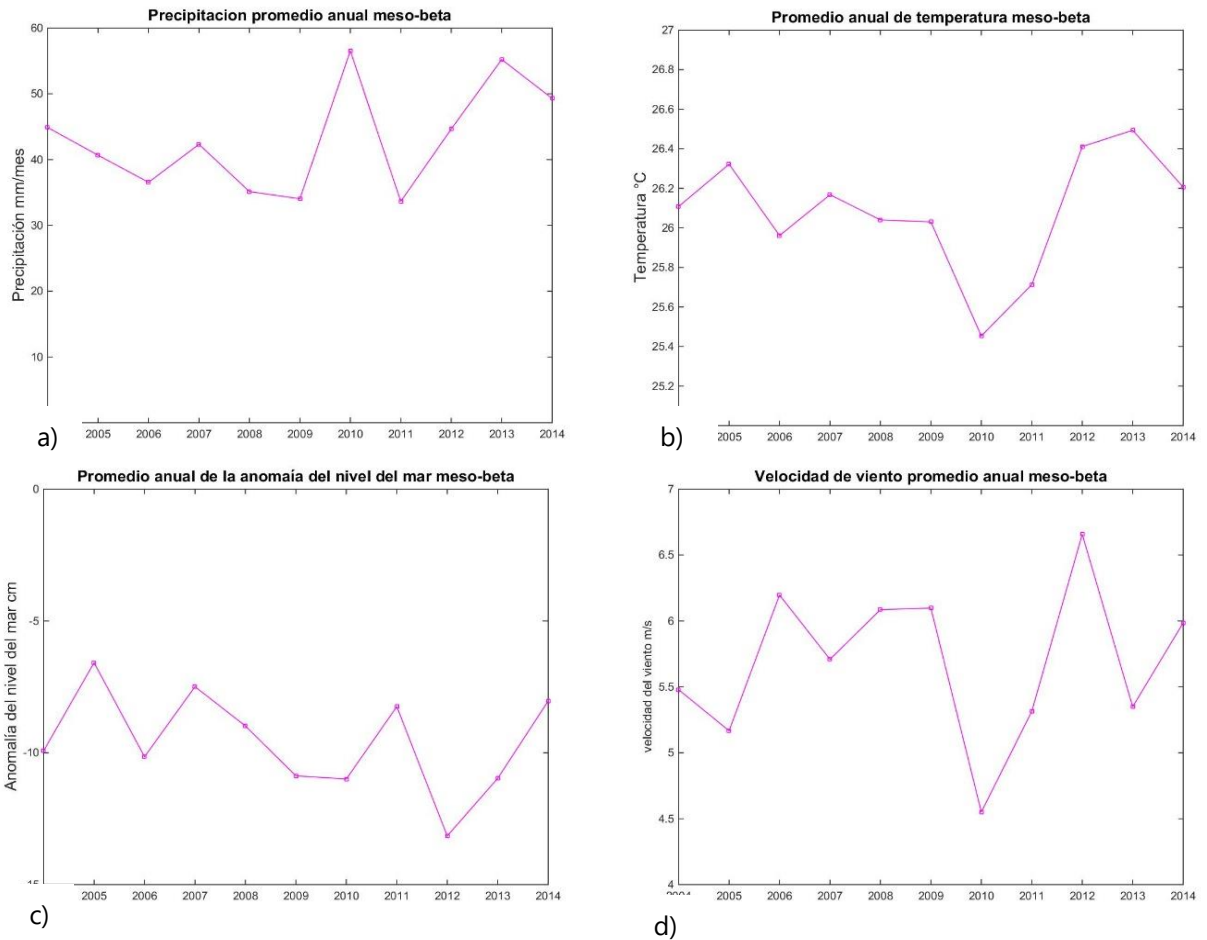
### 4.1 Datos históricos de sensores remotos

Como resultado del análisis de los datos correspondientes a variables ambientales se obtuvieron tablas de distribución de los promedios anuales de las cuatro variables consideradas para cada una de las escalas espaciales a las que se realizó el estudio.

En la **Figura 4-1** podemos observar el comportamiento anual para cada variable ambiental en la escala meso- $\alpha$ . Para la zona meso- $\beta$  podemos observar los promedios anuales calculados para cada una de las variables en la **Figura 4-2**.

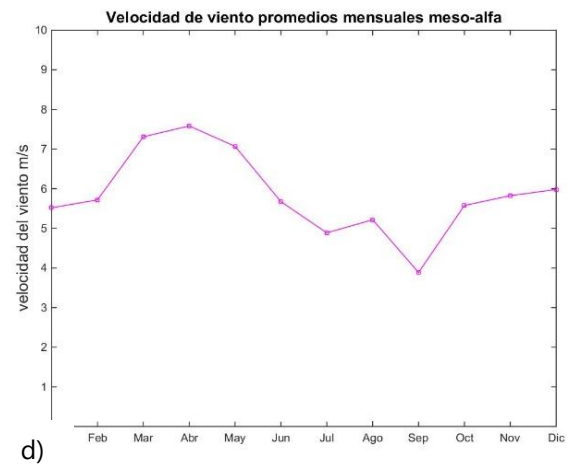
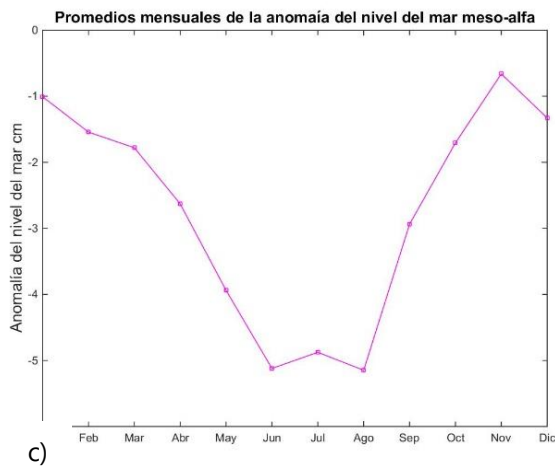
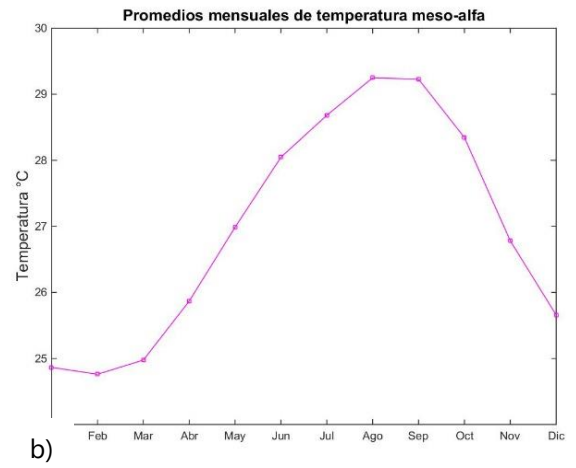
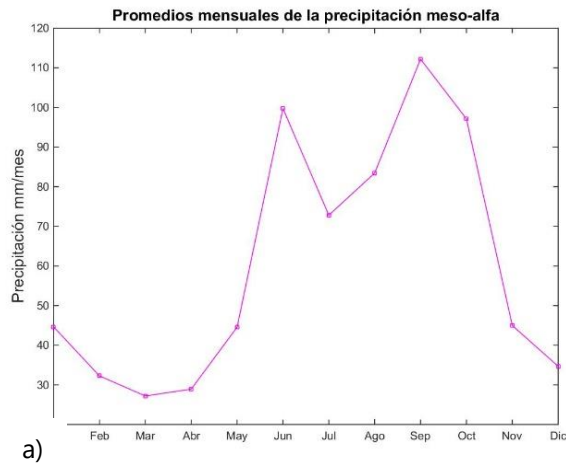


**Figura 4-1** Promedio anual de las variables ambientales a escala meso- $\alpha$  a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalia del nivel del mar y d) Velocidad del viento.

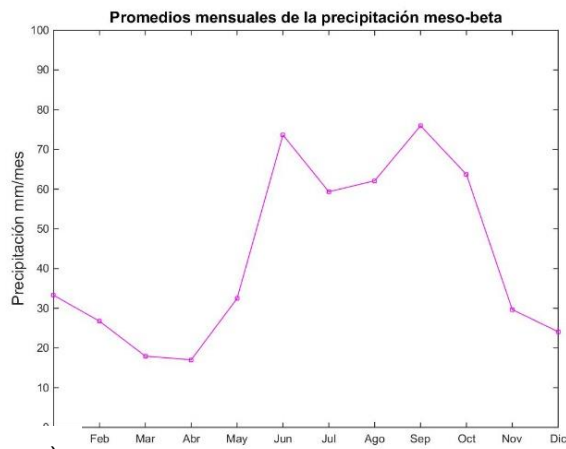


**Figura 4-2** Promedio anual de las variables ambientales a escala meso- $\beta$  a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) Velocidad del viento.

Se obtuvieron también las medias mensuales de las variables ambientales para todos los años de estudio, a través de las cuales podemos apreciar su comportamiento a lo largo de cada mes del año. Los promedios obtenidos para la escala meso- $\alpha$  son mostrados en la **Figura 4-3**, al comparar los gráficos con los obtenidos en la zona meso- $\beta$  de la **Figura 4-4** podemos ver que su comportamiento es cualitativamente muy similar a ambas escalas.



**Figura 4-3** Promedios mensuales a escala meso- $\alpha$  a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) Velocidad del viento.



a)



b)



c)



d)

**Figura 4-4** Promedios mensuales a escala meso-β a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalia del nivel del mar y d) Velocidad del viento.

Los promedios anuales, la varianza y la desviación estándar calculadas se muestran concentradas en las siguientes tablas de datos (**Tabla 4-1**, **Tabla 4-2**, **Tabla 4-3** y **Tabla 4-4**):



**Tabla 4-1** Precipitación acumulada anual, media diaria, varianza diaria y desviación estándar diaria a escala a) meso- $\alpha$  y b) meso- $\beta$ .

Precipitación zona de estudio meso- $\alpha$					Precipitación zona de estudio meso- $\beta$				
año	Acumulado anual (mm)	Media diaria	$\sigma^2$	$\sigma$	año	Acumulado anual (mm)	Media diaria	$\sigma^2$	$\sigma$
2004	675.47	1.85	11.34	3.37	2004	538.61	1.47	13.21	3.63
2005	836.84	2.29	19.58	4.43	2005	487.98	1.34	7.77	2.79
2006	605.72	1.66	6.21	2.49	2006	438.58	1.20	6.37	2.52
2007	667.24	1.83	9.02	3.00	2007	507.85	1.39	9.85	3.14
2008	652.46	1.78	9.62	3.10	2008	421.70	1.15	8.07	2.84
2009	583.60	1.60	8.79	2.96	2009	408.54	1.12	8.64	2.94
2010	771.55	2.11	11.09	3.33	2010	678.36	1.86	14.19	3.77
2011	680.13	1.86	19.51	4.42	2011	403.76	1.11	12.05	3.47
2012	763.22	2.09	11.77	3.43	2012	535.75	1.48	10.37	3.22
2013	906.98	2.48	12.48	3.53	2013	662.61	1.82	16.69	4.09
2014	805.49	2.21	16.80	4.10	2014	591.57	1.62	18.86	4.34

a) b)

**Tabla 4-2** Temperatura promedio anual, varianza y desviación estándar anual a escala a) meso- $\alpha$  y b) meso- $\beta$ .

Temperatura zona de estudio meso- $\alpha$				Temperatura zona de estudio meso- $\beta$			
año	Media anual (°C)	$\sigma^2$	$\sigma$	año	Media anual (°C)	$\sigma^2$	$\sigma$
2004	26.83	3.48	1.86	2004	25.93	3.90	1.97
2005	26.84	3.58	1.89	2005	26.23	3.94	1.99
2006	26.86	3.18	1.78	2006	25.83	2.80	1.67
2007	26.93	2.77	1.67	2007	26.02	1.95	1.40
2008	26.70	2.70	1.64	2008	25.90	2.49	1.58
2009	26.88	4.04	2.01	2009	25.90	3.16	1.78
2010	26.52	4.66	2.16	2010	25.39	4.39	2.10
2011	26.59	3.83	1.96	2011	25.57	3.28	1.81
2012	27.04	2.80	1.67	2012	26.24	2.45	1.57
2013	27.02	2.79	1.67	2013	26.34	2.46	1.57
2014	27.04	2.55	1.60	2014	26.10	1.90	1.38

a) b)

**Tabla 4-3** Promedio anual de la anomalía del nivel del mar, varianza y desviación estándar anual a escala a) meso- $\alpha$  y b) meso- $\beta$ .

<b>Anomalía del nivel del mar zona de estudio meso-<math>\alpha</math></b>			
<b>año</b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>anual (cm)</b>			
2004	-2.79	3.78	1.94
2005	-2.43	3.33	1.82
2006	-4.20	2.65	1.63
2007	-1.89	2.20	1.48
2008	-3.34	5.13	2.26
2009	-3.10	5.65	2.38
2010	-2.30	5.52	2.35
2011	-3.64	5.14	2.27
2012	-2.87	5.71	2.39
2013	-1.10	9.29	3.05
2014	-2.65	9.42	3.07

a)

<b>Anomalía del nivel del mar zona de estudio meso-<math>\beta</math></b>			
<b>año</b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>anual (cm)</b>			
2004	-9.83	1.84	1.36
2005	-6.71	2.12	1.46
2006	-10.10	1.66	1.29
2007	-7.74	4.09	2.02
2008	-8.96	2.21	1.49
2009	-10.76	1.95	1.40
2010	-10.99	2.47	1.57
2011	-8.12	3.14	1.77
2012	-13.03	7.16	2.68
2013	-10.80	5.95	2.44
2014	-8.14	7.49	2.74

b)

**Tabla 4-4** Promedio anual de la velocidad del viento, varianza y desviación estándar anual a escala a) meso- $\alpha$  y b) meso- $\beta$ .

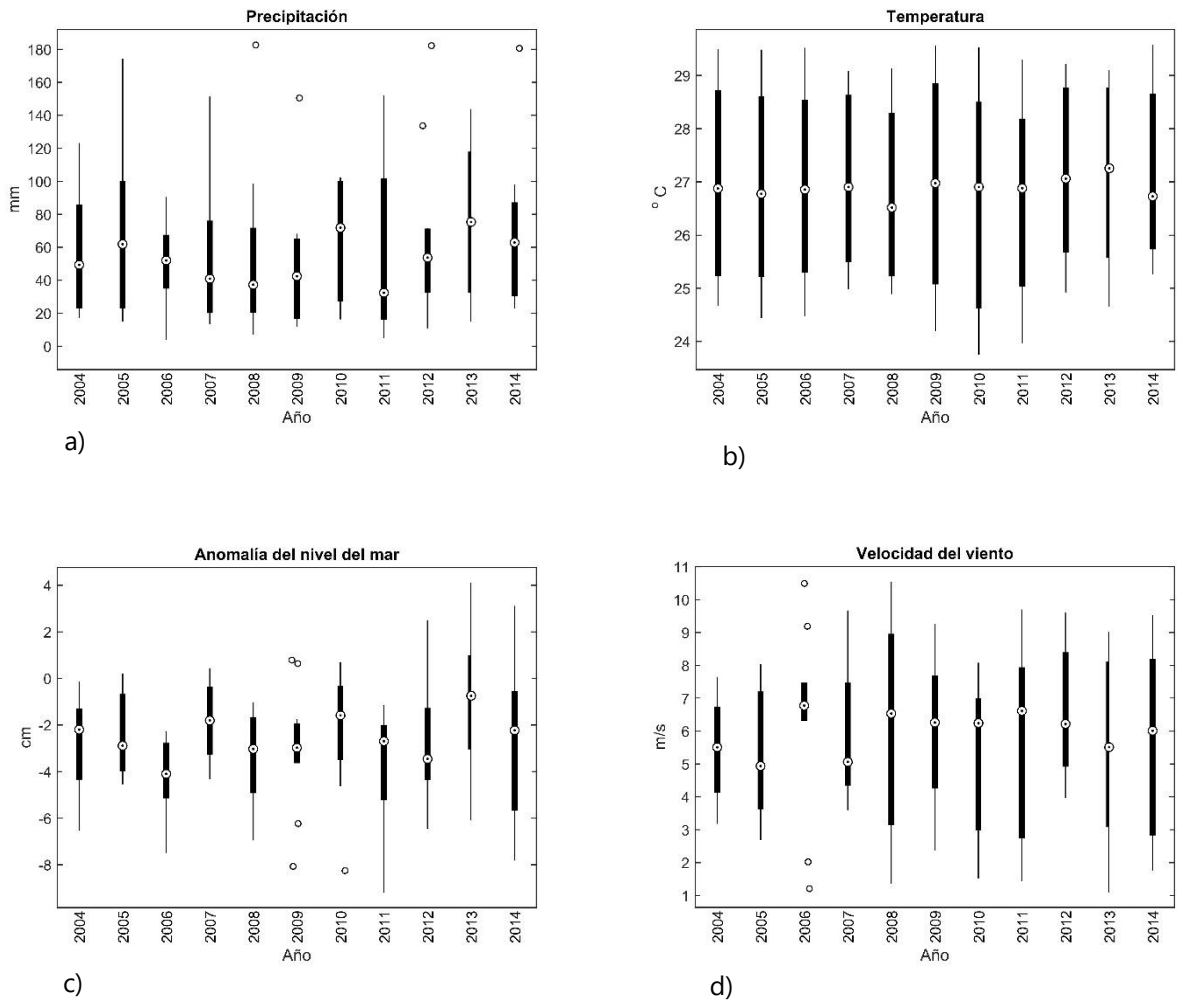
<b>Velocidad del viento zona de estudio meso-<math>\alpha</math></b>			
<b>año</b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>anual (m/s)</b>			
2004	6.73	0.69	0.83
2005	6.54	0.95	0.97
2006	6.51	1.07	1.03
2007	6.70	0.59	0.77
2008	6.69	1.13	1.06
2009	6.66	1.65	1.28
2010	6.85	0.53	0.73
2011	6.54	1.61	1.27
2012	6.36	0.70	0.83
2013	6.81	1.11	1.06
2014	6.56	1.35	1.16

a)

<b>Velocidad del viento zona de estudio meso-<math>\beta</math></b>			
<b>año</b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>anual (m/s)</b>			
2004	6.86	1.01	1.00
2005	6.63	0.64	0.80
2006	6.90	0.87	0.93
2007	6.91	0.30	0.54
2008	7.15	1.13	1.06
2009	7.08	0.99	1.00
2010	6.97	0.18	0.43
2011	6.86	1.14	1.07
2012	6.78	0.67	0.82
2013	7.10	0.63	0.80
2014	6.99	1.15	1.07

b)

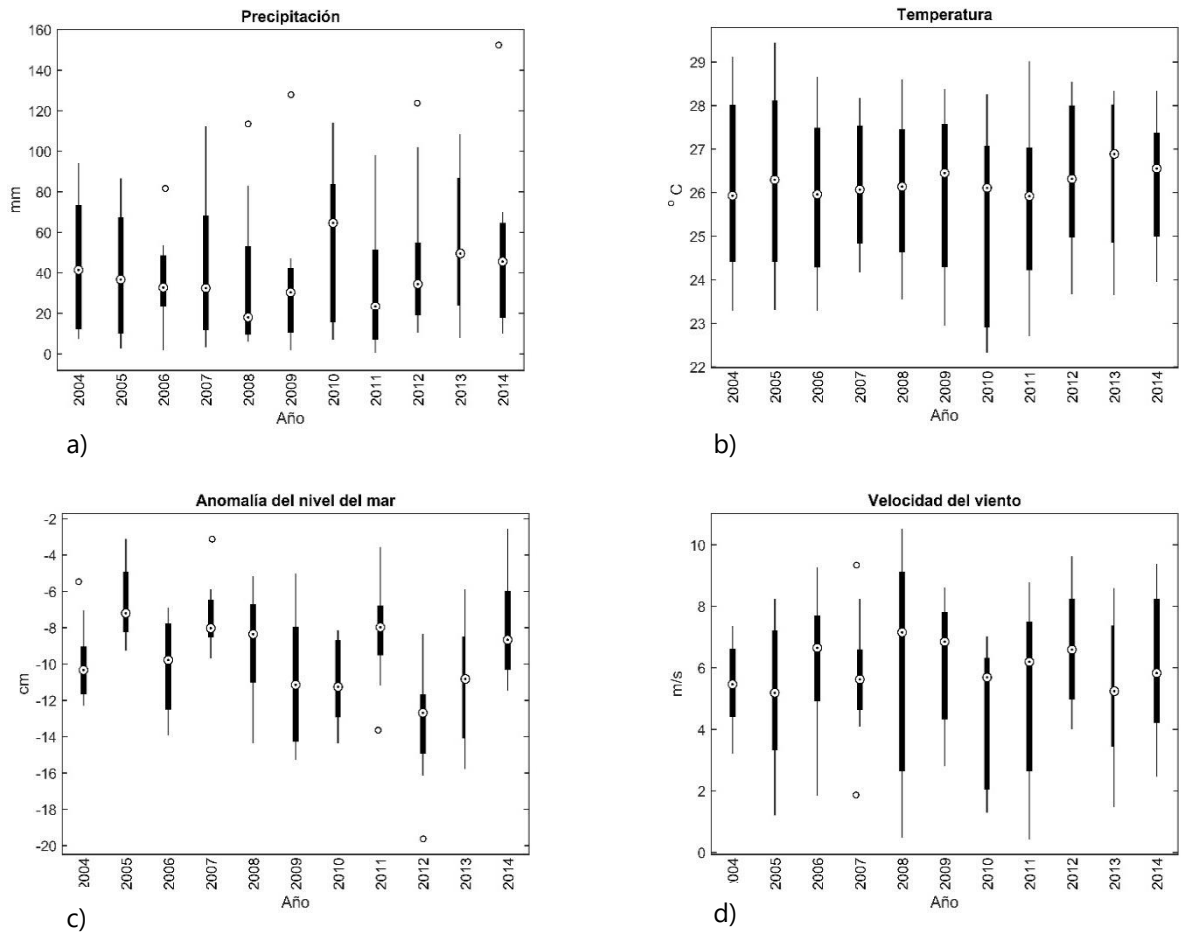
La variación temporal de cada característica medioambiental considerada la podemos observar en los siguientes diagramas los cuales se han organizado de acuerdo a la escala espacial usada, meso- $\alpha$  en la **Figura 4-5** y meso- $\beta$  en la **Figura 4-6**.



**Figura 4-5** Diagramas de caja para los datos a escala meso-alfa, a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y c) Velocidad del viento.

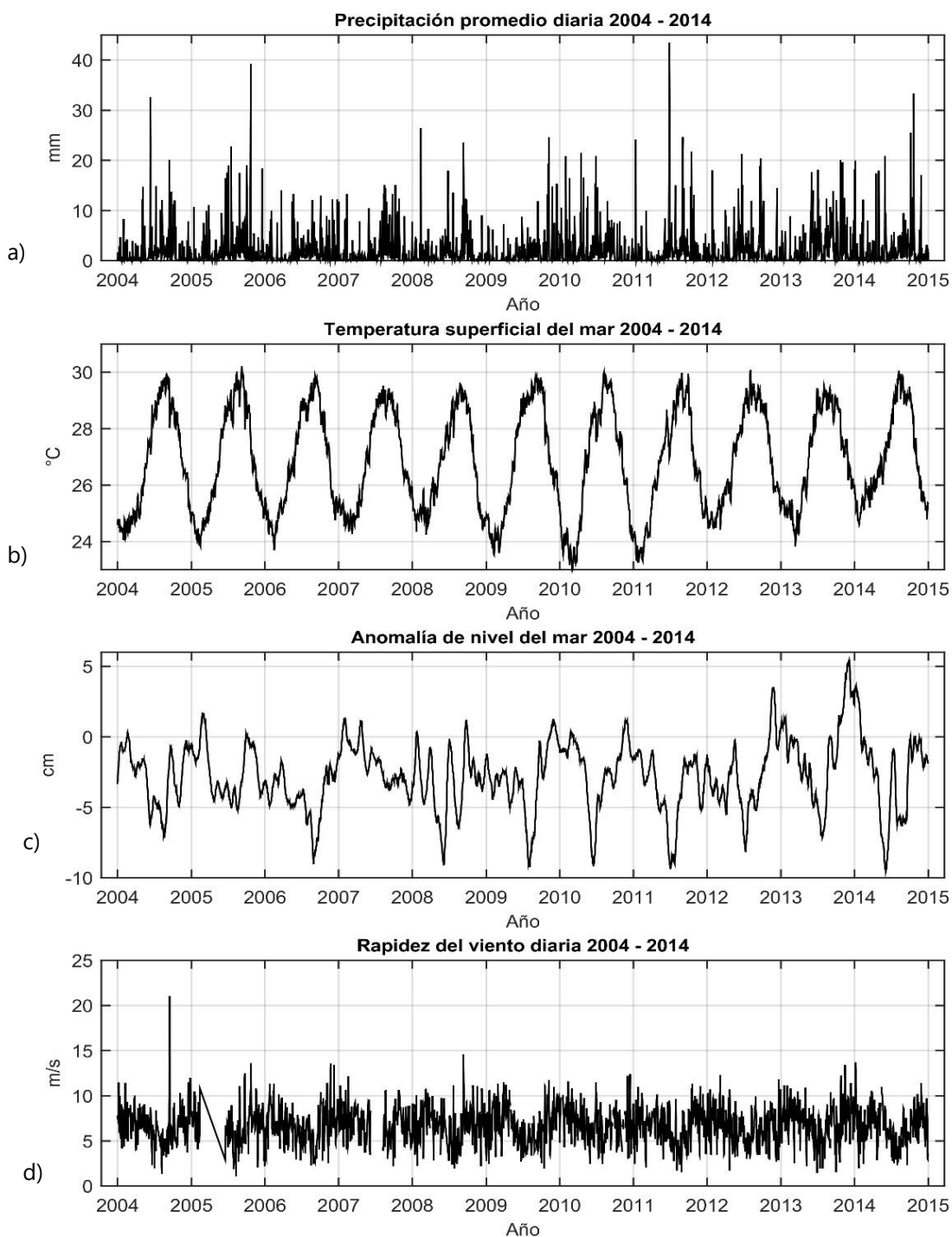
Para la zona meso- $\alpha$  podemos observar algunos valores atípicos y una distribución muy cambiante de los acumulados de la precipitación anual. La temperatura muestra una distribución muy suave y sin valores atípicos. Para la anomalía del nivel del mar lo interesante resulta observar la distribución muy concentrada de los datos para el año 2009 y 2006 respectivamente.

En los diagramas de caja para la zona meso- $\beta$  (**Figura 4-6**) podemos ver que el comportamiento de las variables ambientales es a la vista muy diferente con respecto a la meso- $\alpha$ , la media del acumulado de la precipitación es más bajo a esta escala, la temperatura promedio y la anomalía del nivel del mar también presentan promedios por debajo de los obtenidos en meso- $\alpha$ .



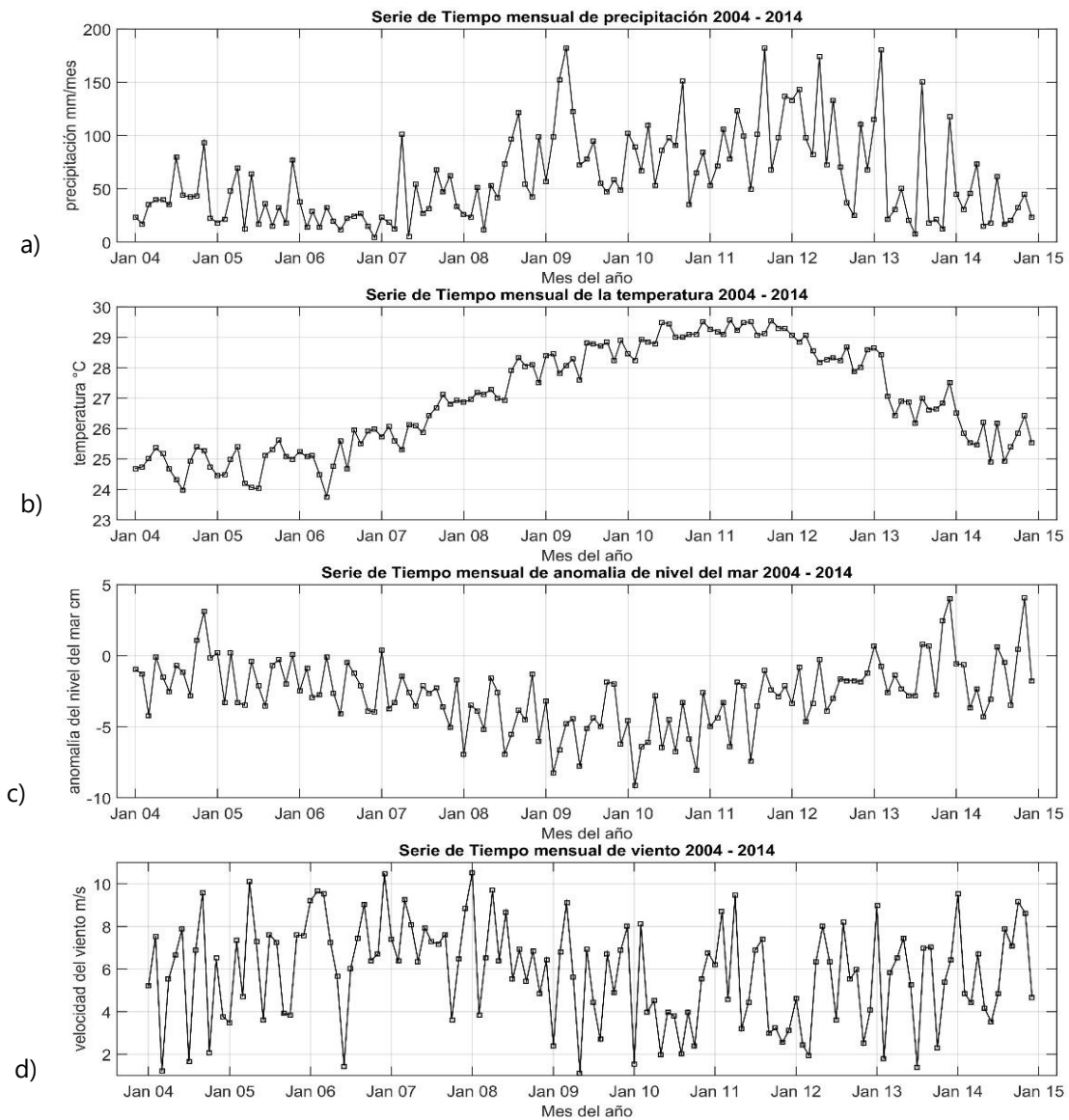
**Figura 4-6** Diagramas de caja para los datos a escala meso-beta, a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y c) Velocidad del viento.

A continuación se presentan las series de tiempo diarias para la zona meso- $\alpha$  (**Figura 4-7**).



**Figura 4-7** Series de tiempo diarias de las variables ambientales a escala meso- $\alpha$  a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) velocidad del viento.

A partir de  $\bar{x}(t)$  se calcularon los promedios mensuales y se construyeron series de tiempo mensuales (**Figura 4-8**). A partir del análisis de las gráficas de las series de tiempo diarias y mensuales es posible notar en las primeras un marcado comportamiento estacional, mientras que para de periodo mensual podemos ver que hay tendencias anuales que no son perceptibles estudiando gráficos con datos diarios.



**Figura 4-8** Series de tiempo mensuales de las variables ambientales a escala meso- $\alpha$  a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) velocidad del viento.

## 4.2 Cobertura de bosque de manglar

En las siguientes tablas se muestran los resultados de calcular la matriz de transición [**T**] y la matriz de probabilidades [**P**] para los años donde no se obtuvieron imágenes SPOT (Tablas 4-5 a 4-12). Hacemos hincapié en que [**P**] viene expresada en porcentajes en el archivo de salida del proceso y para calcular  $P^{\frac{1}{2}}$  primeramente se escribió en forma decimal cada entrada [**P**].

**Tabla 4-5** Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2004 a 2006.

	2004				Row	Class
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Total	Total
<b>2006</b>						
Manglar	81.635	26.443	2.377	10.9	99.803	100
Otra Vegetación	3.615	66.891	0.037	0.774	99.741	100
Suelo Desnudo	0	0	0	0	0	0
Zona Inundada	14.75	6.666	97.586	88.326	99.885	100
Class Total	100	100	100	100	0	0
Class Changes	18.365	33.109	100	11.674	0	0
Image Difference	0.67	-11.942	-100	54.298	0	0

**Tabla 4-6** Matriz de cambio de cobertura para los años 2004 a 2006 (en metros cuadrados).

<b>2004</b>						
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Row Total	Class Total
<b>2006</b>						
Manglar	28153037.5	1949812.5	464268.75	4081837.5	34648956.3	34717381.3
Otra Vegetación	1246681.25	4932350	7231.25	290025	6476287.5	6493118.75
Suelo Desnudo	0	0	0	0	0	0
Zona Inundada	5086768.75	491537.5	19060887.5	33076512.5	57715706.3	57781937.5
Class Total	34486487.5	7373700	19532387.5	37448375	0	0
Class Changes	6333450	2441350	19532387.5	4371862.5	0	0
Image Difference	230893.75	-880581.25	-19532387.5	20333562.5	0	0

**Tabla 4-7** Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2007 a 2009.

<b>2007</b>						
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Row Total	Class Total
<b>2009</b>						
Manglar	88.202	20.238	12.98	11.902	99.908	100
Otra Vegetación	7.739	79.147	4.595	0.847	99.85	100
Suelo Desnudo	0.422	0.191	68.779	35.602	99.961	100
Zona Inundada	3.637	0.424	13.647	51.648	99.935	100
Class Total	100	100	100	100	0	0
Class Changes	11.798	20.853	31.221	48.352	0	0
Image Difference	9.191	50.214	73.089	-40.215	0	0



**Tabla 4-8** Matriz de cambio de cobertura para los años 2007 a 2009 (en metros cuadrados).

	<b>2007</b>						
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Row Total	Class Total	
<b>2009</b>							
Manglar	33283306.3	1121243.75	1850256.25	4911150	41165956.3	41203687.5	
Otra Vegetación	2920362.5	4385018.75	654956.25	349568.75	8309906.25	8322350	
Suelo Desnudo	159256.25	10600	9804543.75	14689968.8	24664368.8	24674018.8	
Zona Inundada	1372581.25	23481.25	1945368.75	21310950	24652381.3	24668475	
Class Total	37735506.3	5540343.75	14255125	41261637.5	0	0	
Class Changes	4452200	1155325	4450581.25	19950687.5	0	0	
Image Difference	3468181.25	2782006.25	10418893.8	-16593162.5	0	0	

**Tabla 4-9** Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2009 a 2011.

	<b>2009</b>						
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Row Total	Class Total	
<b>2011</b>							
Manglar	84.076	18.621	2.885	4.793	99.937	100	
Otra Vegetación	1.364	66.932	0.107	0.076	99.933	100	
Suelo Desnudo	1.393	3.77	63.79	37.643	99.932	100	
Zona Inundada	13.167	10.677	33.219	57.488	99.959	100	
Class Total	100	100	100	100	0	0	
Class Changes	15.924	33.068	36.21	42.512	0	0	
Image Difference	-7.51	-25.721	5.088	16.358	0	0	

**Tabla 4-10** Matriz de cambio de cobertura para los años 2009 a 2011 (en metros cuadrados).

	<b>2009</b>					
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Row Total	Class Total
<b>2011</b>						
Manglar	34617793.8	1547518.75	711418.75	1181518.75	38058250	38082075
Otra Vegetación	561543.75	5562456.25	26293.75	18675	6168968.75	6173112.5
Suelo Desnudo	573593.75	313325	15730681.3	9279793.75	25897393.8	25914931.3
Zona Inundada	5421375	887368.75	8191875	14171825	28672443.8	28684318.8
Class Total	41174306.3	8310668.75	24660268.8	24651812.5	0	0
Class Changes	6556512.5	2748212.5	8929587.5	10479987.5	0	0
Image Difference	-3092231.25	-2137556.25	1254662.5	4032506.25	0	0

**Tabla 4-11** Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2012 a 2014.

	<b>2012</b>					
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Row Total	Class Total
<b>2014</b>						
Manglar	94.244	17.166	0.795	20.776	99.943	100
Otra Vegetación	0.519	70.396	0	0.241	99.935	100
Suelo Desnudo	0.292	0.163	6.482	6.952	99.937	100
Zona Inundada	4.945	12.275	92.723	72.031	99.946	100
Class Total	100	100	100	100	0	0
Class Changes	5.756	29.604	93.518	27.969	0	0
Image Difference	12.702	-25.866	-82.149	42.713	0	0

**Tabla 4-12** Matriz de cambio de cobertura para los años 2012 a 2014 (en metros cuadrados).

	2012				Row	Class
	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada	Total	Total
<b>2014</b>						
Manglar	39380656.3	1343256.25	154337.5	6188368.75	47066618.8	47093687.5
Otra Vegetación	216881.25	5508537.5	0	71856.25	5797275	5801018.75
Suelo Desnudo	121893.75	12731.25	1258562.5	2070618.75	3463806.25	3465987.5
Zona Inundada	2066487.5	960518.75	18003356.3	21455075	42485437.5	42508512.5
Class Total	41785918.8	7825043.75	19416256.3	29785918.8	0	0
Class Changes	2405262.5	2316506.25	18157693.8	8330843.75	0	0
Image Difference	5307768.75	-2024025	-15950268.8	12722593.8	0	0

Una vez calculadas todas las proyecciones de cobertura de bosque de manglar se formó el vector columna [**D**] que contiene los incrementos de las áreas de manglar para cada año. Derivado del análisis y proceso de los datos realizados a la cobertura de bosque de manglar y el resto de las clases de cobertura contenidas en capas de información en formato raster, se obtuvieron las predicciones del área de cobertura para los años donde no existe imagen SPOT con lo que se completaron las coberturas para los once años en las cuatro clases en las que venía originalmente clasificada esta información, se organizaron en la **Tabla 4-13** quedando de la siguiente forma:

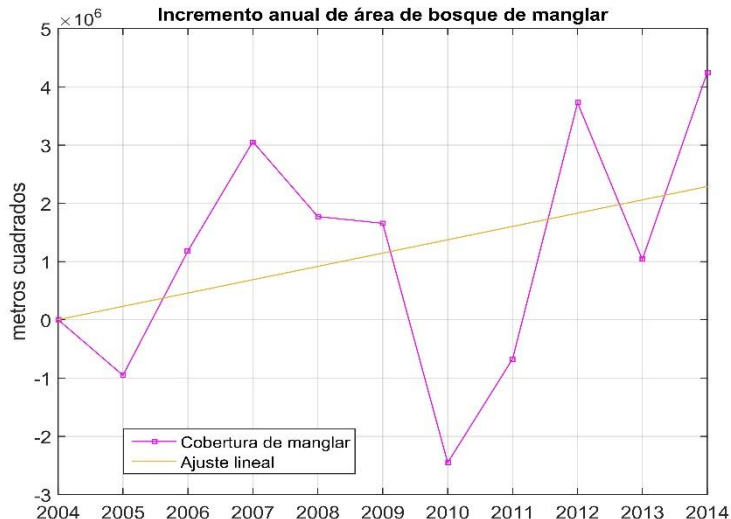
**Tabla 4-13** Áreas de cobertura calculadas (en metros cuadrados).

Año	Manglar	Otra Vegetación	Suelo Desnudo	Zona Inundada
2004	34486800	7373968.8	19533006	37449344
2005	33535177	6812792	6.98E-09	58495150
2006	34717381	6493118.8	0	57781938
2007	37775513	5544462.5	14274731	41282863
2008	39548454	6879482.3	21313745	31135698
2009	41203688	8322350	24674019	24668475
2010	38751028	7662896.2	6.64E-09	52454608
2011	38082075	6173112.5	25914931	28684319
2012	41809256	7833350	19421656	29823725
2013	42844573	6708496.7	4095260.1	45239658
2014	47093688	5801018.8	3465987.5	42508513

Los renglones sombreados son los valores calculados estadísticamente, además se obtuvieron los incrementos de las áreas de cobertura de bosque de manglar (el vector  $[D]$ ), los cuales se resumen en la **Tabla 4-14** y **Figura 4-9**.

**Tabla 4-14** Incremento y disminución de cobertura de bosque de manglar.

Año	Incremento de áreas (m <sup>2</sup> )
2004	0
2005	-951622.9538
2006	1182204.204
2007	3058131.250
2008	1772941.500
2009	1655233.500
2010	-2452659.975
2011	-668952.525
2012	3727181.250
2013	1035316.607
2014	4249114.643



**Figura 4-9** Incremento de la cobertura de bosque de manglar.

### 4.3 Correlación entre variables ambientales y superficie de manglar

En la **Tabla 4-15** se muestran los coeficientes de correlación de Spearman entre cada variable ambiental y el incremento en área de manglar, tanto para la zona meso- $\alpha$  como para la zona meso- $\beta$ , en ella se muestra que en la escala meso- $\alpha$  las únicas variables ambientales que correlaciona con el incremento de área de manglar tomando un nivel de significancia estadística  $\alpha = 0.05$  son la temperatura ( $\rho = 0.75$ ,  $p - value = 0.01$ ) y la velocidad del viento ( $\rho = 0.78$ ,  $p - value = 0.007$ ) por lo que se rechaza la hipótesis nula planteada en la sección 3.3.5 para ambas variables:

$$H_0: \rho = 0$$

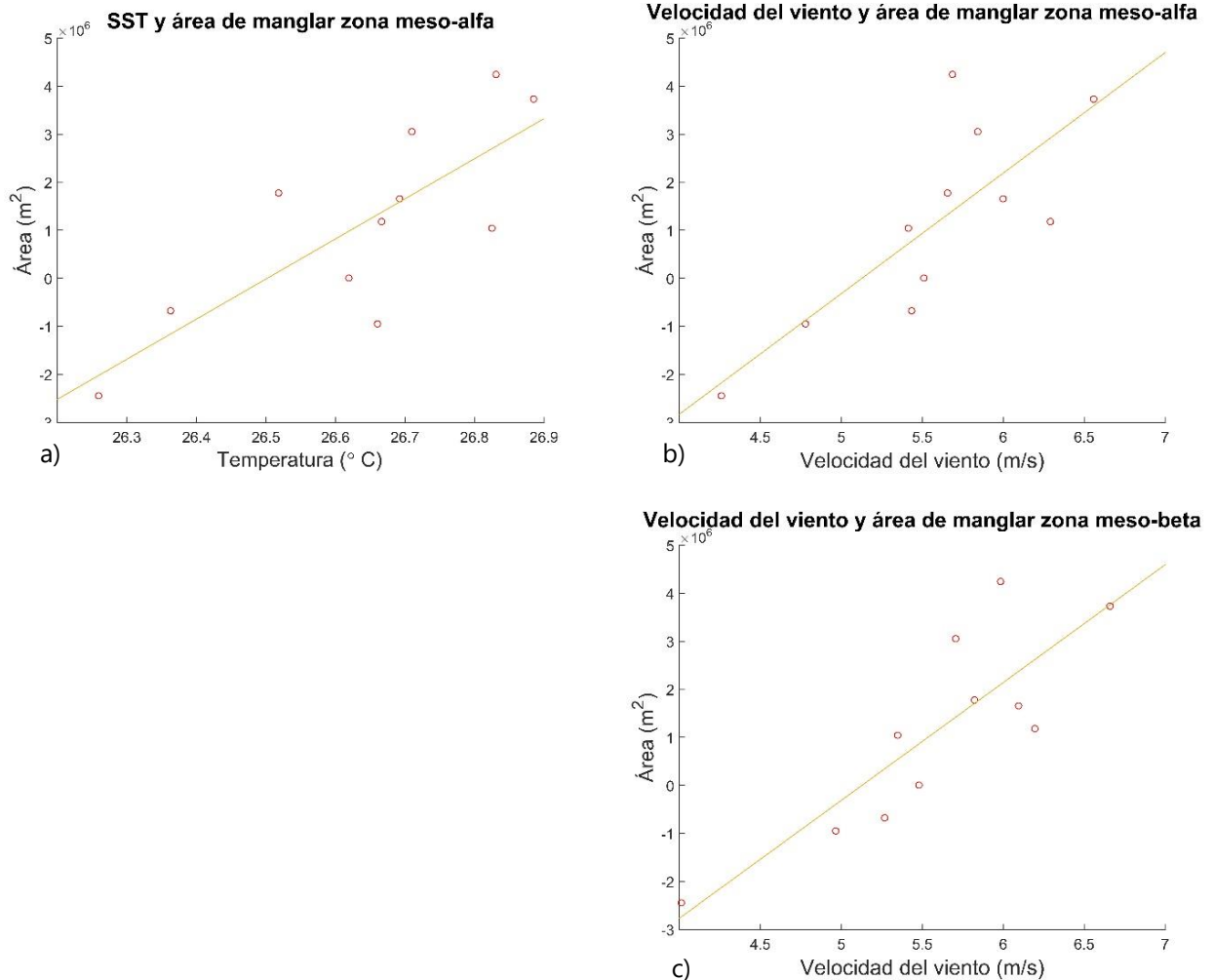
Se concluye entonces que en esta escala se encuentra una correlación entre la temperatura y la velocidad del viento con la cobertura de bosque de manglar.

En el análisis realizado a escala meso- $\beta$  por otra parte, se encuentra que la única variable que tiene cierto grado de asociación con la cobertura de bosque de manglar es la velocidad del viento en la que  $\rho = 0.809$  y  $p - value = 0.004$  para una significancia estadística de  $\alpha = 0.05$ , lo cual indica que existe una correlación entre esta variable y la cobertura de manglar, por lo tanto rechazamos la hipótesis nula.

**Tabla 4-15** Coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) y significancia estadística  $p$ -value entre las variables ambientales y la cobertura de bosque de manglar.

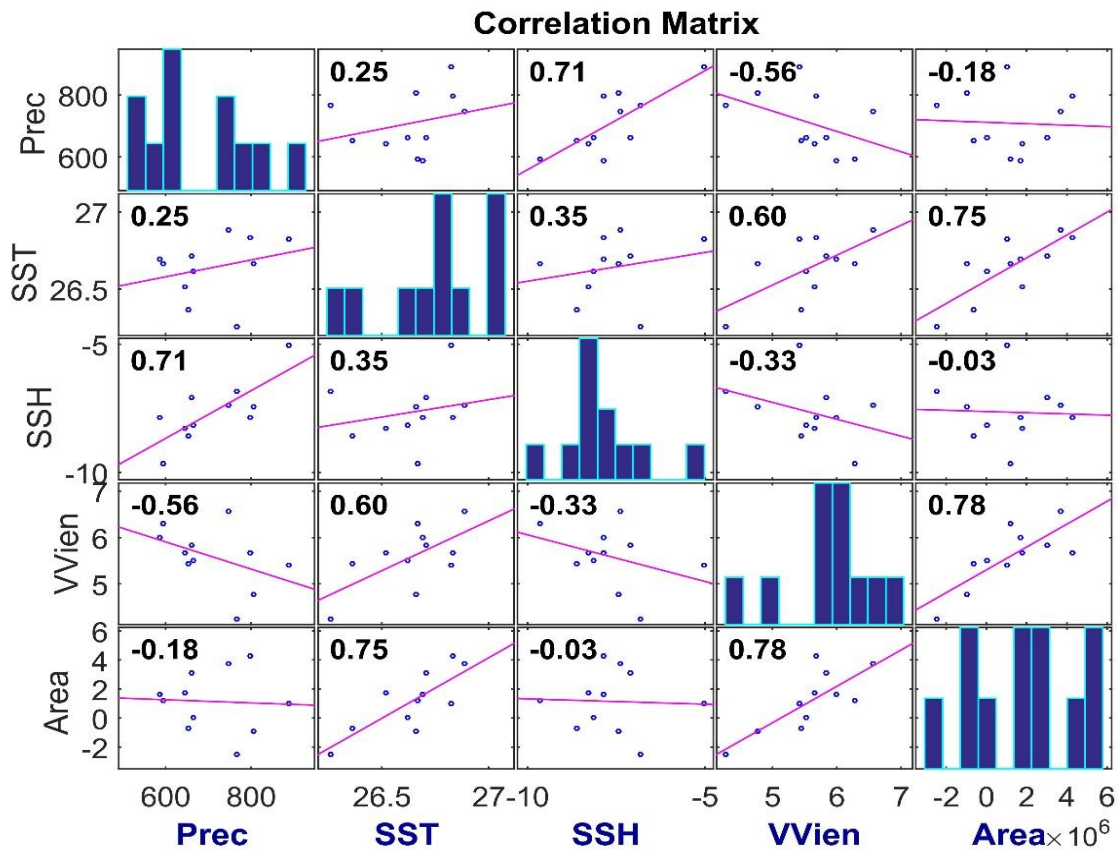
Variable ambiental	Zona meso- $\alpha$		Zona meso- $\beta$	
	$\rho$	$p$ -value	$\rho$	$p$ -value
Precipitación	-0.181818181818182	0.595218717985880	-0.0363636363636364	0.924426257832482
Temperatura	0.754545454545455	0.0104817749990729	0.409090909090909	0.213864224336727
Anomalía del nivel del mar	-0.0272727272727273	0.945983670156841	-0.0727272727272727	0.838824934838710
Velocidad del viento	0.781818181818182	0.00701211291358370	0.809090909090909	0.00442801687615526

Mediante los siguientes diagramas de dispersión se muestra de forma gráfica la relación con la cobertura de bosque de manglar de aquellas variables que tienen una correlación estadísticamente significativa. (**Figura 4-10**)



**Figura 4-10** Diagramas de dispersión de variables ambientales con cobertura de bosque de manglar estadísticamente significativos. a) Temperatura superficial del mar (SST) a escala meso- $\alpha$  ( $\rho = 0.75$ ), b) Velocidad del viento a escala meso- $\alpha$  ( $\rho = 0.78$ ), c) Velocidad del viento a escala meso- $\beta$  ( $\rho = 0.809$ ).

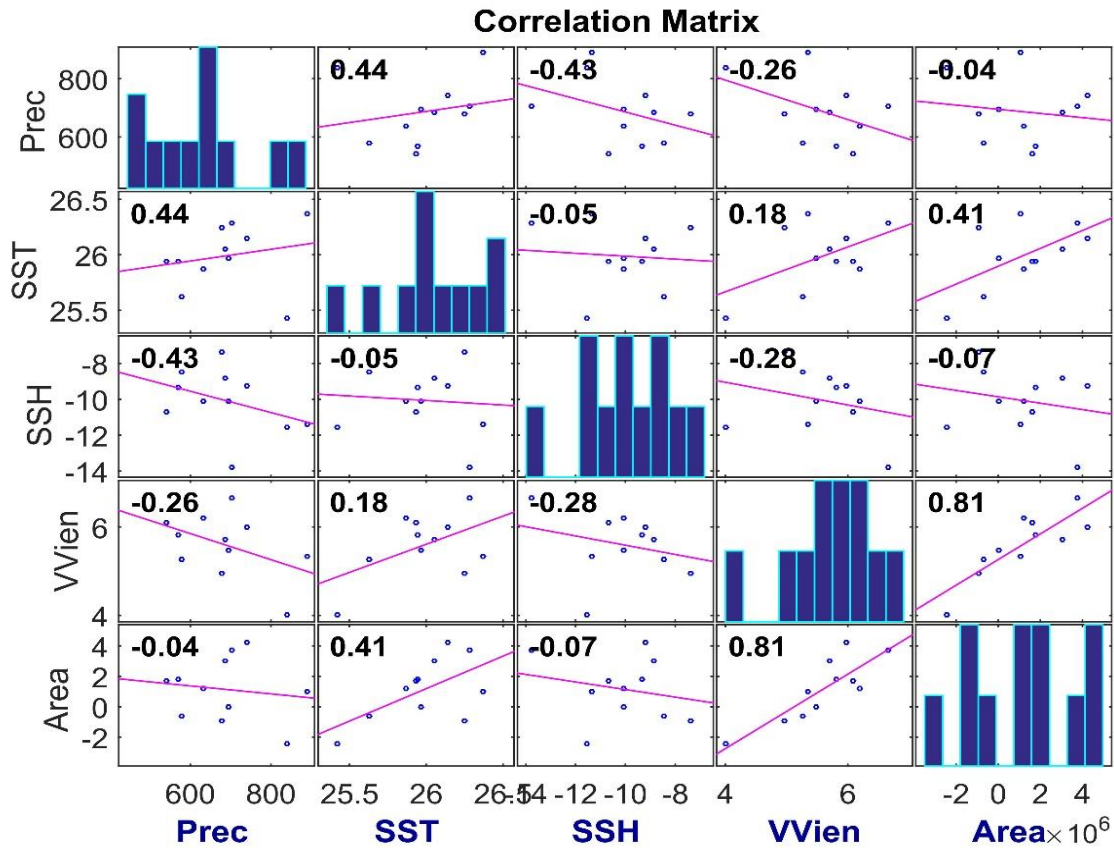
También se obtuvo la matriz de correlaciones de todas las variables involucradas, tanto ambientales como de cobertura de bosque de manglar, el resumen para la zona meso- $\alpha$  se observa en la **Figura 4-11**.



**Figura 4-11** Matriz de correlaciones entre cada una de las variables incluyendo la cobertura de bosque de manglar para la escala meso- $\alpha$ .

En esta matriz de correlaciones observamos además de las correlaciones ya mencionadas que existe una alta correlación  $\rho = 0.71$  entre la precipitación y la anomalía del nivel del mar.

La correspondiente matriz de correlaciones a escala meso- $\beta$  la podemos observar en la **Figura 4-12**, en la cual nuevamente observamos la alta correlación de la velocidad del viento y el área de manglar.



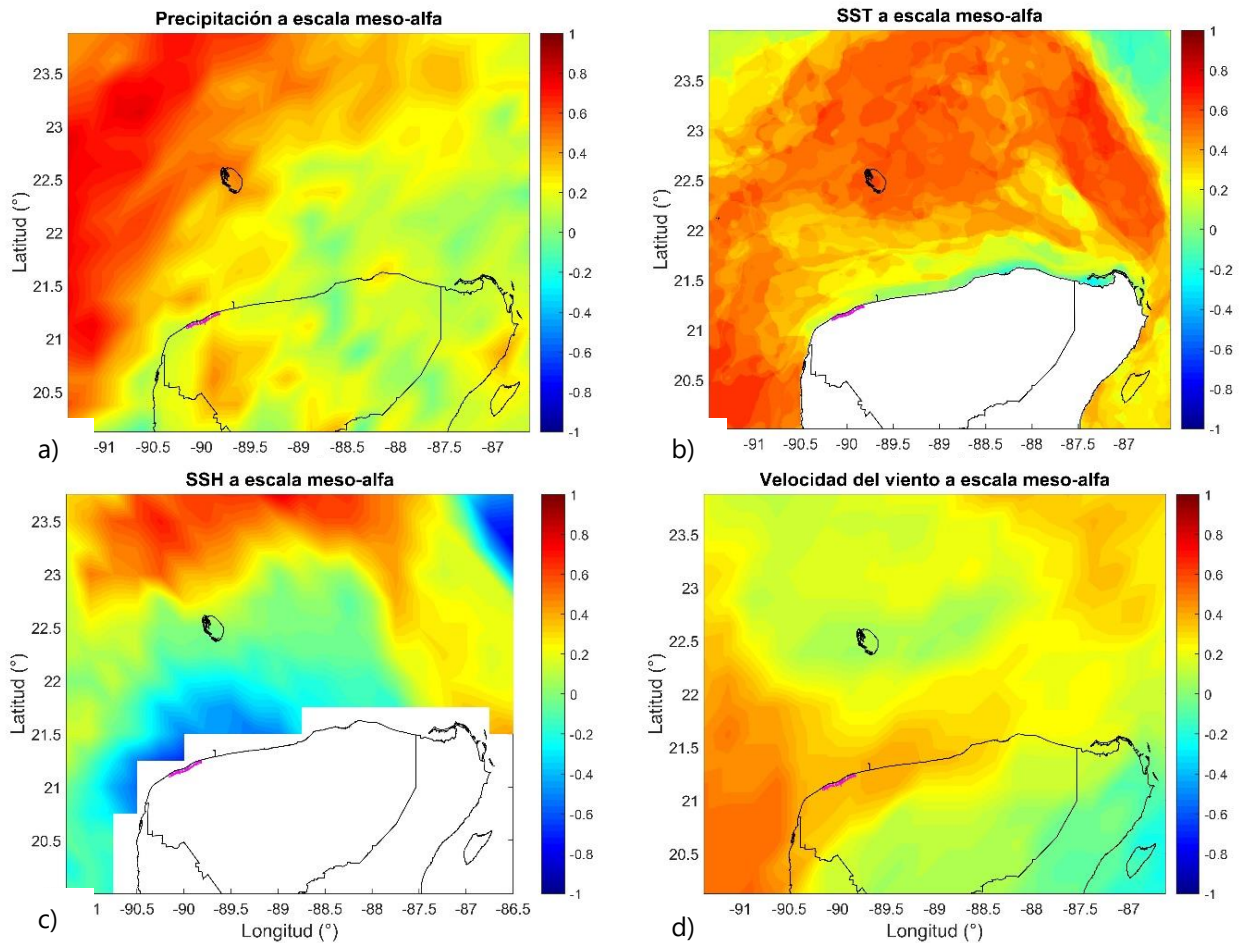
**Figura 4-12** Matriz de correlaciones entre cada una de las variables incluyendo la cobertura de bosque de manglar para la escala meso- $\beta$ .

#### 4.4 Mapas de correlación

Con los coeficientes de correlación de Spearman ( $\rho$ ) calculados entre el promedio anual de cada variable para cada pixel de datos y el cambio en la cobertura de bosque de manglar a lo largo de los once años que abarca el presente estudio se construyó la matriz  $C_{ij}$  descrita en la sección 3.3.6. Con esta matriz se realizaron mapas para identificar las zonas donde la variable ambiental tiene una mayor correlación con el cambio en la cobertura de manglar, obteniéndose un mapa representativo para cada variable ambiental en cada escala de estudio.



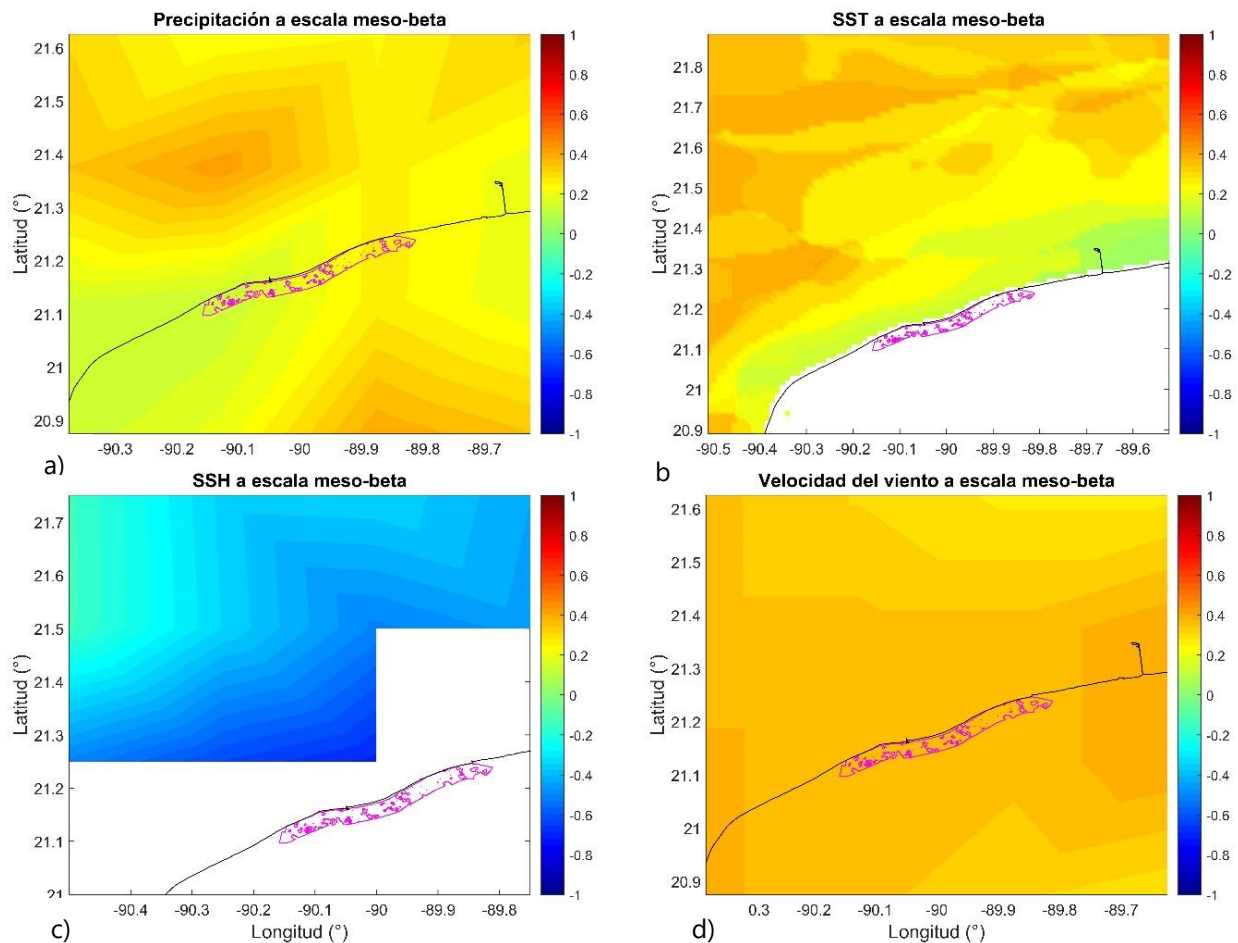
Para la zona meso- $\alpha$  observamos en la **Figura 4-13** que para las cuatro variables ambientales existen zonas con una alta correlación ( $\rho > 0.6$ ), sin embargo esas zonas están alejadas de la reserva. También es notoria la existencia de enormes zonas con cero correlación y solamente para el caso de la anomalía del nivel del mar se observa correlación negativa curiosamente de la zona más cercana a la reserva.



**Figura 4-13** Mapas de correlación a escala meso- $\alpha$ : a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH) y d) Velocidad del viento.

En cuanto a la zona meso- $\beta$  podemos observar en la **Figura 4-14** que prácticamente no hay ninguna correlación ( $\rho$  muy cercano a cero) entre los cambios en la cobertura de bosque de manglar y la variabilidad en la precipitación y la temperatura superficial del mar. Hay

una visible correlación negativa entre la anomalía del nivel del mar y la cobertura de bosque de manglar y una relación positiva baja con la velocidad del viento.



**Figura 4-14** Mapas de correlación a escala meso- $\beta$ : a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH) y c) Velocidad del viento.

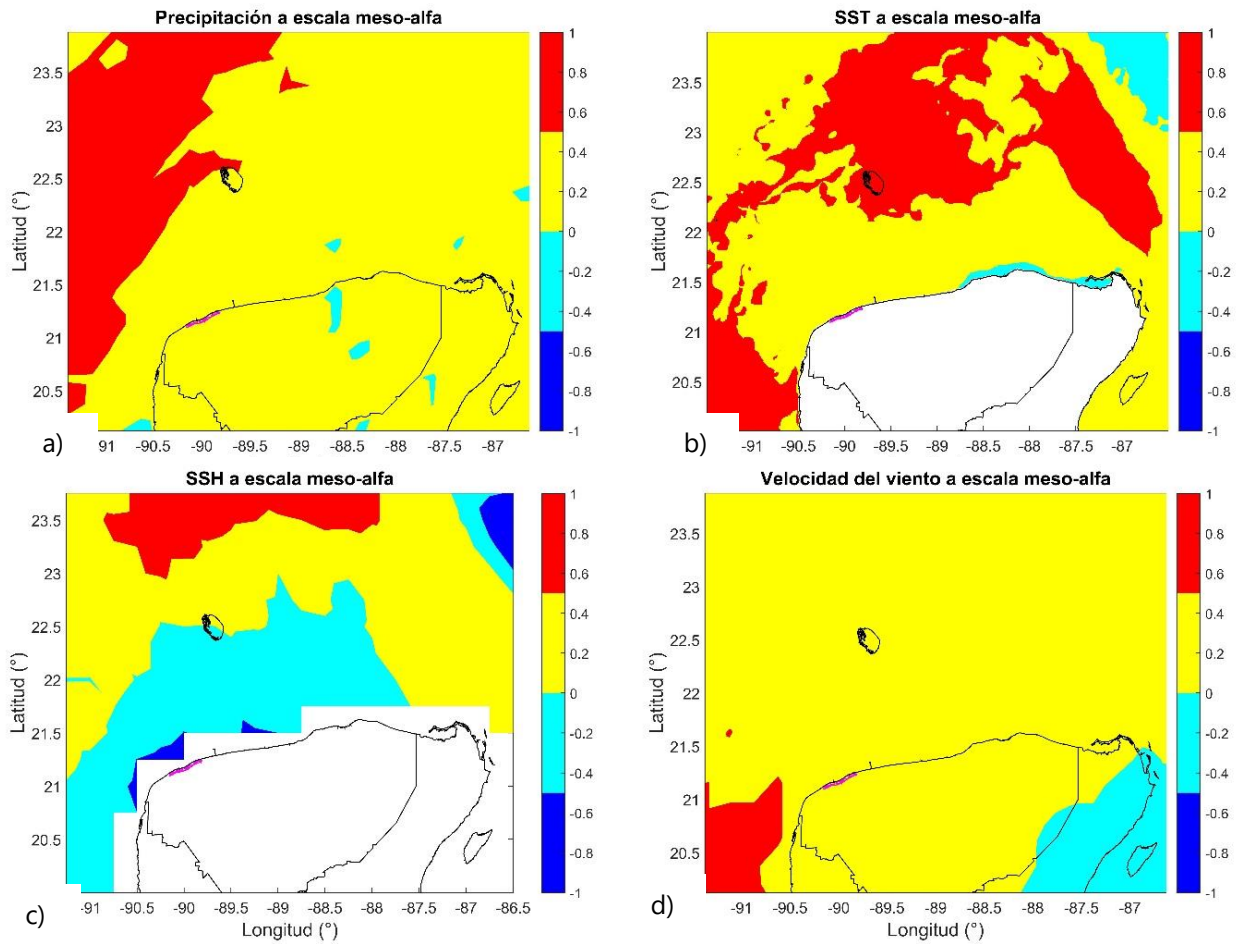
Para identificar las zonas con mayor correlación, se clasificaron los pixeles de datos de las variables ambientales en cuatro clases correspondientes a los intervalos de valores para  $\rho$  de  $[-1,-0.5)$ ,  $[-0.5,0)$ ,  $[0,0.5)$  y  $[0.5,1)$ . En la **Tabla 4-16** se muestran los porcentajes de esta clasificación en los cuales se resalta un comportamiento diferente en ambas escalas espaciales. Por ejemplo para la zona meso- $\beta$  ningún pixel tuvo un  $\rho > 0.5$  mientras que para la zona meso- $\alpha$  destacan la precipitación y la temperatura con un porcentaje del 20 y 33.55% respectivamente. Además, se puede observar que en tres de las variables (precipitación, velocidad del viento y temperatura superficial del mar) se presenta un

porcentaje mayor al cincuenta por ciento de pixeles dentro del intervalo [0.0,0.5] mientras que la anomalía del nivel del mar es la única variable con correlación negativa principalmente a escala meso- $\beta$

**Tabla 4-16** Porcentaje de pixeles de ambas escalas de estudio dentro de cada uno de los cuatro rangos del coeficiente de correlación  $\rho$ .

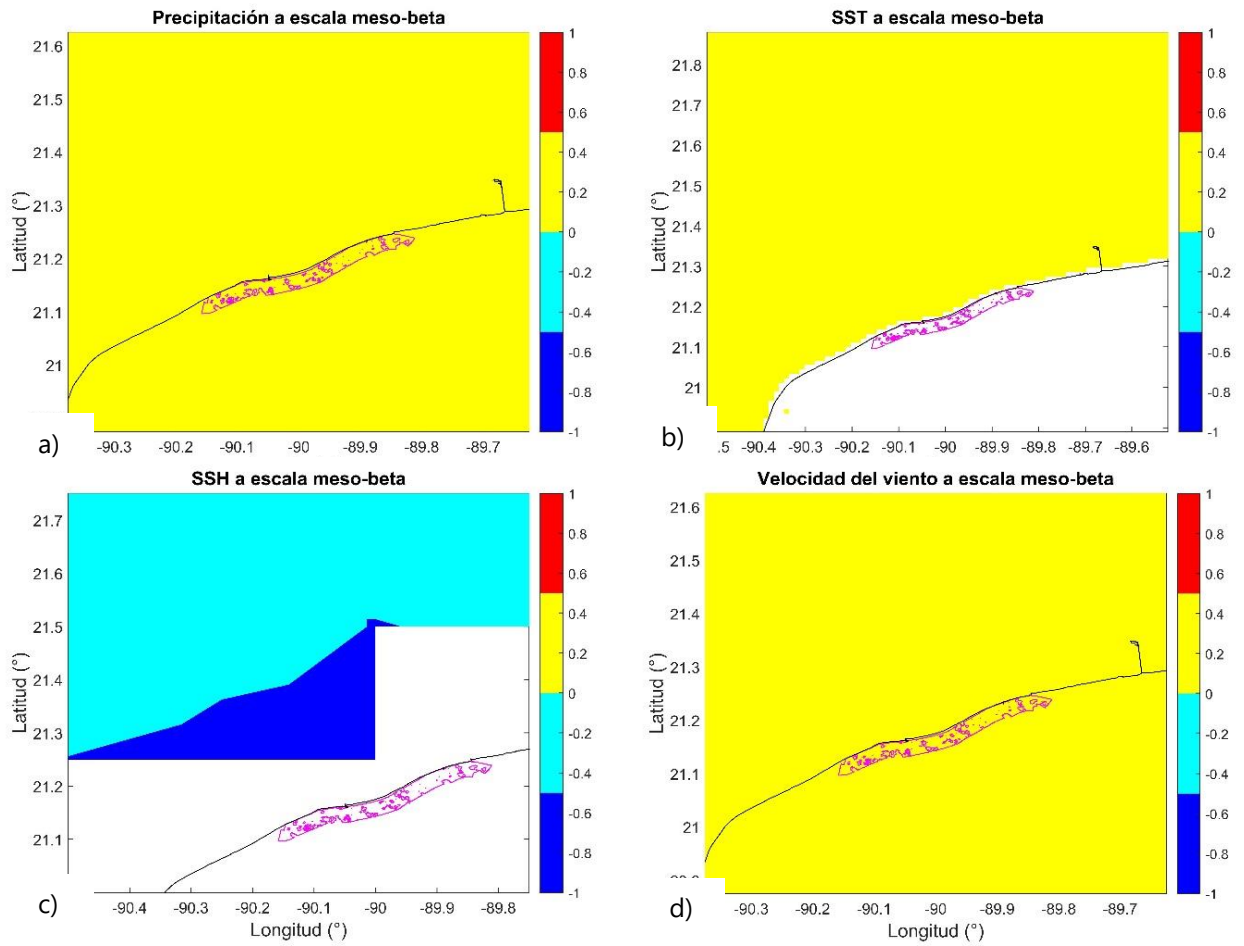
.Meso- $\alpha$				
Variable \ intervalo	[-1,-0.5]	[-0.5,0.0]	[0.0,0.5]	[0.5,1]
Precipitación	0	3.44	76.56	20
Temperatura	0	4.1	62.35	33.55
Anomalía de nivel del mar	5.53	34.56	48.85	11.06
Velocidad del viento	0	8.75	85.94	5.31
Meso- $\beta$				
Variable \ intervalo	[-1,-0.5]	[-0.5,0.0]	[0.0,0.5]	[0.5,1]
Precipitación	0	0	100	0
Temperatura	0	0	100	0
Anomalía del nivel del mar	41.67	58.33	0	0
Velocidad del viento	0	0	100	0

Se obtuvieron los siguientes mapas de correlación clasificados en los que se puede ver en color rojo las zonas de mayor correlación tanto para la zona meso- $\alpha$  como para la zona meso- $\beta$ , en color amarillo las zonas con una ligera correlación positiva, en azul claro las zonas con una ligera correlación positiva y en azul oscuro las zonas con una correlación positiva. A escala meso- $\alpha$  (**Figura 4-15**), para la precipitación se puede anotar que la zona de más correlación es una gran región situada en la parte noroccidental de la zona. Para la temperatura ubicamos la región norte y oeste como aquella que correlaciona más con la cobertura de manglar. En el caso de la anomalía del nivel del mar solo la parte norte correlaciona significativamente y para la velocidad del viento solo unos pocos pixeles en la zona suroeste tienen alguna correlación.



**Figura 4-15** Mapas de correlación con cuatro clases a escala meso- $\alpha$ : a) Precipitación acumulada anual, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH) c) Velocidad del viento.

A escala meso- $\beta$  (**Figura 4-16**) los mapas de correlación no nos dan mucha información ya que la precipitación, temperatura y la velocidad del viento apenas se ven con ligera correlación. La anomalía del nivel del mar presenta ligera correlación en algunos de sus pixeles.



**Figura 4-16** Mapas de correlación con cuatro clases a escala meso- $\beta$ : a) Precipitación acumulada anual, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalia del nivel del mar (SSH) c) Velocidad del viento.

## 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El efecto producido por el cambio en las variables climáticas y antrópicas sobre el bosque de manglar es un fenómeno que tiene interacciones complejas y retroalimentaciones difíciles de predecir (Feller et al., 2009). Por lo que el estudio de cada variable por separado y su relación con el bosque de manglar nos da una idea de la dinámica que sigue este ecosistema. A pesar de ello, el efecto conjunto de todas las variables es difícil de modelar y depende de la geomorfología local y la estructura humana existente en cada región (Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010).

La obtención y uso de información proveniente de diferentes sensores remotos y de imágenes satelitales está justificada por su disponibilidad y cobertura y proporcionó un análisis efectivo de las variables ambientales ya que permitió comparar la evolución temporal de variables climáticas y espaciales. Suponemos el impacto de las diferentes resoluciones espaciales de los datos ambientales con respecto a la de las capas de cobertura de manglar es poco significativo en los resultados obtenidos ya que en cualquiera de las dos escalas de estudio, el área y el número de datos es mucho mayor que la franja costera en estudio.

La elección de las variables ambientales se realizó en función de las que han sido identificadas como las que mayormente afectan el desarrollo de bosque de manglar, es decir nivel del mar, precipitación, y temperatura (Ward et al., 2016), además se incluye la velocidad del viento que tradicionalmente se le ha dado poca relevancia como agente dispersor del manglar sin embargo resultados recientes prueban que tiene un efecto potencial en las trayectorias de dispersión de propágulos (Van der Stocken & Menemenlis, 2017) esto debido probablemente a la influencia del viento en las corrientes oceánicas. Los datos de promedio diario de anomalía del nivel del mar, de temperatura superficial del mar y de velocidad del viento a los 10 m además de precipitación total diaria fueron elegidos en base a su disponibilidad y calidad.

El aumento de cobertura de bosque de manglar en esta zona es atribuido por Barrera Falcón (2016) a la ausencia de actividades antropogénicas de alto impacto y a la ausencia de perturbaciones naturales intensas recientes, bajo ese contexto los resultados aquí expuestos permitieron identificar factores ambientales que sí pueden tener influencia en el crecimiento del área cubierta por bosque de manglar.

## 5.1 Datos de cobertura de bosque de manglar y variables climáticas

Los datos proporcionados por Barrera Falcón (2016) muestran un incremento promedio positivo del 3.1% anual en la cobertura de bosque de manglar aunque el comportamiento anual reportado por dicho autor muestra variaciones positivas y negativas en el incremento del área de cobertura de mangle.

A pesar de no contar con imágenes satelitales para todos los años de estudio, la cobertura de bosque de manglar y de las demás clases de cobertura en 2005, 2008, 2010, 2013 se estimó mediante interpolación temporal de esas coberturas modelando el cambio como un proceso estacionario de Markov como describen Petit, Scudder y Lambin (2001). Una de las principales limitaciones de esta modelación es la suposición de que la matriz de probabilidades de transición depende únicamente de los dos estados entre los que queremos calcular la cobertura (Lambin, 1994) a pesar de ello esta manera de proceder ha sido ampliamente usada en la modelación de cambio de cobertura por ejemplo en Camacho, Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (2016), Jean-François Mas y Vega (2012) y Pontius et al. (2004). El área obtenida por Barrera Falcón (2016) para las cuatro clases de cobertura y complementadas por este método se mostraron en la **Tabla 4-13** y son parte de la contribución de este trabajo en el conocimiento de la dinámica de la Reserva Estatal el Palmar.

La percepción remota con dispositivos ópticos en nuestros días es una de las principales herramientas para generar información de la cobertura vegetal a varias resoluciones espaciales (Silván-Cárdenas & Wang, 2014), lo que quedó demostrado con el análisis de la cobertura vegetal de la zona de estudio realizado por Barrera (2016) usado en el presente trabajo. Sin embargo, para el estudio de las cuatro variables ambientales no basta con información obtenida a través de sensores ópticos, por lo que se realizó una búsqueda exhaustiva de información en centros de datos meteorológicos de acceso público. Estos "Data center" pertenecen o están ligados de alguna forma a agencias de los Estados Unidos como la NASA<sup>15</sup> o la NOAA, los datos allí obtenidos tienen diferencias significativas en su formato y en su origen, por lo que el trabajo realizado en su búsqueda y procesamiento no es despreciable.

El empleo de datos de las variables ambientales precipitación, temperatura superficial del mar, anomalía del nivel del mar y velocidad del viento a los 10 m de altura permitió

---

<sup>15</sup> Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio

identificar los cambios que han sufrido dichas variables a lo largo de los once años. Las series de tiempo generadas fueron útiles para identificar visualmente la tendencia global de las variables, no se hizo ningún análisis matemático más sofisticado puesto que ello no estaba en el objetivo del presente, aunque podemos afirmar que la naturaleza de los datos es propicia para estudiar la variabilidad temporal de las variables elegidas (e.g. Muller-Karger et al., 2014).

Como una forma de caracterizar el comportamiento de las variables ambientales se generaron gráficos de los promedios anuales de cada variable en las dos escalas espaciales en las que se realizó el presente estudio en los que se puede observar la gran variabilidad que tienen las variables climáticas a lo largo de estos años. A su vez los gráficos del promedio de cada mes del año a lo largo del periodo de estudio nos proporcionan una idea de su comportamiento estacional.

Las consecuencias del cambio climático sobre el bosque de manglar son algo innegable y bien documentado por numerosos autores. La correlación entre la precipitación y la cubierta de bosque de manglar en periodos de 2 a 3 años es algo que se ha demostrado (Krauss et al., 2013; Rogers & Saintilan, 2008) lo mismo puede decirse para la elevación del nivel del mar la cual está ligada a la anomalía del nivel del mar (López-Medellín et al., 2011). En cuanto a la temperatura, Mitra (2013) resalta que los manglares no serán afectados inmediatamente por la elevación de la temperatura superficial del mar puesto que estos producen un máximo de brotes cuando la temperatura del aire es de alrededor de 25°C. Sin embargo, arriba de 35° C de temperatura se genera un estrés térmico que afecta las raíces del manglar y la propagación de plántulas además menciona que las oscilaciones en la temperatura también afectan la fotosíntesis.

Los efectos del cambio en las variables ambientales pueden no manifestarse de manera inmediata y evidente pues como afirma Alongi (2008) los manglares tienen características importantes que los hacen resistentes a las perturbaciones como desastres naturales y cambio climático, algunas de estas características son por ejemplo grandes reservas de nutrientes en el subsuelo, rápido movimiento biótico y una rápida reconstrucción y rehabilitación post-perturbación, sin embargo, el cambio climático global incluyendo cambios en la temperatura, CO<sub>2</sub>, precipitación, huracanes y tormentas, y nivel del mar combinados con amenazas de origen antropogénico ponen en peligro la resistencia del bosque de manglar (McLeod & Salm, 2006). Surge entonces la interrogante de cuanto afectan las variaciones ambientales de tiempos pasados al estado actual de bosque de manglar, es decir, si la cobertura de manglar esta igual o más relacionada a las condiciones pasadas o presentes del ambiente, dicha cuestión está más allá de los objetivos del



presente trabajo por lo que se propone un estudio de correlación serial para análisis futuros en esta zona de estudio.

Ya que los manglares tienen distribuciones espaciales irregulares (en parches) son muy dependientes de la dispersión a larga distancia<sup>16</sup> para colonizar hábitats desocupados y permitir su expansión por lo que la velocidad y dirección del viento tienen efectos potenciales en las trayectorias de dispersión y propagación de plántulas de mangle a través de su influencia en las corrientes oceánicas (Van der Stocken & Menemenlis, 2017).

La elección de las escalas a las que se realizó el estudio (meso- $\alpha$  y meso- $\beta$ ) estuvo influenciada por el análisis exploratorio de datos realizada inicialmente en el que se observó un comportamiento diferenciado de las variables climáticas dependiente de la elección del número de píxeles a estudiar alrededor de la franja de estudio delimitada.

## 5.2 Correlación con cobertura de bosque de manglar

En este trabajo, al examinar los datos de la cobertura de bosque de manglar se encontraron correlaciones altas con el promedio anual de dos variables ambientales con un nivel de significancia  $p - value < 0.01$ , es el caso de la temperatura superficial del mar ( $\rho = 0.75$ ) y la velocidad del viento a los 10 m de altura ( $\rho = 0.78$ ) a escala meso- $\alpha$ . En el caso del análisis a escala meso- $\beta$  sólo se encontró correlación con la velocidad del viento ( $\rho = 0.809$ ). Este resultado para la temperatura es apoyado por el hecho de que su aumento favorece la composición, fenología y productividad del manglar, habiendo un pico en su fotosíntesis entre los 28-32 °C, estando en muchos casos su distribución limitada latitudinalmente por la temperatura del aire del mes más frío a los 16° C (Ward et al., 2016; Wilson, 2017). En cuanto a la velocidad y dirección del viento la correlación encontrada refuerza la idea de Van der Stocken et al. (2017) en el sentido de que este es un vector clave dispersor de propágulos, si bien el mismo autor enfatiza que se conoce relativamente poco de los mecanismos de dispersión de manglar que involucran viento y corrientes oceánicas.

Varias investigaciones sugieren que la escala espacial es determinante en el resultado de análisis estadísticos que involucran muchas variables espaciales (Fotheringham & Wong, 1991) y que diferentes resultados pueden ser obtenidos cuando aplicamos la

---

<sup>16</sup> En inglés long distance dispersal (LDD)

misma técnica a la misma distribución de datos con el simple hecho de cambiar las unidades espaciales usadas (Heywood, Cornelius, & Carver, 2006) lo que es conocido como el Problema de la Unidad de Área Modificable (PUAM) (Openshaw, 1984). Para el bosque de manglar la influencia del cambio global en las variables ambientales se ve influenciada por factores locales como por ejemplo se proyecta un aumento en el nivel del mar de  $1.9 \text{ mm/año}$  para el Caribe mientras que en el delta del Mississippi es de  $9 \text{ mm/año}$ ; en la precipitación los cambios tienden a ser regionales ya que mientras para Centroamérica se espera una disminución en la precipitación anual, en América del Sur la predicción aumentar (Ward et al., 2016).

Es el caso en el presente estudio se obtuvieron diferencias entre la correlación de las variables a las diferentes escalas analizadas, lo más notorio es que para la temperatura superficial del mar a escala meso- $\beta$  se tiene un coeficiente de correlación de  $\rho = 0.409$  frente al ya mencionado  $\rho = 0.75$  obtenido a escala meso- $\alpha$ .

Primeramente éste análisis de correlación se llevó a a cabo obteniendo el promedio anual de la variable ambiental en turno sobre toda la zona de estudio, es decir promediando todos los pixeles de la zona a lo largo de un año, esto evidencio una marcada dependencia de la escala aunque proporcionó poca información del comportamiento espacial de las variaciones de los datos ambientales. Una exploración posterior se realizó sobre conjunto de todos las rejillas delimitadas por ambas escalas de estudio de forma individual para cada una de ellas, resultando esta ser más productiva pues se tomó la correlación de la media anual de cada pixel de información a lo largo de los 11 años de estudio y se elaboraron mapas de correlación de cada pixel para cada variable ambiental con la cobertura de bosque de manglar. La identificación de las zonas de correlación temporal con el Palmar a nivel pixel de información es un resultado muy valorable. La clasificación en cuatro categorías según el valor de  $\rho$  permite establecer las directamente las zonas de mayor correlación con nuestra área de interés.

En la escala meso- $\alpha$  los patrones de correlación encontrados no indican asociación espacial dependientes de distancia a la zona de estudio, lo que pareciera estar en desacuerdo con la llamada Primera Ley de Tobler de la Geografía “las observaciones de datos espaciales no son independientes, pero se supone que las características que están muy juntas en el espacio geográfico están de alguna manera más relacionadas” (Tobler, 1976) ya que los pixeles de mayor correlación ( $\rho > 0.5$ ), que representan el 20% para la precipitación y el 33.55% para la temperatura superficial del mar por ejemplo, están bastante alejados de El Palmar. Se debe aclarar sin embargo, que si bien se han establecido correlaciones del manglar con variables ambientales (e.g. Rioja-Nieto et al., 2017) y en las

diferentes escalas utilizadas para analizar los datos en este estudio se encontraron las asociaciones ya mencionadas, no se puede inferir una relación causal entre estos y los cambios en la cobertura de manglar. Una observación especial merece el caso de la precipitación ya que como acabamos de anotar su comportamiento pixel a pixel en esta escala arroja una gran correlación temporal con la cobertura de manglar tomando en cuenta además que el 76.56% de los pixeles tiene un valor de  $\rho$  positivo ( $\rho > 0$  y  $\rho \leq 0.5$ ) y el 20% de ellos tiene un valor de  $\rho$  entre **0.5 y 1** obtenemos un total de 96.56% de pixeles con un valor positivo del coeficiente de correlación, sin embargo el análisis del promedio de la precipitación acumulada para toda la zona como un solo conjunto, dio una correlación negativa ( $\rho = -0.181$ ), lo que refuerza la idea de Ward et al. (2016) de que los ecosistemas de bosque de manglar deben estudiarse a escala regional preferentemente y además de que este es un sistema biocomplejo<sup>17</sup> (Feller et al., 2009).

En la escala meso- $\beta$  se observa que mientras para la precipitación, temperatura superficial del mar y velocidad del viento en el análisis pixel a pixel arrojan un 100% de rejillas con una correlación positiva baja ( $\rho > 0$  y  $\rho \leq 0.5$ ) con la cobertura de bosque de manglar, los resultados obtenidos para la media de toda la zona arrojan  $\rho = -0.036$  para la precipitación,  $\rho = 0.409$  para la temperatura superficial del mar y de  $\rho = 0.809$  para la velocidad del viento teniendo un nivel de significancia aceptable únicamente para esta última variable. Especialmente se menciona a la velocidad del viento en esta escala por mostrar este comportamiento estadístico en el cual a nivel completo de escala meso- $\beta$  muestra una fuerte correlación, pero pixel a pixel, todos ellos presentan una baja correlación con la zona de estudio.

De acuerdo al análisis de correlación realizado las variables ambientales con mayor similitud con la cobertura de bosque de manglar fueron la temperatura y la velocidad del viento en las proporciones antes mencionadas considerando los valores promedio en ambas mesoescalas, en contraste el estudio pixel a pixel arroja un mayor porcentaje de rejillas altamente correlacionadas en la media de la temperatura superficial del mar y la precipitación acumulada anual. Para la misma zona de estudio que incluye la Reserva Estatal el Palmar y su zona adyacente Rioja-Nieto et al. (2017) observan una influencia del 21% para la precipitación acumulada anual (de 625 a 635 mm según sus datos) y del 9% para la temperatura máxima (31.75 °C), por lo que concluyen que estas dos variables

---

<sup>17</sup> El término biocomplejidad fue acuñado por Colwell (1999) como una fusión de biológico y complejo. Michener et al. (2001) lo definen como propiedades emergentes de la interacción del comportamiento de las relaciones biológicas, químicas, físicas y sociales que afectan, sostienen o son modificadas por organismos vivos, incluyendo seres humanos.

ambientales son las más influyentes en el cambio de cobertura de bosque de manglar en la zona de estudio considerada y para el mismo intervalo de tiempo. Para explicar esta aparente discordia hay que precisar que en el presente estudio se considera una zona de influencia alrededor de El Palmar muy grande por lo que el número de píxeles es elevado y además las correlaciones son calculadas sin ningún retardo en las series de tiempo mientras que Rioja-Nieto et al. (2017) consideran valores de las variables ambientales en la zona de estudio de forma exclusiva y su análisis es para un periodo de 30 años. Cabe mencionar que Rioja-Nieto et al. (2017) no incluyen en su investigación a la anomalía del nivel del mar ni a la velocidad del viento por lo que no se pudieron contrastar con el presente tratado, lo cual habría sido interesante en particular para la velocidad del viento en la cual se encontró una correlación estadísticamente significativa. Los resultados obtenidos son entonces acordes al tamaño de las escalas elegidas puesto que correlaciones de variables promediadas sobre áreas grandes o sobre largos periodos de tiempo tienen niveles de significancia más altos que aquellos con variables en puntos o tiempos individuales (Björnsson & Venegas, 1997).

### **5.3 Conclusiones**

Los métodos y datos empleados en este trabajo permitieron caracterizar y analizar la cobertura de bosque de manglar y su relación con variables ambientales. La obtención de datos demuestra su alta disponibilidad y calidad; no solamente de los provenientes de sensores ópticos sino de todo un gran número de sensores con principios físicos de obtención muy variado.

Las escalas espaciales usadas (meso- $\alpha$  y meso- $\beta$ ) y el tamaño del píxel de los datos ambientales permitieron reconocer al ecosistema de bosque de manglar como un sistema complejo, difícil de modelar en cuanto a la elección de la escala de estudio se refiere, queda claro que si bien el comportamiento de las variables ambientales es altamente no lineal, cuando se mezclan con cobertura de bosque de manglar, los resultados son poco intuitivos y sumamente complejos.

Las correlaciones calculadas para cada variable ambiental y la cobertura de bosque de manglar incluyendo toda la escala espacial y píxel a píxel evidencian una influencia de la

escala elegida como área de estudio sobre los resultados obtenidos, por lo que en futuros estudios es un factor importante a tomar en cuenta.

Los mapas de correlación fueron una herramienta fundamental en el análisis a nivel de cada rejilla puesto que los patrones espaciales fueron identificados de forma inmediata por inspección visual.

Los resultados sugieren que si hay una correlación entre la cobertura de bosque de manglar y la temperatura superficial del mar y la velocidad del viento a los 10 m de altura. En cuanto a la precipitación y la anomalía del nivel del mar la significancia estadística no nos permite concluir ningún tipo de correlación aunque los patrones mostrados en los mapas de correlación apuntan a una fuerte similitud entre la precipitación y el bosque de manglar y advierten una correlación negativa entre este y la anomalía del nivel del mar. A pesar de que correlación no implica causalidad se considera a estas variables como de interés para futuros análisis.

Las discrepancias obtenidas en la correlación a diferentes escalas podrían implicar diferencias en la sensibilidad del manglar a las variaciones climáticas a diferentes escalas espaciales, de ser el caso, estaríamos ante un problema más complejo que el PUAM mencionado anteriormente.

## 6 Lista de Tablas

Tabla 3-1 Fecha de las imágenes, precisiones y coeficientes kappa, post-clasificación 2004-2014.....	31
Tabla 3-2 Cobertura del bosque de manglar, periodo 2004-20014.....	32
Tabla 4-1 Precipitación acumulada anual, media diaria, varianza diaria y desviación estándar diaria a escala a) meso- $\alpha$ y b) meso- $\beta$ .....	50
Tabla 4-2 Temperatura promedio anual, varianza y desviación estándar anual a escala a) meso- $\alpha$ y b) meso- $\beta$ .....	50
Tabla 4-3 Promedio anual de la anomalía del nivel del mar, varianza y desviación estándar anual a escala a) meso- $\alpha$ y b) meso- $\beta$ .....	51
Tabla 4-4 Promedio anual de la velocidad del viento, varianza y desviación estándar anual a escala a) meso- $\alpha$ y b) meso- $\beta$ .....	51
Tabla 4-5 Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2004 a 2006.....	56
Tabla 4-6 Matriz de cambio de cobertura para los años 2004 a 2006 (en metros cuadrados).....	57
Tabla 4-7 Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2007 a 2009.....	57
Tabla 4-8 Matriz de cambio de cobertura para los años 2007 a 2009 (en metros cuadrados).....	58
Tabla 4-9 Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2009 a 2011.....	58
Tabla 4-10 Matriz de cambio de cobertura para los años 2009 a 2011 (en metros cuadrados).....	59
Tabla 4-11 Matriz de probabilidades de transición expresada en porcentajes para los años 2012 a 2014.....	59

Tabla 4-12 Matriz de cambio de cobertura para los años 2012 a 2014 (en metros cuadrados).....	60
Tabla 4-13 Áreas de cobertura calculadas (en metros cuadrados).....	61
Tabla 4-14 Incremento y disminución de cobertura de bosque de manglar.....	61
Tabla 4-15 Coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) y significancia estadística p-value entre las variables ambientales y la cobertura de bosque de manglar.....	62
Tabla 4-16 Porcentaje de píxeles de ambas escalas de estudio dentro de cada uno de los cuatro rangos del coeficiente de correlación $\rho$ .....	68

## 7 Lista de Figuras

Figura 2-1 Distribución mundial del bosque de manglar, elaboración propia con datos de Ocean Data Viewer (2015). .....	7
Figura 2-2 Distribución del manglar en el litoral mexicano en 2015, elaboración propia con datos de CONABIO. ....	9
Figura 2-3 Distribución del bosque de manglar en la Península de Yucatán en 2015, elaboración propia con datos de CONABIO (2015). ....	11
Figura 2-4 Localización del área de estudio en la costa noroeste del Estado de Yucatán, elaboración propia con datos de Erick Barrera (2016). ....	14
Figura 3-1 Zonas consideradas para analizar datos a mesoescala alfa y mesoescala beta alrededor de la reserva El Palmar, elaboración propia.....	24
Figura 3-2 Zona de estudio delimitada después del procesamiento de las imágenes SPOT, elaboración propia con datos de Erick Barrera (2016). ....	30
Figura 3-3 Visualización del grid de datos a escalas a) meso- $\alpha$ y b) meso- $\beta$ para la velocidad del viento. Se muestra el promedio anual para el año 2014 donde cada pixel tiene un tamaño de 0.25 grados. ....	33
Figura 3-4 Promedio anual de las variables ambientales para el año de 2010 a escala meso- $\alpha$ , a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.....	34
Figura 3-5 Promedio mensual de las variables ambientales para el mes de junio de 2010 a escala meso- $\alpha$ , a) Precipitación mensual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.....	35
Figura 3-6 Promedio anual de las variables ambientales para el año de 2010 a escala meso- $\beta$ , a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.....	36



Figura 3-7 Promedio mensual de las variables ambientales para el mes de junio de 2010 a escala meso- $\beta$ , a) Precipitación acumulada mensual, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH), d) Velocidad del viento a los 10 m sobre el nivel del mar.....	37
Figura 3-8 Pixel de datos de latitud $i$ y longitud $j$ en la fecha $t$ , forman la matriz $S$ correspondiente a toda la escala de análisis, la variable es precipitación a meso escala- $\beta$ para el 17 de septiembre de 2010. ....	38
Figura 3-9 Representación de la matriz $[A]$ donde cada renglón representa un año y cada columna una posición geográfica.....	44
Figura 4-1 Promedio anual de las variables ambientales a escala meso- $\alpha$ a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) Velocidad del viento. ....	46
Figura 4-2 Promedio anual de las variables ambientales a escala meso- $\beta$ a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) Velocidad del viento. ....	47
Figura 4-3 Promedios mensuales a escala meso- $\alpha$ a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) Velocidad del viento. ....	48
Figura 4-4 Promedios mensuales a escala meso- $\beta$ a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) Velocidad del viento. ....	49
Figura 4-5 Diagramas de caja para los datos a escala meso-alfa, a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y c) Velocidad del viento. ....	52
Figura 4-6 Diagramas de caja para los datos a escala meso-beta, a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y c) Velocidad del viento. ....	53
Figura 4-7 Series de tiempo diarias de las variables ambientales a escala meso- $\alpha$ a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) velocidad del viento...	54
Figura 4-8 Series de tiempo mensuales de las variables ambientales a escala meso- $\alpha$ a) Precipitación, b) Temperatura, c) Anomalía del nivel del mar y d) velocidad del viento...	55
Figura 4-9 Incremento de la cobertura de bosque de manglar.....	61
Figura 4-10 Diagramas de dispersión de variables ambientales con cobertura de bosque de manglar estadísticamente significativos. a) Temperatura superficial del mar (SST) a	

escala meso- $\alpha$ ( $\rho = 0.75$ ), b) Velocidad del viento a escala meso- $\alpha$ ( $\rho = 0.78$ ), c) Velocidad del viento a escala meso- $\beta$ ( $\rho = 0.809$ ).....	63
Figura 4-11 Matriz de correlaciones entre cada una de las variables incluyendo la cobertura de bosque de manglar para la escala meso- $\alpha$ .....	64
Figura 4-12 Matriz de correlaciones entre cada una de las variables incluyendo la cobertura de bosque de manglar para la escala meso- $\beta$ .....	65
Figura 4-13 Mapas de correlación a escala meso- $\alpha$ : a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH) y c) Velocidad del viento. ....	66
Figura 4-14 Mapas de correlación a escala meso- $\beta$ : a) Precipitación anual acumulada, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH) y c) Velocidad del viento. ....	67
Figura 4-15 Mapas de correlación con cuatro clases a escala meso- $\alpha$ : a) Precipitación acumulada anual, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH) c) Velocidad del viento.....	69
Figura 4-16 Mapas de correlación con cuatro clases a escala meso- $\beta$ : a) Precipitación acumulada anual, b) Temperatura superficial del mar (SST), c) Anomalía del nivel del mar (SSH) c) Velocidad del viento.....	70

## 8 Bibliografía

- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Aranda-Cirerol, N., Herrera-Silveira, J. a., & Comín, F. a. (2006). Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatán, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3–4), 445–454. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.02.015>
- Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., ... Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69–83. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>
- Atkinson, P. M., & Tate, N. J. (2000). Spatial Scale Problems and Geostatistical Solutions: A Review. *Professional Geographer*, 52(4), 607–623.
- Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K., & Gombos, D. (2010). A Cross-calibrated, Multiplatform Ocean Surface Wind Velocity Product for Meteorological and Oceanographic Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(2), 157–174. <http://doi.org/10.1175/2010BAMS2946.1>
- Barrera Falcón, E. (2016). *Distribución espacio-temporal de la cobertura del Bosque de Manglar en la reserva estatal el Palmar y área adyacente sin esquema de protección*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Batllore, E., González, J. I., Díaz, J., Febles, L., Batllori-sampedro, E., González-piedra, J. I., ... Febles, J. Iuís. (2006). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán , México. *Investigaciones Geográficas*, (59), 74–92.
- Bell, E. J., & Hinojosa, R. C. (1977). Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. *Socio-Economic Planning Sciences*, 11(1), 13–17.
- Bian, L. (1997). Multiscale nature of spatial data in scaling up environmental models. *Scale in remote sensing and GIS*, 13–26.
- Bini, D. A., Higham, N. J., & Meini, B. (2005). Algorithms for the matrix pth root. *Numerical Algorithms*, 39(4), 349–378.
- Björnsson, H., & Venegas, S. A. (1997). A manual for EOF and SVD analyses of climatic data.
- Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., ... Twilley, R. R. (2008). Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2). <http://doi.org/10.1029/2007GB003052>
- Burnham, B. O. (1973). Markov Intertemporal Land Use Simulation Model. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 5(1), 253–258. <http://doi.org/10.1017/S0081305200011110>

- Camacho, V. V, Ruiz-Luna, A., & Berlanga-Robles, A. C. (2016). Effects of Land Use Changes on Ecosystem Services Value Provided By Coastal Wetlands: Recent and Future Landscape Scenarios. *J Coast Zone Manag*, 19, 418.
- Camps-Valls, G., Tuia, D., Gómez-Chova, L., Jiménez, S., & Malo, J. (2011). *Remote Sensing Image Processing*. Morgan & Claypool. <http://doi.org/S00392ED1V01Y201107IVM012>
- Cao, C., & Lam, N. S.-N. (1997). Understanding the scale and resolution effects in remote sensing and GIS. *Scale in remote sensing and GIS*, 57, 72.
- Cavanaugh, K. C., Kellner, J. R., Forde, A. J., Gruner, D. S., Parker, J. D., Rodriguez, W., & Feller, I. C. (2014). Poleward expansion of mangroves is a threshold response to decreased frequency of extreme cold events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(2), 723–7. <http://doi.org/10.1073/pnas.1315800111>
- Chatfield, C. (2004). *The analysis of time series: an introduction* (6th ed.). Florida, US: CRC Press.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental La observación de la Tierra desde el espacio* (3ª edición). Barcelona: Ariel.
- Clave, A., Surface, E. a, By, T., Sensing, R., Of, V., In, A., & Waters, E. L. (2007). La Teledetección De La Temperatura Superficial Del Mar: Una Validación De Algoritmos En Las Aguas, 125–146.
- Colwell, R. R. (1999). Balancing the biocomplexity of the planet's living systems: a 21st century task for science. *International Microbiology*, 2(1), 47–48.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <http://doi.org/10.1038/387253a0>
- Cressie, N., & Wikle, C. K. (2015). *Statistics for spatio-temporal data*. John Wiley & Sons.
- Davis, J. C. (1973). *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- De Groot, R. (2006). Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 75(3–4), 175–186. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.016>
- Documentation Center [Harris Geospatial Docs Center]. (s/f). Recuperado el 26 de julio de 2017, a partir de <https://www.harrisgeospatial.com/docs/ChangeDetectionAnalysis.html>
- Duke, N. C., Meynecke, J.-O., Dittmann, S., Ellison, A. M., Anger, K., Berger, U., ... others. (2007). A world without mangroves? *Science*, 317(5834), 41–42.
- Ellison, J. C. (2015). Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. *Wetlands Ecology and Management*, 23(2), 115–137. <http://doi.org/10.1007/s11273-014-9397-8>

- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I., Jeronimo, G., & Capurro-Filigrasso, L. (2013). Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*, 69, 101–109. <http://doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.018>
- Eslami-Andargoli, L., Dale, P. E. R., Sipe, N., & Chaseling, J. (2010). Local and landscape effects on spatial patterns of mangrove forest during wetter and drier periods: Moreton Bay, Southeast Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89(1), 53–61. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.05.011>
- FAO, & Jrc. (2012). *Global forest land-use change 1990–2005*. FAO Forestry Paper No. 169.
- Farina, A. (2006). *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Springer.
- Feller, I. C., Lovelock, C. E., Berger, U., McKee, K. L., Joye, S. B., & Ball, M. C. (2009). Biocomplexity in Mangrove Ecosystems.
- Feller, I. C., & Sitnik, M. (1996). Mangrove ecology: a manual for a field course. *Smithsonian Institution, Washington, DC*, 1–135.
- Flamenco-Sandoval, A., Ramos, M. M., & Masera, O. R. (2007). Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological conservation*, 138(1), 131–145.
- Forman Richard T. T., & Godron Michel. (1986). *Landscape Ecology*. Wiley.
- Fotheringham, A. S., & Wong, D. W. S. (1991). The modifiable areal unit problem in multivariate statistical analysis. *Environment and planning A*, 23(7), 1025–1044.
- Fujita, T. T. (1986). Mesoscale Meteorology and Forecasting. En P. S. Ray (Ed.), (pp. 18–35). Boston, MA: American Meteorological Society. [http://doi.org/10.1007/978-1-935704-20-1\\_2](http://doi.org/10.1007/978-1-935704-20-1_2)
- García, E., & Mosiño, P. (1968). Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. *Memoria 1966-67 del Comité Mexicano para el Decenio Hidrológico Internacional.*, 29–56.
- García Echeverría, A. W., & Piña Herrera, G. A. (2003). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, a., Loveland, T., ... Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154–159. <http://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Gobierno del Estado de Yucatán. (2007). Acuerdo que establece el Programa de Manejo del Área Natural Protegida denominada Reserva Estatal El Palmar. *Diario Oficial*.
- Gobierno del Estado de Yucatán. (2010). Poder Ejecutivo Estatal Decreto Número 285. *Diario Oficial*, 4–19.
- Goodchild, M. F., & Proctor, J. (1997). Scale in a Digital Geographic World. *Geographical and*

*Environmental Modelling*, 5–23.

- Green, B. H., Simmons, E. A., & Woltjer, I. (1996). *Landscape Conservation: Some Steps Towards Developing a New Conservation Dimension*. University of London, Department of Agriculture, Horticulture and Environment.
- Green, E., Mumby, P., Edwards, A., & Clark, C. (2000). *Remote Sensing: Handbook for Tropical Coastal Management*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Green, E. P., Clark, C. D., Mumby, P. J., Edwards, a. J., & Ellis, a. C. (1998). Remote sensing techniques for mangrove mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), 935–956. <http://doi.org/10.1080/014311698215801>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptaciones y vulnerabilidad*.
- Haber, W. (2004). Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology. *Ecological research*, 19(1), 99–106.
- Herrera-Silveira, J. a., & Morales-Ojeda, S. M. (2010). Subtropical Karstic Coastal Lagoon Assessment, Southeast México. The Yucatán Península Case. *Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change*, 568.
- Herrera-Silveira, J. A., R., J. R., & J., A. Z. (1998). Overview and characterization of the hydrology and primary producer communities of selected coastal lagoons of Yucatán, México. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 1(3–4), 353–372. <http://doi.org/10.1080/14634989808656930>
- Herrera Silveira, J., & Ceballos-Cambranis, E. (1998). Manglares: ecosistemas valiosos. *CONABIO Biodiversitas*, 1, 1–10.
- Heywood, D. I., Cornelius, S., & Carver, S. (2006). *An introduction to geographical information systems* (3rd ed). New York Pearson Prentice Hall.
- Higham, N. J. (2002). The {Matrix Computation Toolbox} for {MATLAB} (Version 1.0), (No. 410), 19.
- Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. (2010). The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, 328(5985), 1523–1528.
- Ikeda, M. (1995a). Mesoscale variability revealed with sea surface temperature imaged by avhrr on noaa satellites. *Oceanographic Applications of Remote Sensing*, 3.
- Ikeda, M. (1995b). *Oceanographic applications of remote sensing*. CRC press.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad.*, 40.
- Islebe, G. A., Sánchez-Sánchez, O., Valdéz-Hernández, M., & Weissenberger, H. (2015). Distribution of Vegetation Types. En G. A. Islebe, S. Calmé, J. L. León-Cortés, & B. Schmook

- (Eds.), *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula*. Cham: Springer International Publishing. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-06529-8>
- Krauss, K. W., Mckee, K. L., Lovelock, C. E., Cahoon, D. R., Saintilan, N., Reef, R., & Chen, L. (2013). How mangrove forests adjust to rising sea level. *New Phytologist*, 19–34. <http://doi.org/10.1111/nph.12605>
- Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T. V., & Dech, S. (2011). *Remote sensing of mangrove ecosystems: A review*. *Remote Sensing* (Vol. 3). <http://doi.org/10.3390/rs3050878>
- Laffoley, D., & Grimsditch, G. (2009). *The Management of Natural Coastal Carbon Sinks*.
- Lambin, E. F. (1994). *Modelling deforestation processes: a review tropical ecosystem environment observations by satellites, TREES Series B*.
- Leben, R. R., Born, G. H., & Engebret, B. R. (2002). Operational Altimeter Data Processing for Mesoscale Monitoring. *Marine Geodesy*, 25(1–2), 3–18. <http://doi.org/10.1080/014904102753516697>
- López-Medellín, X., Ezcurra, E., González-Abraham, C., Hak, J., Santiago, L. S., & Sickman, J. O. (2011). Oceanographic anomalies and sea-level rise drive mangroves inland in the Pacific coast of Mexico. *Journal of Vegetation Science*, 22(1), 143–151. <http://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2010.01232.x>
- Lovelock, C., & Ellison, J. (2007). Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the Great Barrier Reef to climate change. En *Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment* (pp. 237–269).
- Lovelock, C., Skilleter, G., & Saintilan, N. (2009). Mangroves and tidal wetlands. *Report card of marine climate change for Australia. NCCARF Publication*.
- Marceau, D. J., & Hay, G. J. (1999). Remote sensing contributions to the scale issue. *Canadian journal of remote sensing*, 25(4), 357–366.
- Martinez, W. L., & Martinez, A. R. (2004). *Exploratory Data Analysis with MATLAB (Computer Science and Data Analysis)*. Chapman & Hall/CRC.
- Mas, J.-F., & Vega, E. (2012). Assessing yearly transition probability matrix for land use/land cover dynamics. En *Proc 10th Int Symp Accuracy Assess Nat Resour Environ Sci*.
- Mas, J.-F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multivariate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261.
- Mazda, Y., & Wolanski, E. (2003). The Role of Physical Processes in Mangrove Environments. *Manual for the Preservation and Utilization of Mangrove Ecosystems*.
- McLeod, E., & Salm, R. V. (2006). *Managing mangroves for resilience to climate change*. World

Conservation Union (IUCN).

- MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis / Millennium Ecosystem Assessment. World Health*. World Resources Institute.
- Mendoza, E., & Trejo-Rangel, M. (2013). Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula, (65), 790–795. <http://doi.org/10.2112/SI65-134.1>
- Michener, W. K., Baerwald, T. J., Firth, P., Palmer, M. A., Rosenberger, J. L., Sandlin, E. A., & Zimmerman, H. (2001). Defining and unraveling biocomplexity. *BioScience*, 51(12), 1018–1023.
- Mitra, A. (2013). *Sensitivity of Mangrove Ecosystem to Changing Climate* (1a ed.). Springer India. <http://doi.org/10.1007/978-81-322-1509-7>
- Muller-Karger, F. E., Smith, J. P., Werner, S., Chen, R., Roffer, M., Liu, Y., ... Enfield, D. B. (2014). Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, 134, 54–76. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.12.007>
- Naveh, Z. (1987). Biocybernetic and thermodynamics perspectives of landscape functions and land use patterns. *Landscape Ecology*, 1(2), 75–83. <http://doi.org/10.1007/BF00156229>
- Ocean Data Viewer. (s/f). Recuperado el 15 de junio de 2017, a partir de <http://data.unep-wcmc.org/>
- Openshaw, S. (1984). The modifiable areal unit problem.
- Petit, C., Scudder, T., & Lambin, E. (2001). Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17), 3435–3456.
- Pettit, C., Cartwright, W., Bishop, I., Lowell, K., Pullar, D., Duncan, D. (2008). *Landscape analysis and visualisation: Spatial models for natural resource management and planning*. Springer.
- Pickett, S. T., & Cadenasso, M. L. (1995). Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems. *Science (New York, N.Y.)*, 269(5222), 331–4. <http://doi.org/10.1126/science.269.5222.331>
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268.
- Rioja-Nieto, R., Barrera-Falcón, E., Torres-Irineo, E., Mendoza-González, G., & Cuervo-Robayo, A. P. (2017). Environmental drivers of decadal change of a mangrove forest in the North coast of the Yucatan peninsula, Mexico. *Journal of Coastal Conservation*, 21(1), 167–175. <http://doi.org/10.1007/s11852-016-0486-0>
- Rioja-Nieto, R., Moreno-Ruiz, J. A., & Gómez-Valdés, J. (2015). Efecto del manejo de un Área Natural Protegida en el paisaje del bosque de manglar en la Península de Yucatán.



*Hidrobiológica*, 25(2), 30–40.

- Rodríguez Zúñiga, M. T., Acosta Velázquez, J., Leal, C. G., Cerdeira Estrada, S., Cruz López, M. I., Díaz Gallegos, J., ... Velázquez Salazar, S. (2013). *Manglares de México: extensión, distribución y monitoreo*. México Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Rogers, K., & Saintilan, N. (2008). Relationships between surface elevation and groundwater in mangrove forests of southeast Australia. *Journal of Coastal Research*, 24(sp1), 63–69.
- Royston, J. P. (1982). An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 31(2), 115–124.
- Ruiz-Castillo, E., Gomez-Valdes, J., Sheinbaum, J., & Rioja-Nieto, R. (2016). Wind-driven coastal upwelling and westward circulation in the Yucatan shelf. *Continental Shelf Research*, 118, 63–76. <http://doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.010>
- S. S. Shapiro, M. B. W. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611.
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Elsevier. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.10.007>
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. *DOF*.
- Silván-Cárdenas, J. L., & Wang, L. (2014). On quantifying post-classification subpixel landcover changes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 98, 94–105.
- Smith, M. I. (2003). A Schur Algorithm for Computing Matrix  $p$ th Roots. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 24(4), 971–989.
- Soler-Bientz, R., Watson, S., Infield, D., & Ricalde-Cab, L. (2011). Preliminary study of the offshore wind and temperature profiles at the North of the Yucatán Peninsula. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 2829–2843. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.02.024>
- Tobler, W. (1976). Spatial interaction patterns. *Journal of Environmental Systems*, 6, 271–301.
- Tomlinson, P. B. (1986). *The botany of mangroves*. Cambridge University Press.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Turner, M. G., Gardner, R. H., & O'Neill, R. V. (2001). *Landscape Ecology in theory and practice*. *National Geographic*. <http://doi.org/10.1007/b97434>
- UNEP. (2014). *The importance of mangroves to people: A call to action*. United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre.
- Van der Stocken, T., López-Portillo, J., & Koedam, N. (2017). Seasonal release of propagules in mangroves – Assessment of current data. *Aquatic Botany*.

<http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2017.02.001>

- Van der Stocken, T., & Menemenlis, D. (2017). Modelling mangrove propagule dispersal trajectories using high-resolution estimates of ocean surface winds and currents. *Biotropica*. <http://doi.org/10.1111/btp.12440>
- Van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., ... Randerson, J. T. (2009). CO<sub>2</sub> emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738. <http://doi.org/10.1038/ngeo671>
- Ward, R. D., Friess, D. A., Day, R. H., & MacKenzie, R. A. (2016). Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(4), e01211--n/a. <http://doi.org/10.1002/ehs2.1211>
- Wiens, J. A. (1989). Spatial Scaling in Ecology. *Functional Ecology*, 3(4), 385–397.
- Wiens, J. a., & Milne, B. T. (1989). Scaling of “landscapes” in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle’s perspective. *Landscape Ecology*, 3(2), 87–96. <http://doi.org/10.1007/BF00131172>
- Wilson, R. (2017). Impacts of Climate Change on Mangrove Ecosystems in the Coastal and Marine Environments of Caribbean Small Island Developing States (SIDS). *Caribbean Climate Change Report Card: Science Review, 2017*, 61–82.
- Woodcock, C. E., & Strahler, A. H. (1987). The factor of scale in remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 21(3), 311–332.
- Yáñez-Arancibia, A., & Day, J. W. (2010). La zona costera frente al cambio climático - Vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en manejo costero. *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*, 12–35.
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., Twilley, R. R., & Day, R. H. (2010). Los Manglares Frente Al Cambio Climático ¿Tropicalización Global Del Golfo De Mexico? *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*, (1998).
- Zaldívar, A., Jorge, J., Silveira, H., Teutli, C., Hernández, R., Juan, S., & Sosa, C. (2004). Manglares. *Biodiversidad*, 138–139.