



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Varación espacio-temporal de la urbanización y  
cobertura vegetal en el paisaje costero del Norte  
de Yucatán.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
BIÓLOGA

PRESENTA

ZAMORA RENDON ARANTXA



Director. Dr. Rodolfo Rioja Nieto  
Asesor Interno. M. en C. Faustino López Barrera

FEBRERO, 2016

MÉXICO, D. F.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Dedicatoria

A los papás Oscar y Renata porque  
ahora entiendo que no basta con querer,  
mi cariño y agradecimiento es infinito.

# Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de esta gran institución y pintar mi corazón azul y oro.

Al Dr. Rodolfo Rioja Nieto que ante cualquier duda, dificultad y contratiempo me apoyaste de una manera inigualable, gracias por aceptarme como tesista y compartir conmigo tus conocimientos a lo largo de este camino.

Al M. en C. Faustino López Barrera por darme un poco de tiempo en su apretada agenda, por aceptarme en mi último año de la carrera y enseñarme estereoscopia, (aunque creo que no aprendí a ver estereoscopia porque no me sorprendí la primera vez que ví las fotos aéreas), gracias por siempre compartir sus conocimientos de campo y ayudarme a mejorar esta tesis con sus valiosos comentarios

A los sinodales Dr. Eliseo Cantellano de Rosas, M. en C. María Beatriz Martínez Rosales y M. en C. Juan Manuel Valderrábano Gómez por su tiempo y comentarios que ayudaron mejorar este trabajo.

A mi papá por enseñarme lo bonito de la ciencia, sus experimentos y adentrarme en ese mundo desde pequeña, espero poder llegar a ser una persona e investigadora justo como tú lo eres. Y también poder hacerte sentir orgulloso, aunque sea un poquito en comparación de lo que yo siempre estoy de ti. Je t'aime

A mi mamá que siempre sin importar lo descabellado de mis ideas las apoyas con gran entusiasmo y cariño que me inspira a conseguir más.

A Sebas y Zoe por que se que sin ellos la vida sería triste y aburrida, este es un ejemplo de que siempre podemos ser felices sin importar lo difícil que sea el camino.

A los chavos Silvia y José por que son los abuelitos más buena onda y nunca dejan de creer en mí, son esenciales en mi vida.

A mis amigos Liz, Graciela, Lorena, Ale U. Mariela, Mariana, Natalia, Ximena y Gonz por que no somos las mismas personas este año que el pasado, ni tampoco las personas que quisimos cuando nos conocimos pero es una feliz casualidad que cambiando, sigamos queriendo a una persona cambiada.

A los mejores amigos que la Biología me pudo dar Lili, Jona, Kika, Fide, Yut, Toño y Sonia todo lo que pasamos juntos gracias a la coincidencia de la biología es el regalo más bonito, porque ahora los martes ya no significan lo mismo, ni las promesas si no estan escritas en una etiqueta o en una servilleta, siempre siempre en el corazón.

A mis amigos mas cercanos de Sisal Leslie, Chuy, Daniel y Ari, Vale y Javi, Viris y Miris, a los similares Mau, Martín y Ale, también a Erick, a todos gracias por ponerle felicidad a Sisal.

“Después de un sueño de cien millones de siglos hemos abierto al fin los ojos en un planeta suntuoso, de colores rutilantes y repleto de vida. Dentro de algunas décadas deberemos cerrarlos de nuevo. ¿Qué manera de invertir nuestro breve tiempo bajo el sol puede ser más noble y esclarecedora que trabajar para comprender el universo y nuestro despertar en él?”

*-Richard Dawkins, Destejiendo el Arco Iris.*



El presente trabajo fue desarrollado en las instalaciones de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación en Sisal, Yucatán de la Facultad de Ciencias de la UNAM en el marco del proyecto SEP-CONACyT 153599, gracias por la beca otorgada para la realización de esta tesis.



## ÍNDICE

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN .....	4
2. ANTECEDENTES.....	6
3. MARCO TEÓRICO .....	8
3.1. Variación espacio-temporal.....	8
3.2. Cobertura Vegetal .....	8
3.3. Biomas, paisajes, mosaicos y parches .....	8
3.4. Ecosistema Costero .....	9
3.5. Relación población y medio ambiente .....	10
3.6. Urbanización.....	11
3.7. Fragmentación del hábitat .....	13
3.8. Percepción Remota .....	16
3.9. Índices de Vegetación.....	18
3.10. Sistemas de Información Geográfica.....	20
3.11. Ordenamiento Ecológico Territorial .....	21
3.12. Áreas Naturales Protegidas .....	22
4. JUSTIFICACIÓN.....	25
5. HIPÓTESIS .....	26
6. OBJETIVO .....	27
6.1. Objetivo General.....	27
6.2. Objetivos Particulares.....	27
7. ÁREA DE ESTUDIO.....	28
7.1. Ubicación Geográfica y Fisiográfica .....	28
7.2. Características Físicas .....	29
7.2.1. Clima .....	29
7.2.2. Geología.....	29
7.2.3. Edafología .....	30
7.3. Vegetación.....	30
7.3.1. Manglar.....	31
7.3.2. Selva Baja Caducifolia .....	32
7.3.3. Selva Baja Espinosa Caducifolia .....	33
7.3.4. Selva Mediana Subcaducifolia .....	34
7.3.5. Selva Baja Subperennifolia .....	34

7.3.6.	Selva Mediana Subperennifolia .....	35
7.3.7.	Selva Baja Inundable.....	35
7.3.1.	Pastizal Inundable.....	36
7.3.2.	Tular .....	36
7.3.3.	Vegetación de Dunas Costeras .....	37
7.3.4.	Petenes .....	37
7.4.	Área de influencia de la REP .....	38
8.	METODOLOGÍA.....	39
8.1.	Pre-procesamiento de imágenes.....	39
8.2.	Procesamiento de las imágenes .....	40
8.2.1.	Clasificación No Supervisada .....	40
8.2.2.	Cobertura y Compactación de parches de vegetación.....	42
8.2.3.	Fragmentación y Agregación .....	42
8.2.4.	Delimitación del Área Urbana .....	42
8.2.5.	Análisis de Detección de Cambios .....	43
8.2.6.	Análisis de la variación del RVI entre los años comparados.....	43
9.	RESULTADOS.....	44
9.1.	Cobertura Vegetal de la Reserva Estatal “El Palmar” .....	44
9.2.	Compactación de los parches de vegetación .....	47
9.3.	Fragmentación y Agregación .....	50
9.4.	Cobertura Urbana.....	52
9.4.1.	Hunucmá.....	52
9.4.2.	Tetiz .....	53
9.4.3.	Sisal .....	53
9.5.	Análisis de Detección de Cambios .....	55
9.6.	Condición de la vegetación RVI .....	57
10.	DISCUSIÓN .....	59
10.1.	Cobertura vegetal y cobertura del área urbana .....	60
10.2.	Fragmentación, Agregación y Compactación .....	61
10.3.	Condición de la vegetación.....	63
11.	CONCLUSIONES.....	65
12.	BIBLIOGRAFÍA .....	67

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LA RESERVA ESTATAL “EL PALMAR” Y SU ÁREA DE INFLUENCIA.....	28
FIGURA 2. IMÁGENES MULTIESPECTRALES FALSO COLOR SPOT 5 UTILIZADAS EN EL ESTUDIO, A) ES LA IMAGEN DEL AÑO 2006 MIENTRAS QUE B) ES LA REFERENTE PARA EL AÑO 2014. © CNES 2006 Y 2014, PRODUCIDAS POR EL SIAP BAJO LICENCIA DE “SPOT IMAGE” .....	39
FIGURA 3. LA IMÁGENES A) MUESTRA LA NUBOSIDAD EN LA IMAGEN MULTIESPECTRAL DEL AÑO 2006 Y EN B) SE MUESTRA LA MISMA IMAGEN SIN NUBES © CNES 2006 Y 2014, PRODUCIDAS POR EL SIAP BAJO LICENCIA DE “SPOT IMAGE”. (COMBINACIÓN DE BANDAS 3, 2, 1, 4 ).....	40
FIGURA 4. COMPARACIÓN DE VEGETACIÓN EN LA RESERVA ESTATAL EL PALMAR PARA LOS AÑOS 2006 Y 2014.....	44
FIGURA 5. MAPA TEMÁTICO DE COBERTURA VEGETAL DEL AÑO 2006 PARA LA RESERVA ESTATAL EL PALMAR .....	45
FIGURA 6. MAPA TEMÁTICO DE COBERTURA VEGETAL DEL AÑO 2014 PARA LA RESERVA ESTATAL “EL PALMAR” .....	46
FIGURA 7. MEDIANA DE LA COMPACTACIÓN PARA LAS CLASES DE VEGETACIÓN: MANGLAR Y OTRA VEGETACIÓN EN LOS AÑOS 2006 Y 2014. LAS LÍNEAS REPRESENTAN EL CUARTIL SUPERIOR E INFERIOR PARA CADA TIPO DE VEGETACIÓN. *REPRESENTA UNA DIFERENCIA SIGNIFICATIVA ( $P < 0.05$ ) .....	47
FIGURA 8. MAPA TEMÁTICO DEL GRADO DE COMPACTACIÓN, LOS COLORES VERDES REPRESENTAN PARCHES MENOS COMPACTOS, MIENTRAS QUE LOS COLORES AMARILLO Y ROJO INDICAN UN MAYOR GRADO COMPACTACIÓN. ....	48
FIGURA 9. MAPA TEMÁTICO DE LA COMPACTACIÓN DE LOS PARCHES DE LA RESERVA ESTATAL “EL PALMAR” DEL AÑO 2014. EL COLOR VERDE INDICA PARCHES MENOS COMPACTOS, MIENTRAS QUE EL AMARILLO Y EL ROJO SE REFIEREN A PARCHES CON UN MAYOR GRADO DE COMPACTACIÓN .....	49
FIGURA 10 NÚMERO DE PARCHES CORRESPONDIENTES A LAS CLASES DE MANGLAR Y OTRA VEGETACIÓN PARA LA RESERVA ESTATAL “EL PALMAR” EN LOS AÑOS 2006 Y 2014. *REPRESENTA UNA DIFERENCIA SIGNIFICATIVA ( $P < 0.05$ ) .....	50
FIGURA 11. MEDIANA DE LOS VALORES DEL ÍNDICE ENN CALCULADO PARA LAS CLASES DE MANGLAR Y OTRA VEGETACIÓN EN LOS AÑOS 2006 Y 2014. LAS LÍNEAS REPRESENTAN EL CUARTIL SUPERIOR Y EL CUARTIL INFERIOR PARA CADA TIPO DE VEGETACIÓN. *REPRESENTA UNA DIFERENCIA SIGNIFICATIVA ( $P < 0.05$ ) .....	51
FIGURA 12. NÚMERO DE KILÓMETROS DE CALLES EN HUNUCMÁ .....	52
FIGURA 13. HECTÁREAS DE CASAS Y MANZANAS EN LA POBLACIÓN DE HUNUCMÁ .....	52
FIGURA 14. KILÓMETROS DE CALLES EN TETIZ .....	53
FIGURA 15. HECTÁREAS DE CASAS Y MANZANAS EN TETIZ.....	53
FIGURA 17. HECTÁREAS DE CASAS Y MANZANAS EN SISAL.....	54
FIGURA 16. KILÓMETROS DE CALLES EN SISAL.....	54
FIGURA 18. LA GRAFICA MUESTRA EL PORCENTAJE DE COBERTURA PARA CADA TIPO DE COBERTURA DE LOS AÑOS 2006 Y 2014. ....	55
FIGURA 19. EL MAPA PRESENTA LAS ZONAS DE GANANCIA Y PÉRDIDA DE LA VEGETACIÓN DE LA RESERVA ESTATAL “EL PALMAR” EN EL PERIODO DE 2006 A 2014. LAS TONALIDADES VERDES INDICAN UNA GANANCIA, LAS TONALIDADES ROJAS INDICAN UNA PÉRDIDA Y EL COLOR BLANCO DENTRO DEL POLÍGONO DE LA RESERVA DENOTA ÁREAS SIN CAMBIO. LOS PARES DE CLASE EN LA LEYENDA INDICAN EL CAMBIO DE UNA CLASE A OTRA CON RESPECTO AL TIEMPO. ....	56
FIGURA 20. MAPA TEMÁTICO DE LA CONDICIÓN DE LA VEGETACIÓN DE LA RESERVA ESTATAL “EL PALMAR” .....	58

## RESUMEN

El aumento del número de personas que viven en las comunidades costeras del Estado de Yucatán ha tenido como consecuencia la alteración del hábitat ocasionando una pérdida de biodiversidad y de los beneficios económicos y culturales asociados a los ecosistemas costeros. En este estudio se evaluó la variación de la cobertura vegetal y la urbanización en la Reserva Estatal “El Palmar” y su área de influencia, en un periodo de ocho años. Se construyeron mapas temáticos mediante técnicas de clasificación no supervisada con el software ERDAS (2010) utilizando imágenes SPOT 5 (con cuatro bandas) de los años 2006 a 2014. Los mapas temáticos se elaboraron utilizando cuatro clases Agua, Suelo sin vegetación y dos tipos de vegetación: Manglar y Otra Vegetación. A partir de los mapas se obtuvo la cobertura, fragmentación, compactación y agregación de las clases de vegetación.

Por otro lado, las imágenes satelitales también se utilizaron para digitalizar el área urbana de las poblaciones Hunucmá, Sisal y Tetz, ubicadas dentro del área de influencia del área protegida. Finalmente se calculó el índice de condición de la vegetación (RVI) y se utilizó un análisis de cambio espacio-temporal para determinar la variación en la condición de la vegetación.

Los análisis mostraron que la superficie de la cobertura de la clase de manglar y otra vegetación aumentó ( $p < 0.05$ ) en el tiempo de estudio. El número de parches para la clase manglar se incrementó mientras que para la clase de otra vegetación disminuyó ( $p < 0.05$ ). La compactación y la agregación de las clases manglar y otra vegetación muestran un aumento ( $p < 0.05$ ).

Por otro lado, se observó un aumento en el área total de la cobertura urbana para las tres poblaciones de influencia, principalmente Hunucmá incrementó 428.81 ha, en tanto los valores del RVI de la vegetación mostraron una disminución significativa ( $p < 0.05$ ) en la zona centro y norte de la reserva.

Los datos obtenidos no sugieren que la urbanización del área de influencia de la reserva sea un factor determinante que afecte la condición y disposición espacial de la cobertura vegetal.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cubierta vegetal juega un papel muy importante en el estado armónico de los ecosistemas, pues forma nichos ecológicos que sostienen otras formas de vida y brinda diversos servicios ambientales como limpieza de la atmósfera, suministro y regulación del ciclo del agua, conservación del suelo, y contribuye al equilibrio climático global (Sánchez y Rebollar, 1999).

La cobertura vegetal, los usos de suelo y la utilización antrópica que se hace del medio biofísico de un área constituyen la expresión conjunta de las plantas nativas o introducidas, todo ello representa una de las más importantes manifestaciones espaciales de los paisajes naturales y culturales de un territorio (Velázquez, *et al.* 2010).

En las últimas décadas, la investigación del uso de suelo y cambio de cobertura del hábitat, relacionados con el calentamiento global, debido a sus interacciones con el clima, procesos ecosistémicos, ciclos biogeoquímicos y biodiversidad. Así mismo, el papel de la actividad antropogénica en los cambios ambientales globales es de alta relevancia (López *et al.*, 2001; Aguilar *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2012).

La demanda de tierras para satisfacer las necesidades de una población mundial creciente ha impactado fuertemente a los ecosistemas naturales (Castillo, 2009). La magnitud de estos cambios a nivel global aún no se conoce con precisión pero se estima que de 39 a 50% de la superficie terrestre ha sido modificada por la acción humana y la deforestación es una de las transformaciones de la tierra más evidentes (Castillo, 2009).

La pérdida de la cobertura vegetal original genera impactos a diferentes escalas, a nivel local generalmente disminuye la oferta de bienes y servicios del bosque así como una pérdida de biodiversidad. La degradación de suelos, la pérdida de habilidad de los sistemas biológicos para soportar las necesidades humanas y el

incremento en la vulnerabilidad de regiones en situaciones de perturbaciones climáticas, son también repercusiones de su disminución (Castillo, 2009; Seingier *et al.*, 2009).

Debido a la aceleración de la urbanización global en cuanto a intensidad y área, existe un creciente interés en entender las implicaciones relacionadas con la pérdida de suelo, destrucción del hábitat, disminución de la cobertura de vegetación y variación del clima a escala local, regional y global (Mohan *et al.*, 2011).

En este sentido las técnicas de percepción remota que existen en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han utilizado ampliamente en la detección y monitoreo del cambio de cobertura vegetal a varias escalas con útiles resultados (Xiao *et al.*, 2006). Estas técnicas, también han sido utilizadas para investigar cambios ambientales y una gran parte de los datos proporcionados por las imágenes hacen posible a los investigadores analizar a escala espacio-temporal los cambios ambientales y los impactos de las actividades humanas (Wang *et al.*, 2012).

Con base en lo anterior, este trabajo explora por medio de técnicas de percepción remota y SIG la relación en el cambio de la cobertura vegetal de la Reserva Estatal “El Palmar”, Yucatán con la urbanización de la zona aledaña, en un periodo de ocho años.

## 2. ANTECEDENTES

La pérdida de la cobertura vegetal es uno de los eventos que produce problemas de erosión, salinización, y una pérdida de diversos servicios ambientales. Actualmente la percepción remota en conjunto con los SIG son herramientas usadas para estudiar el cambio en la cobertura vegetal y así evaluar y monitorear los recursos naturales.(Rosas *et al*, 2006)

En el Plan de Conservación de la eco-región los Petenes-Celestún-El Palmar, Acosta *et al.* (2010) caracterizaron la región encontrando que la franja costera de la península de Yucatán cuenta con la presencia de lagunas costeras y ciénegas que favorecen la presencia de diversas comunidades vegetales, entre estos, los distintos tipos de manglares, la vegetación de dunas costeras y una gran variedad de asociaciones de vegetación hidrófita, además de las selvas inundables y la selva baja caducifolia que colinda con ellas.

Moreno (2013) caracterizó el bosque de manglar en la Reserva Estatal “El Palmar” (REP) por medio de una clasificación supervisada y evaluó el efecto del Área Natural Protegida (ANP) en contraste con el área adyacente de desarrollo costero de Sisal. Para ello, consideró el área, la fragmentación y la compactación del paisaje. Y encontró que no existía un claro efecto de las acciones de manejo aplicadas en la REP en las características del paisaje de manglar.

En la propuesta del Plan de Manejo Paisajístico de la Reserva Estatal “El Palmar” que presenta Ponce de León (2016), con base en los sistemas de información geográfica y trabajo de campo se caracterizaron las condiciones bióticas, abióticas y sociales del área. En general, se observó que la REP posee buen estado de conservación.

La zona costera de Yucatán comprende una porción de la Península que es relativamente plana y no excede los ocho metros de altura sobre el nivel de mar.

En esta porción del territorio se han desarrollado importantes ecosistemas entre los que destacan una amplia plataforma marina sumergida, somera y de poca pendiente con camas de pastos marinos, algas y corales de los que dependen peces, moluscos y crustáceos; un litoral conformado por islas de barrera con playas de arena y vegetación de dunas; una extensa franja de manglares y lagunas entre las que se mezclan pastizales y petenes, con afloramientos de agua dulce y que constituyen el hábitat de peces, aves y mamíferos; así como una sabana con pastos y selva inundable que, junto con su fauna, complementan los paisajes costeros (Gobierno del Estado de Yucatán, 2012).

Esta porción del territorio comprende 23 de los 106 municipios del Estado de Yucatán, 13 de ellos con frente de playa y 10 municipios colindantes, en los cuales habitan alrededor de 117 mil personas. La zona presenta tasas demográficas por encima de la media estatal y nacional, con procesos de desarrollo que han impuesto una dinámica de deterioro ambiental muy evidente (Gobierno del Estado de Yucatán, 2012).

Para la REP este estudio constituye uno de los primeros trabajos realizados por medio de sistemas de información geográfica que evalúan el cambio de la cobertura vegetal existente en la reserva y su relación con la urbanización del área de influencia.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Variación espacio-temporal

Un proceso estocástico espacio-temporal varía en el espacio y depende del tiempo, existen numerosos procesos naturales que muestran una marcada estructura de variación espacio-temporal por ejemplo los niveles piezométricos de un acuífero o la concentración de una partícula contaminante determinada en la atmosfera (Fernández, 2005). De acuerdo a esto la variación espacio-temporal permite comprender los procesos dinámicos y eventos ocurridos en una determinada localización y tiempo específico (García, MJ., *et al*, 2009).

#### 3.2. Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre. La vegetación es la expresión fisonómica y estructural de la comunidad vegetal de un determinado sitio ante las condiciones que imperan en el ambiente (Durán y García, 2010).

En un país como México, con tanta variación fisiográfica, climática y biótica, las características más útiles para hacer una comparación y/o una clasificación de la vegetación son la fisonomía y la estructura de la misma (Rzedowski, 2006).

#### 3.3. Biomas, paisajes, mosaicos y parches

Un bioma es una clase o categoría que agrupa a todas las comunidades que presentan una estructura y organización semejante. En ellos habitan organismos con adaptaciones específicas que les permiten soportar las condiciones ambientales del lugar, entre las cuales el clima es un factor determinante. Los biomas se clasifican de acuerdo con el tipo de planta predominante. En función de cómo se clasifican los biomas hay al menos ocho tipos principales de biomas terrestres: Bosque templado, Bosque tropical, Bosque de coníferas, Sabana, Praderas templadas, Tundra, Chaparral y Desierto (Sharman, 2009; Smith y Smith, 2012).

Los paisajes son áreas terrestres heterogéneas compuestas de un conjunto de ecosistemas interactivos que se repiten en forma similar, a lo largo de un área dada. (Forman y Godron 1986).

Los mosaicos del paisaje son producto de los bordes definidos por cambios en la estructura física y biológica de distintas comunidades llamadas parches, que son los que forman estos elementos (Smith y Smith, 2012). Los mosaicos incluyen todos los elementos del paisaje parches, bordes y corredores.

Los parches son tipos de comunidades relativamente homogéneas que son distintos a partir de su borde tanto en la estructura como en la composición de las especies. Pueden variar en tamaño, forma y tipo y están inmersos dentro de un complejo mosaico de parches que lo rodean. Los parches que componen el mosaico son resultado de la interacción de varios factores ambientales tales como las variaciones en la geología, topografía, edafología y clima (Smith y Smith, 2012).

### 3.4. Ecosistema Costero

Una zona costera es el espacio geográfico donde interactúan los sistemas acuático, y terrestre con la atmósfera. En México está constituida por 17 estados (263 municipios) con frente litoral o influencia costera alta y media, y una porción marina definida a partir de la plataforma continental delimitada por la isóbata de los -200 m, más una porción insular representada por las islas oceánicas y costeras (Lara-Lara, J.R., *et al.* 2008; INEGI, 2010).

El paisaje costero está formado por un conjunto de elementos que se repiten, algunos de ellos particulares a las costas como son las playas, dunas y los manglares que rodean a una laguna o estuario; en la planicie de inundación, atrás de los manglares, se establecen los humedales de agua dulce y sobre tierra selvas o parcelas con potreros o sembradíos. Geográficamente, tanto la escala (kilómetros)

como las especies que conforman estos paisajes pueden cambiar, pero esta sucesión de elementos se continúa dando (Oyama y Catillo, 2006).

### 3.5. Relación población y medio ambiente

La naturaleza ha provisto a la humanidad de los recursos naturales necesarios para sobrevivir, pero el hombre no siempre ha realizado un uso eficiente de los mismos, dado que genera una gama de residuos que regresan al medio, produciendo una serie de modificaciones sobre el mismo, definidos como impactos (Reboratti, 2000). En este sentido, el impacto o presión que el hombre ejerce sobre el ambiente depende tanto del tamaño de la población como de la manera en la que se utilizan los recursos naturales y se generan los desechos que se vierten al ambiente (SEMARNAT, 2005).

SEMARNAT (2005) relaciona a la población con el ambiente al menos a través de tres procesos:

- I. El consumo directo de los recursos naturales (como el agua, las plantas y animales, el petróleo y los minerales)
- II. La generación de desechos sólidos, líquidos y gaseosos producto de diferentes actividades y que afecta el estado de los suelos, el agua, el aire y el de los ecosistemas naturales.
- III. La transformación directa de los ecosistemas para usos diversos como la creación de zonas urbanas, infraestructura turística y sistemas agropecuarios.

El uso de suelo es principalmente el resultado de las decisiones y actividades humanas sobre la tierra. De hecho las actividades humanas que surgen a partir de los múltiples objetivos sociales son la fuente inmediata del cambio de la cobertura de la tierra (Suzanchi *et al.*, 2011).

México ha seguido un estilo de desarrollo centralizado y tecnológicamente dependiente. Más allá de los costos económicos y sociales de esa dependencia,

las decisiones se han tomado sin prever los efectos de este modelo en el ambiente, que han llevado a desequilibrios urbano-regionales y a un uso desordenado del territorio y depredador de los recursos del país (Leff, 1990).

Las actividades antrópicas son un factor clave en la transformación del paisaje. Algunas son provocadas por prácticas específicas de manejo y otros por las fuerzas sociales, políticas y económicas que controlan los usos de suelo (Medley *et al.*, 1995; Pan *et al.*, 1999 citados por Rosete *et al.*, 2008). Los tipos de perturbación antrópica más frecuentes en el trópico sobre la cobertura vegetal lo representan la agricultura de roza-tumba-quema, la ganadería, los incendios forestales y la extracción de madera (Castillo, 2009).

En las zonas costeras ocurren actividades humanas que ejercen una fuerte presión sobre ambientes frágiles y de gran diversidad biológica, como la pesca y la acuicultura, la extracción de hidrocarburos y minerales, la transportación marítima y el turismo, el crecimiento urbano desordenado y la producción de contaminantes; todas ellas generan una gran presión en los ecosistemas (Lara-Lara, J.R, *et al.* 2008).

La Península de Yucatán no es la excepción en la problemática costera, los intensos cambios de los ecosistemas a lo largo de sus 1,250 km de costa han tenido lugar en los últimos 40 años, al igual que la población que reside en la costa cuyo número de habitantes ha crecido casi 4 veces de 1960 a 2000 (SEMARNAT, 2006).

### 3.6. Urbanización

Urbanización es el proceso de desarrollo de las ciudades y de concentración de la población en los núcleos urbanos. Esta implica la transformación de un espacio natural o rural en un espacio urbano, este proceso ha provocado en los últimos decenios tanto un incremento del número de ciudades como un incremento del número de personas que viven en ellas (Bertuzzi, 2005).

En la actualidad, existen distintos criterios adoptados en las oficinas nacionales de estadísticas del mundo para la cuantificación de lo rural y lo urbano, mismos que podemos sintetizar de la siguiente manera (INEGI, 2005):

- Demográfico. Se define lo rural a partir del tamaño de la localidad, aunque también, en algunos países, se llega a considerar la densidad de población o el agrupamiento de manzanas. En México es considerado el criterio de que son rurales los pobladores que viven en localidades de menos de 2500 habitantes.
- Político-administrativo. Que la localidad sea o no cabecera municipal o que, por decreto cuente con determinada categoría política (por ejemplo villa o ciudad), le otorgan el nivel de urbana o rural, independientemente de su tamaño poblacional.
- Económico. Que la localidad tenga determinando perfil económico (industrial, comercial, etc.) también puede definir su categoría en urbana o rural. Por ejemplo, para los Censos Económicos, el hecho de que en una pequeña localidad se asiente una ciudad industrial o una importante empresa económica la clasifica como urbana, aun cuando se trate de un pequeño poblado.
- De infraestructura y equipamiento urbano. La disposición de carreteras, el nivel de los servicios educativos, de salud y gubernamentales, la cobertura de agua potable y electricidad, la telefonía, así como los mercados, entre otros determinan, en muchos países la categoría urbana y rural de las localidades

Geográfico. En un sentido físico, la dispersión geográfica, además de la distancia de una localidad a carreteras y centros urbanos principales son aspectos que permiten categorizar lo rural; por su parte en el ámbito funcional, los vínculos de las localidades con los lugares centrales también hacen posible establecer la ruralidad con criterios de centralidad y

especialización en el contexto de la jerarquía de los lugares centrales o centros regionales.

### 3.7. Fragmentación del hábitat

La fragmentación es un proceso dinámico por el cual un determinado hábitat es reducido a fragmentos o islas de menor tamaño, que quedan embebidos en una matriz de hábitat degradado, diferente al original. Con efectos espaciales que pueden resumirse en tres (Valdés, 2011; Forman, 1995 citado por Castro, 2012):

- Disminución de la superficie de hábitat. Los procesos de fragmentación llevan asociados una pérdida de las cubiertas naturales en favor de usos antrópicos del territorio (urbanístico, industriales, infraestructuras, agricultura, etc).
- Reducción del tamaño de los fragmentos, por la división de superficies más o menos amplias en fragmentos de menor tamaño.
- Aislamiento de los fragmentos en el paisaje, provocada por una destrucción intensa de las superficies naturales aumentando los índices que miden la distancia al fragmento más próximo. Este efecto tiene un componente funcional importante ya que la matriz o área alterada puede ser más o menos permeable según las especies.

La fragmentación representa una de las principales causas de pérdida de la diversidad biológica dado que afecta la abundancia y distribución de las especies, y puede modificar la estructura genética de poblaciones de plantas y animales, con consecuencias potencialmente negativas para la persistencia de las mismas.

El proceso de fragmentación modifica las condiciones ambientales (discontinuidad en recursos) y el funcionamiento de los ecosistemas (procesos ecológicos), alterando el régimen hidrológico, el ciclo de los elementos minerales, el microclima y las propiedades del suelo, además de afectar la dispersión de semillas, polinización de las plantas, las relaciones de presa-depredador y la dispersión de parásitos entre otros. La fragmentación de un hábitat conduce a la reducción de

poblaciones sensibles a los intercambios y a los procesos de inmigraciones que se traducen en pérdida y/o el desplazamiento de la biodiversidad (Forman, 1995).

El proceso de fragmentación puede resultar de perturbaciones naturales y antrópicas, como la tala o construcción de caminos y redes de servicios (Tinker *et al.*, 1998 Heilman *et al.*, 2002 citados en Benzanilla, 2008). La mayoría de los paisajes altamente fragmentados son el producto de las actividades humanas (Mas, 2001). Sin embargo, también existen paisajes (ej. Petenes) que presentan una alta fragmentación natural.

La pérdida de hábitat normalmente está asociada a los efectos negativos derivados de las acciones antrópicas que conlleva a una modificación intensa del territorio y que se traduce en la disminución e incluso en la extinción de especies (Gómez *et al.*, 2005). Estos cambios se manifiestan mediante la pérdida de complejidad de las comunidades vegetales y animales, es decir, se produce una simplificación a consecuencia de la extinción de especies o poblaciones.

Con la fragmentación y destrucción de un hábitat se produce un cambio progresivo en la configuración del paisaje que puede definirse adecuadamente mediante las tendencias de cuatro variables paisajísticas que cambian simultáneamente y que tienen, en conjunto, una incidencia sobre la supervivencia de las especies afectadas (Saunders *et al.*, 1991; Andrén, 1994; Fahring, 2003):

- Una pérdida regional en la cantidad de hábitat, con la consiguiente reducción del tamaño de las poblaciones de los organismos afectados.
- Una disminución del tamaño medio y un aumento del número de los fragmentos de hábitat resultantes. Esta tendencia reduce progresivamente el tamaño de las poblaciones mantenidas por cada uno de los fragmentos.
- Un aumento de la distancia entre fragmentos, con la consiguiente dificultad para el intercambio de individuos entre las poblaciones aisladas.
- Por último, se produce una disminución de la relación área/perímetro y, por consiguiente, una mayor exposición del hábitat fragmentado a perturbaciones

procedentes del medio periférico, conocido genéricamente como “matriz”. Se da así un creciente efecto de borde que origina un deterioro de la calidad del hábitat en regresión, afectando a la supervivencia de las poblaciones alojadas y distribuidas en los fragmentos.

Debido a esto el monitoreo de las coberturas terrestres es un tema de suma importancia en los ámbitos gubernamentales, académico y social por las implicaciones que tienen los cambios de las coberturas y usos de suelo en temas como sustentabilidad, riesgos, conservación de la biodiversidad y servicios ambientales (García y Mas, 2008).

La relación entre la fragmentación y la pérdida de biodiversidad es un elemento fundamental para el manejo de las áreas protegidas ya que muchas veces la conservación de las biotas regionales depende de la vegetación nativa (Mas, 2001). La fragmentación de un hábitat puede medirse cuantificando cambios en la estructura espacial del paisaje, lo cual se refiere a la relación espacial entre parches y fragmentos (Altamirano, 2007).

Con el fin de caracterizar los patrones de fragmentación, se han desarrollado herramientas matemáticas, llamadas índices de fragmentación, que permiten evaluar algunos aspectos de la fragmentación como el tamaño, forma, diversidad, distribución espacial y los grados de aislamiento y de conectividad de los parches (Mas, 2001; Garmendia, 2012; Viña y Estéves, 2013; Coronado, 2014; Wang *et al.*, 2014).

Un programa ampliamente utilizado para el cálculo de distintos índices para definir los patrones de fragmentación de los parches es FRAGSTATS. Este programa fue desarrollado por McGarigal y Marks en 1995 y actualmente se encuentra en la versión 4.2.

Mas (2001), menciona las siguientes ventajas en su utilización:

- \* Es un programa comprobado.
- \* Permite el cálculo de un gran número de índices.
- \* Es compatible con Sistemas de Información Geográfica.
- \* Es software de libre acceso.

Este programa fue utilizado en este trabajo para calcular el grado de fragmentación, el número de parches y distancia euclidiana al vecino más cercano (debido a que es la medida más simple para medir el aislamiento de los parches) de la cobertura vegetal presente en la REP en el periodo de 2006-2014.

### 3.8. Percepción Remota

La teledetección o percepción remota es la ciencia de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas aéreas (Chuvienco, 2002).

La percepción remota ofrece conjuntos de datos espacialmente coherentes que cubren grandes áreas con alto nivel de detalle y alta frecuencia temporal. Desde 1960, la percepción remota provee series temporales de datos de manera consistente (Xiao *et al.*, 2006). A partir de finales de los años 70's las imágenes satelitales comienzan a estar disponibles para aplicaciones civiles.

La importancia de la percepción remota se enfatiza en que es una “única vista” de la dinámica espacio-temporal del proceso del crecimiento urbano y del cambio de uso de suelo (Herold *et al.*, 2003).

Las imágenes obtenidas a través de sensores remotos cuentan con diferentes tipos de resolución (INEGI, 2015):

- \* Espacial: El área de un terreno que representa un pixel.
- \* Espectral: Rangos específicos de longitud de onda en el espectro electromagnético que abarca un sensor.
- \* Radiométrica: Cantidad de valores posibles que pueden almacenar o registrar un sensor.

- \* Temporal: Frecuencia en la que un sensor obtiene datos de una misma área.

La aparición de nuevos sensores remotos satelitales con mejor resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (Ikonos, QuickBird, SPOT, WorldView-2), mantienen la posibilidad de usar esa tecnología para el manejo de recursos forestales, especialmente cuando hay restricciones de tiempo y de personal para el trabajo de campo (Valdez, *et al.* 2006).

La constelación Spot (por sus siglas en francés significa: Satélites para la Observación de la Tierra) son una serie de satélites diseñados y puestos en órbita por el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) de Francia, con apoyo de Suecia y Bélgica, y operados por la empresa Spot Image (Miranda, 2011).

Desde 1986 se han lanzado 6 satélites SPOT (el último, SPOT 6, puesto en órbita en el 2013) proporcionando imágenes de media ( $> 5$  m) y alta resolución espacial ( $< 5$  m) de la superficie de la Tierra. Una de las ventajas del sistema SPOT, es su alta capacidad de recepción y procesamiento de imágenes en distintos puntos del planeta, pues cuenta con un total de 43 estaciones distribuidas entre los 5 continentes (INEGI, 2010).

Las imágenes satelitales de alta resolución de la plataforma SPOT son de gran ayuda para estimar variables continuas a escala de paisaje, a pesar de las dificultades causadas por la frecuente nubosidad en las regiones tropicales. Comparado con los sensores activos (ej. radar), las imágenes satelitales proporcionan más información para estimar variables de la estructura de la vegetación.

En este trabajo se utilizaron imágenes proveniente de la plataforma SPOT 5, la cual se caracteriza por su alta y mediana resolución espacial (2.5 m, 5 m, 10 m o 20 m) y por el modo espectral de adquisición: multiespectral (rojo, verde, cercano al

infrarrojo e infrarrojo de onda corta) y pancromática. Tienen una resolución radiométrica de 8 bits, en cuanto a su resolución temporal se toma una imagen de la misma área cada 26 días y la cobertura de cada imagen es de 60 km X 60 km.

En la percepción remota las superficies terrestres se diferencian por su comportamiento espectral, las diferencias dependen de una cantidad de factores ligados primeramente a las características químicas, estructurales y funcionales de las superficies. La reflectancia de una superficie tendrá un comportamiento diferente dependiendo de la longitud de onda que se trate (Coutiño, 2013).

La percepción remota es un medio de supervisión de uso de la tierra a alta resolución temporal y costos más bajos que los asociados con el uso de métodos tradicionales. Por lo tanto permite calcular con precisión las distintas categorías de cobertura y uso de suelo además de que ayuda en el mantenimiento de los datos espaciales de la infraestructura que es importante para el monitoreo de la expansión urbana y los estudios de detección de cambios (Belal y Moghanm 2011). Para regiones tropicales inaccesibles, tales métodos son particularmente atractivos por lo que han sido el propósito de varios estudios.

### 3.9. Índices de Vegetación

En la década de los 60 se inicia el desarrollo de indicadores relativos a la actividad vegetal, y en la década de los 70 se lleva a cabo el inicio de sus aplicaciones. En estas etapas, los índices de vegetación (IV) comenzaron a ser validados en diversos experimentos, hasta volverse de uso generalizado y operativo en el monitoreo del ambiente, tanto a niveles globales, continentales y regionales como en aplicaciones locales y hasta nivel de manejo de lotes y parcelas (Hernández, 2015).

Hernández (2015) menciona que actualmente se han logrado extensos avances en esta materia estableciéndose robustas relaciones entre los índices de vegetación y parámetros biofísicos como son la producción de biomasa, el desarrollo del

coeficiente de cultivo, la evapotranspiración, la fracción de cobertura, así como otros parámetros como son el albedo, radiación fotosintéticamente activa, la temperatura superficial, etc.

De forma genérica se podría definir un índice de vegetación (IV) como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la estructura y condición de la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Abaurrea, 2013). Los índices de vegetación resultan de normalizar, mediante un cociente, bandas de imágenes satelitales y permiten discriminar dos cubiertas con diferentes comportamientos como suelo y vegetación. Para diferenciar masas vegetales a partir de estos índices, se utiliza la característica de la firma espectral de la vegetación sana al mostrar un claro contraste entre las bandas visibles (0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1  $\mu\text{m}$ ) (Chuvieco, 1998).

El 90% de la información relativa a la vegetación está contenida en las bandas roja (R) e infrarrojo cercano (IRC). Por lo tanto, varios autores definen los índices de vegetación (IVS) restringiéndolos a combinaciones de estas dos bandas solamente: la roja, fuertemente correlacionada con el contenido en clorofila y la infrarroja, controlada por el LAI (leaf area index o índice de superficie foliar) y la densidad de vegetación verde (Wiegand *et al.*, 1991; Bannari *et al.*, 1995 citado por Gilabert, 1997; Abaurrea, 2013).

Cabe señalar que la reflectividad de una superficie puede ser perturbada por la acción de factores externos a la misma. Se pueden mencionar principalmente los relacionados con la configuración de la observación y la iluminación, así como la presencia de la propia atmósfera (Gilabert *et al.*, 1997).

Los índices basados en la pendiente son combinaciones aritméticas simples que se concentran en el contraste entre los patrones de respuesta espectral de la

vegetación en las porciones roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético. Entre los índices basados en la pendiente se encuentran el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Transformado (TVI), Índice de Vegetación Transformado Corregido (CTVI), Índice de Vegetación Cociente (RVI), Índice de Vegetación de Cociente Normalizado (NRVI) (Abaurrea, 2013).

### 3.10. Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica es un sistema compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y representar datos georreferenciados. Las funciones básicas de un SIG son el almacenamiento, análisis, visualización, y consulta de datos espaciales, mientras que una aplicación más avanzada sería la utilización de un SIG para la toma de decisiones o para la modelación de procesos o posibles escenarios (Coutiño, 2013).

Los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura del suelo y la deforestación son importantes y necesarios porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Velázquez *et al.*, 2010).

Durante las últimas décadas, los avances en el desarrollo de la Percepción Remota e Informática han posibilitado la gestión de los recursos naturales, beneficiando principalmente a la Geología, Ecología Vegetal y Edafología con la información numérica de imágenes satelitales que cubren amplias extensiones y abarcan más allá del dominio visible del espectro electromagnético (Maya *et al.*, 2004).

La percepción remota en combinación con los SIG se han convertido en una herramienta fundamental y universal para los gerentes de los recursos naturales e investigadores de los organismos gubernamentales, organizaciones de conservación y las industrias (Philipson y Lindell 2003;. Stow *et al.*, 2004;. Gross *et al.*, 2006;. Kennedy *et al.*, 2009;. Rioja-Nieto *et al.*, 2013).

La capacidad de mapear la dinámica temporal de cambios en el paisaje representa una valiosa herramienta para hacer frente a uno de los temas más críticos en la conservación biológica: evaluar el efecto de la escala temporal de la respuesta de la biodiversidad a la transformación del paisaje actual (Foster, 2002).

El monitoreo de las coberturas terrestres es un tema de suma importancia en los ámbitos gubernamentales, académico y social por las implicaciones que tienen los cambios de las coberturas y usos de suelo en temas como sustentabilidad, riesgos, conservación de la biodiversidad y servicios ambientales. En el ámbito de los estudios territoriales, la percepción remota y los SIG, al ser capaces de obtener estos datos de manera ágil y a bajo costo, se han convertido en tecnologías fundamentales en el desarrollo de la geografía moderna (García y Mas, 2008).

### 3.11. Ordenamiento Ecológico Territorial

La Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, en sus artículos 25, 26 y 27, establece los principios de planeación y ordenamiento de los recursos naturales en función de impulsar y fomentar el desarrollo productivo con la consigna de proteger y conservar el medio ambiente. Considera además, la participación de los diversos sectores de la sociedad y la incorporación de sus demandas en el plan y los programas de desarrollo.

En este sentido, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) es reglamentaria de las disposiciones constitucionales en lo relativo a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección del ambiente en el territorio nacional y en las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción; sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable.

El ordenamiento ecológico (OE) se define jurídicamente como:

"El instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos". (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Título Primero, Art.3 fracción XXIII).

Al igual que otras naciones, en México las estrategias de desarrollo para áreas costeras dependen de la transformación del ambiente natural a uno urbano o industrial, la cual se realiza a costa de ignorar el potencial agrícola de la tierra, la alta productividad de los humedales costeros y de los ecosistemas marinos someros (Pernneta y Elder 1993). Asimismo, la falta de experiencia y la carencia de instituciones para planear el desarrollo a nivel regional y local, han contribuido a un deterioro ambiental y a un agotamiento paulatino de los recursos disponibles en dichas porciones del territorio nacional (Kay y Alder 1999).

### 3.12. Áreas Naturales Protegidas

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP's), son porciones del territorio nacional, terrestre o acuáticas, representativas de los diferentes ecosistemas en donde el ambiente original no ha sido modificado en su esencia por la actividad del hombre y que están sujetas a regímenes de protección, conservación, restauración y desarrollo (CONANP, 2015).

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas administra actualmente 176 áreas naturales de carácter federal que representan más de 25, 394, 779 ha y están divididas en Nueve Regiones del país.

- Península de Baja California y Pacífico Norte
- Noroeste y Alto Golfo de California
- Norte y Sierra Madre Occidental
- Norte y Sierra Madre Oriental
- Occidente y Pacífico Centro
- Centro y Eje Neovolcánico
- Planicie Costera y Golfo de México
- Frontera Sur, Istmo y Pacífico Sur
- Península de Yucatán y Caribe Mexicano.

En México existen diversos tipos de áreas protegidas: federales estatales, municipales, comunitarias, ejidales y privadas (CONABIO, 2015).

A nivel Federal, existen seis categorías de áreas naturales protegidas (tabla 1).

Tabla 1. Categorías de ANP's de carácter Federal en México (obtenido de CONABIO, 2015)

Categoría	Número	Extensión km <sup>2</sup>
Reserva de la Biosfera	41	126,527.87
Parques Nacionales	67	14,453.01
Monumentos Naturales	5	162.68
Áreas de Protección de Recursos Naturales	8	44,400.78
Áreas de Protección de Fauna y Flora	37	66,872.84
Santuarios	18	1,462.54
	<b>176</b>	<b>253,879.72</b>

Por lo que se refiere a las áreas naturales protegidas estatales por lo menos 22 estados cuentan con decretos para la protección de áreas bajo la administración de secretarías o institutos ambientales de los gobiernos de los estados.

Durante los pasados 10 años varias comunidades indígenas y ejidos han establecido áreas comunitarias protegidas por motivos que van desde la protección y

mantenimiento de los recursos naturales, o poblaciones de especies particulares hasta por fines religiosos. Actualmente existen más de 150 áreas comunitarias o ejidales protegidas (CONABIO, 2015).

#### 4. JUSTIFICACIÓN

En el Estado de Yucatán, el número de personas que habitan en las comunidades costeras aumentó de 27,000 en 1970 a 1, 955,577 en el año 2010 (INEGI, 2010). La mayoría de esta población se estableció sobre las islas de barrera y en las zonas de manglar y ciénegas, lo cual fue acompañado por un extensivo proceso de urbanización. (Herrera-Silvera, 2006).

Ante el avance poco regulado de la población hacia las zonas costeras, es fundamental obtener información adecuada sobre el patrón de urbanización y su efecto en los ecosistemas. De tal manera, esto permitirá proponer estrategias de manejo y conservación que aseguren la persistencia de los ecosistemas y por lo tanto de los servicios ambientales que proporcionan. La percepción remota y las técnicas de procesamiento digital de imágenes, proveen a los investigadores y a los tomadores de decisión, de herramientas poderosas para generar, procesar y analizar información espacial y temporal que ayude al manejo de la zona costera.

## 5. HIPÓTESIS

El cambio en la extensión de las áreas urbanas implica la transformación del paisaje, reduciendo las áreas de vegetación natural por lo tanto, si en la Reserva Estatal “El Palmar” existe aumento en la urbanización de la zona aledaña se encontrara una pérdida en su cobertura vegetal natural.

## 6. OBJETIVO

### 6.1. Objetivo General

- Caracterizar la variación espacio temporal del área urbana costera y su relación con el cambio en la cobertura vegetal en la Reserva Estatal “El Palmar”.

### 6.2. Objetivos Particulares

- Generar mapas temáticos de la cobertura vegetal de la Reserva Estatal “El Palmar” mediante la clasificación no supervisada de imágenes SPOT 5 correspondientes a los años 2006 y 2014.
- Generar mapas temáticos del área urbana de las poblaciones de Sisal, Tetíz y Hunucmá mediante el análisis de imágenes satelitales SPOT 5 correspondientes a los años 2006 y 2014.
- Determinar la variación espacio-temporal en la cobertura, fragmentación, agregación y compactación de la vegetación y área urbana entre el periodo de estudio.
- Describir la variación en la condición de la vegetación de 2006 a 2014.

## 7. ÁREA DE ESTUDIO

El área natural protegida denominada Reserva Estatal “El Palmar”, comprende una extensión total de 49, 605.39 ha, de las que 40,163.28 corresponden a la zona continental.

### 7.1. Ubicación Geográfica y Fisiográfica

Está ubicada en la costa noroeste del estado de Yucatán (figura 1). Esta Área Natural Protegida colinda al Oeste con la Reserva de la Biosfera Ría Celestún y al Este con el Puerto de Sisal y la Reserva Estatal de reciente creación Ciénegas y Manglares de Yucatán. Forma también parte del corredor interior de la costa norte de Yucatán (que une a las reservas de Celestún y Ría Lagartos) incluido dentro del Corredor Biológico Mesoamericano (Ramírez, 2003; Chablé, 2009).



La REP se encuentra ubicada en la subprovincia de la Península de Yucatán la cual está constituida por la península de Yucatán, es casi plana y está cubierta por calizas del Mioceno y Eoceno. La península se caracteriza por su topografía kárstica y la ausencia de ríos superficiales, en el SE es donde abundan los cenotes y las corrientes subterráneas (Alvaréz, 1958).

## 7.2. Características Físicas

### 7.2.1. Clima

El área de la Reserva Estatal El Palmar es una zona de transición climática, correspondiente al subtipo BSi (h') W, cálido seco, con un régimen de lluvias de verano y una precipitación invernal entre 5 y 10% (Duch, 1988). La temperatura promedio anual para la zona es de 26°C, temperatura máxima promedio alrededor de 36°C y se presenta en el mes de mayo, la temperatura mínima promedio es de 16°C y se presenta en el mes de enero (INEGI, 2015). La precipitación promedio anual es de 600 mm y la evaporación de 1682 mm (CONABIO, 2015).

La época de lluvias se presenta de mayo a octubre, mientras que de noviembre a abril se considera la época de secas (Vázquez-Lule y Díaz Gallegos, 2009).

### 7.2.2. Geología

En términos geológicos, el subsuelo del estado de Yucatán está constituido por una secuencia de sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario Reciente, y ha estado bajo subsidencia lenta pero continua. El Cuaternario aflora hacia las zonas costeras y corresponde a depósitos calcáreos expuestos después de una ligera emersión de la península (Durán y Méndez, 2010).

La porción septentrional de Yucatán está formada en su mayor parte por calizas del Plioceno. La estructura geológica de la Península de Yucatán fue determinada por dos eventos principales: durante el Eoceno se desarrolló un proceso de compresión que plegó las conformaciones y produjo un relieve ondulado en la porción sur de la Península. El otro evento tuvo lugar en el Mioceno y el Plioceno

y dió origen a dos sistemas de fracturas orientadas NE-SW y NW-SE, ésta última denomina la “Sierra de Ticul” (Bautista *et al.*, 2006 en DOF).

### 7.2.3. Edafología

El suelo en la región es de características calizo-cársticas de gran permeabilidad y sujetas a constante erosión, con terrenos pobres para las actividades agrícolas debido a su poca profundidad y el exceso de sales (Duch, 1988). Todos los suelos que se encuentran dentro de la Reserva Estatal El Palmar pertenecen al orden Azonal, lo que significa que el desarrollo de su perfil es incipiente y que están sujetos a un movimiento continuo de material por la acción de vientos, flujo laminar de agua pluvial e inundación por mareas. Dentro del orden Azonal tenemos Regosoles y Solonchac, así como algunos Histosoles y Gleysoles que comparten una marcada influencia marina; desde la matriz mineral arenosa formada en su mayor parte por residuos de conchas o coralinos hasta la elevada concentración de sales solubles que resulta de los movimientos de aguas en el interior del perfil y a la alta proporción de sales solubles en los mantos freáticos más superficiales. A excepción de los suelos arenosos profundos o Regosoles, los demás presentan un drenaje deficiente y excesiva salinidad, predominando los terrenos planos, bajos e inundables (DOF; Vázquez-Lule y Díaz-Gallegos, 2009).

### 7.3. Vegetación

Desde el punto de vista florístico, la vegetación de la Reserva Estatal El Palmar se reconoce como compleja y diferente al resto del Golfo de México, destacando la presencia de especies de afinidad antillana y especies endémicas a la Península de Yucatán (Durán García *et al.*, 2005 en DOF).

La descripción de las características de la vegetación dentro del área natural de la Reserva Estatal “El Palmar” se basó en el trabajo de Duran (2010) y se describe a continuación.

### 7.3.1. Manglar

Se conoce bajo este nombre una comunidad vegetal ampliamente distribuida en los litorales de las regiones calientes de la Tierra. Prospera principalmente en las orillas de las lagunas costeras, de bahías protegidas y desembocaduras de ríos, en donde hay zonas de influencia de agua de mar. Ocasionalmente se le puede encontrar más tierra adentro. Típicamente para su desarrollo el manglar necesita de un suelo profundo de textura fina y de agua salina tranquila o estancada. Soporta cambios fuertes de nivel de agua y de salinidad, pero no se establece en lugares rocosos o arenosos, ni en áreas sometidas a fuerte oleaje.

El manglar es una formación leñosa, densa, frecuentemente arbustiva o bien arborescente, de 2 a 25m de altura, compuesta de una o de unas cuantas especies de fanerógamas, prácticamente sin plantas herbáceas y sin trepadoras, rara vez con alguna epífita o parásita. Las especies que lo componen son de hoja perenne, algo suculenta y de borde entero. El sistema radical de algunas especies presenta raíces zancas y neumatóforos que cumplen la función de sostén en el fondo lodoso y de respiración radical, pues el substrato es muy pobre en oxígeno. Estas estructuras le proporcionan al manglar una fisionomía muy especial. Otras características de los componentes de esta comunidad son la alta presión osmótica de sus tejidos y la frecuente viviparidad, de manera que los propágulos consisten ya de plántulas y así el periodo crítico de la germinación puede llevarse a cabo fuera del medio salino.

En el mundo se reportan alrededor de 70 especies de mangle, mientras que para México seis especies de manglares están registradas, cuatro son comunes: el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), el mangle blanco (*Languncularia racemosa*), el mangle prieto (*Avicennia germinans*) y el mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), mientras que en las costas de Chiapas también se registra la presencia de otras dos especies (*Avicennia bicolor* y *Rhizophora harrisonii*).

Los manglares de México representan el 5% del total mundial y colocan al país en el cuarto lugar de los 125 países y territorios que poseen este ecosistema, tan solo por debajo de Indonesia (31 894 km<sup>2</sup>), Brasil (13 000 km<sup>2</sup>) y Australia (9 910 km<sup>2</sup>).

Este ecosistema es una zona de transición entre los sistemas terrestres y marinos y frecuentemente existe una conectividad entre los manglares, los pastos marinos y los arrecifes de coral que permite el flujo de las especies que viven en ellos.

### 7.3.2. Selva Baja Caducifolia

Es una selva de menos de 15 m. de altura media de los árboles altos que pierden casi completamente las hojas en la época seca y no son espinosos por lo común; posee ordinariamente abundantes bejucos. Corresponde a climas semisecos o subsecos y cálidos, con temperatura media anual superior a 20° C., precipitación anual media entre 700 y 1,200 mm. Se encuentra en gran parte del Estado de Yucatán (zona henequenera).

Presenta numerosas variantes en las grandes extensiones que cubre. En Yucatán central son dominantes el jabón (*Piscidia piscipula*) y el tsalam (*Lysiloma bahamensis*). En la gran mayoría de los casos es bastante fácil distinguir el bosque tropical caducifolio de las demás comunidades vegetales, tanto por su fisonomía y fenología peculiares, como por su composición florística y por sus requerimientos ecológicos. Este tipo de vegetación se desarrolla en México entre 0 y 1 900 m de altitud, más frecuentemente por debajo de la cota de 1 500 msnm.

En la parte septentrional de la península de Yucatán existía, sobre amplias superficies, un bosque tropical caducifolio, del cual hoy quedan muy pocos vestigios, debido a las actividades humanas, que convirtieron casi todo en cultivos y en vegetación secundaria de tipo de bosques o matorrales espinosos. A base de vestigios del bosque primitivo y de otros indicios es que se conoce la composición florística, siendo las especies dominantes *Lysiloma bahamensis*, *Piscidia piscipula*.

Otros árboles abundantes eran *Alvaradoa amorphoides*, *Bursera simaruba*, *Cedrela mexicana*, *Chlorophora tinctoria*, *Cordia gerasacanthus*, *Ehretia mexicana*, *Gyrocarpus americanus*, *Lonchocarpus rugosus*, *Neomillspaughia emarginata*, *Simarouba glauca* y *Trichilia hirta*.

En la franja costera de Yucatán existe otro tipo de bosque caducifolio que es más bajo (6 a 15m de alto) y de aspecto más xerófilo, pues incluye cactáceas candelabrifformes. Como el anterior, se desarrolla sobre terrenos planos o casi planos, pero con suelo somero. Los siguientes árboles son frecuentes: *Bursera simaruba*, *Caesalpinia vesicaria*, *Ceiba aesculifolia*, *Chlorophora tinctoria*, *Diospyros cuneata*, *Guaiacum sanctum*, *Hampea trilobata*, *Metopium brownei*, *Parmentiera aculeata*, *Piscidia piscipula*.

La sucesión secundaria en las áreas correspondientes al bosque tropical caducifolio varía notablemente de una parte del país a otra y también presenta diferencias según el tipo de perturbación que actúa. Sin embargo, dentro de una región determinada se pueden distinguir algunas secuencias bastante claras y características, para Yucatán como secundario y sucesor del bosque tropical caducifolio, se conoce a un bosque espinoso de 5 a 10 m de alto, que se establece como resultado de la agricultura semi-nómada practicada en esa región.

### 7.3.3. Selva Baja Espinosa Caducifolia

Se desarrolla sobre suelos muy someros con grandes afloramientos rocosos en forma de lajas y alta pedregosidad, lo que determina en gran medida sus condiciones de extrema aridez durante una gran parte del año.

Es una comunidad arbórea de escasa altura, cuyos árboles mayores apenas alcanzan de 8 a 9 m de altura y el dosel general de la selva tiene en promedio 5 o 6 m de altura. Este dosel se caracteriza por ser muy abierto y discontinuo, con grandes espacios donde sobresalen los afloramientos de roca caliza y en los que sólo pueden establecerse algunas hierbas y pequeños arbustos.

Es una comunidad muy diversa desde el punto de vista florístico, además de que en ella confluyen numerosas especies de plantas endémicas del estado. Entre las especies arbóreas más comunes se encuentran: *Bursera simaruba*, *Caesalpinia gaumeri*, *Acacia pennatula*, *Metopium brownei*, *Caesalpinia yucatenensis*, *Havardia albicans* *Diospyros cuneata* y *Pithecellobium dulce*.

#### 7.3.4. Selva Mediana Subcaducifolia

Este tipo de comunidades se extiende como una amplia franja que se origina en la parte nororiental del estado de Yucatán, se distribuye en climas cálidos subhúmedos con lluvias en verano; la precipitación oscila entre 1078 y 1220 mm al año. Se desarrolla sobre suelos pedregosos, pero que contienen una delgada capa de materia orgánica, como sucede con la vegetación que cubre la Sierra de Ticul, y las depresiones del terreno en las que se registran lugares con una significativa acumulación de materia orgánica.

Entre las especies características de esta selva se encuentran los árboles más corpulentos de la flora de Yucatán: *Enterolobium cyclocarpum*, *Ceiba pentandra*, y algunas especies de *Ficus*. Entre las especies de árboles más comunes están: *Acacia cornígera*, *Annona reticulata*, *Bucida buceras*, *Cedrela odorata*, *Cochlospermum vitifolium*, *Trema micrantha* y *Vitex gaumeri*.

#### 7.3.5. Selva Baja Subperennifolia

Presenta muchas variantes, pero con frecuencia se caracterizan por la presencia de árboles como los que se encuentran en las sabanas: nanche (*Byrsonima crassifolia*), tachicón, cacaíto y hojamán (*Curatella americana*), jícaro (*Crescentia cujete*) del lado del Golfo de México, cirián o cuautecomate (*Crescentia alata*).

Por lo común este tipo de selva se desarrolla sobre suelos profundos con drenaje deficiente, de tal manera que se empapan de agua en la época de lluvias y se secan completamente en la época de estiaje. En la Península de Yucatán suelen hallarse en relación con hondonadas de suelos profundos, margosos, llamadas "bajos", que se inundan periódicamente.

### 7.3.6. Selva Mediana Subperennifolia

Se caracteriza por la pérdida de hojas, principalmente en la época de secas, en alrededor del 25-50% de los árboles que la conforman. Este tipo de selva cubre áreas extensas con clima cálido (temperatura media anual superior a 20° C) y subhúmedo (precipitación anual media poco superior a 1,200 mm.) con algunas lluvias en la temporada seca que es más marcada que en las zonas de selva perennifolia.

Una gran extensión de este tipo de selva se encuentra en la Península de Yucatán, donde abarca buena parte del Estado de Campeche y del Territorio de Quintana Roo. El árbol dominante en esta zona es el zapote o chicozapote (*Achras zapota*), al que se asocian con frecuencia la caoba (*Swietenia macrophylla*), el pucté (*Bucida buceras*), el ramón (*Brosimum alicastrum*) y otras especies. Esta clase de selva se desarrolla generalmente sobre suelos de caliza pulverizada "sahcab" en regiones poco habitadas y cultivadas, explotándose sobre todo productos forestales como caoba y chicle (*Manilkara zapota*).

### 7.3.7. Selva Baja Inundable

Se distribuyen en forma de manchones dispersos al interior de las selvas medianas y bajas. Son comunidades constituidas por pocas especies debido a la prolongada inundación de la época lluviosa que se combina con la extrema sequía del suelo durante el periodo de secas, lo que impone condiciones restrictivas para el desarrollo y crecimiento de numerosas especies de plantas. Los árboles no sobrepasan los 10 m de altura, presentan troncos retorcidos y muchos de ellos presentan espinas. Las especies arbóreas que se encuentran con mayor frecuencia son *Haematoxylum campechianum*, *Cameraria latifolia*, *Metopium brownei*. En el estrato arbustivo destacan *Dalbergia glabra*, *Jacquinea macrocarpa*, *Bravaisia berlandieriana*, *Helicteris baruenensis* y *Malvaviscus arboreus*. La altura del estrato arbóreo en esta vegetación es de entre 5 y 7 m. y el estrato arbustivo llega a 2 m de alto en la parte cercana al manglar.

### 7.3.1. Pastizal Inundable

Este tipo de vegetación, comúnmente llamado sabana, se caracteriza por la presencia dominante de pastos (gramínea y ciperácea) que se conjugan con algunos individuos dispersos de especies arbóreas. Ocupa sitios de suelos profundos, arcillosos, que se inundan en la época de lluvia. Las especies más comunes son: *Cladium jamaicensis*, *Phragmites australis*, *Eleocharis cellulosa*, *Cyperus rotundus* y *Hymenocallis littoralis*. Las especies arbóreas presentes son *Byrsonima bucidaefolia* y *Crescentia cujete*.

Este tipo de vegetación se encuentra frecuentemente entremezclado con los manglares y la selva baja inundable.

Para la Reserva Estatal “El Palmar” la mayor superficie de cobertura vegetal corresponde al ecosistema de manglar, localizado en las marismas conformadas por el sistema palustre salobre o Ciénega que se prolonga paralelo a la costa, desde el límite occidental de la Reserva (a la altura del puerto de Celestún) hasta su límite Este (a la altura del puerto de Sisal), hacia el Norte, su límite lo constituye la barrera litoral de depósitos arenosos recientes con dunas costeras. Hacia el Sur, se extiende 6 o 7 km tierra adentro (Gobierno del estado de Yucatán, 2014).

De manera general la vegetación de la Reserva Estatal El Palmar está compuesta por 549 especies, distribuidas en 100 familias, dentro de las que destacan las familias Leguminosae con 79 especies, Gramineae 34, Euphorbiaceae 33 y Compositae 30, Cyperaceae y Malvaceae cada una con 16 y Convolvulaceae 14, entre otras. El listado de especies ascendió a 557 contando con 12 especies bajo algún estado de protección de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010, 8 en protección especial y 4 amenazadas, de las cuales cinco son endémicas.

### 7.3.2. Tular

Asociación de plantas herbáceas enraizadas en el fondo cuyo tallos sobresalen de la superficie del agua, desarrollándose principalmente en la orilla de lagunas; sus hojas son angostas o carecen de ellas. Comúnmente reciben el nombre de (Tules)

*Typha spp.*, *Scirpus spp.*, así mismo quedan incluidos los llamados carrizales *Phragmites*, *Arundo*.

### 7.3.3. Vegetación de Dunas Costeras

Las comunidades vegetales en las dunas costeras son consideradas halófitas. Tienen una distribución heterogénea a lo largo de la costa, ya que hay zonas que se encuentran dominadas por especies herbáceas, otras por matorrales arbustivos, especies arbóreas o también se encuentran mezcladas. La mayoría de las especies de plantas de las dunas costeras son de hábitos postrados.

La zona de matorrales se encuentra en el interior de la duna, en donde la arena se encuentra fija y el suelo presenta mayor cantidad de materia orgánica. Los matorrales pueden tener una altura variable, dependiendo de las condiciones del medio. Los de menor altura se encuentran en las zonas más áridas y expuestas, las especies más comunes en la zona de matorrales son: *Agave angustifolia*, *Bravaisia berlandieriana*, *Acanthocereos tetragonus*, *Gossypium hirsutum*, *Pseudophoenix sargentii*, *Coccoloba uvifera* entre otras.

### 7.3.4. Petenes

Los petenes son islas de vegetación arbórea que se encuentran inmersas en una matriz de vegetación inundable que ocupa las ciénagas que bordean prácticamente toda la península. La vida de estos ecosistemas se desarrolla alrededor de afloramientos de agua dulce procedentes de manantiales o cenotes, por lo que el flujo de agua juega un papel fundamental en el funcionamiento de éstos debido al aporte hídrico y los nutrientes.

La estructura de la vegetación en estas comunidades llega a ser de tipo selvática (Durán, 1978). En los petenes de mayor tamaño o con un mayor desarrollo puede ser reconocida una selva mediana perennifolia con árboles que presentan alturas entre 20 y 25 m. Algunas de las especies representativas de los petenes son: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Languncularia racemosa*, *Manilkara zapota*, *Swietenia macrophylla*, *Acrostichum aureum*.

#### 7.4. Área de influencia de la REP

Las poblaciones de influencia de la REP están conformadas por Hunucmá, Tetíz, Sisal y Celestún. Debido a la cobertura de las imágenes satelitales con que se cuenta, en este trabajo solo se consideraron las primeras tres poblaciones (figura 1).

Hunucmá colinda con los siguientes municipios: al norte con el Golfo de México, al sur con Samahil y Tetíz, al este con Progreso y Ucú y al oeste con Celestún. Tiene una extensión de 599.10 km<sup>2</sup>.

Toda la superficie del terreno municipal es plana, considerada como llanura de barrera en su mayor extensión, debido a que en el extremo este existen extensas playas. Demográficamente la población total para el municipio de Hunucmá en el año 2010 fue de 30,731 y el total de viviendas fue de 7200.

Sisal se ubica en el litoral nor-poniente del Estado de Yucatán, en el Golfo de México y localizado en el municipio de Hunucmá. Este puerto, se ubica en el extremo este de la REP. En 2001 en Sisal existían 160 ejidatarios registrados en el padrón, de los cuales sólo 40 se dedican a la actividad agropecuaria con poca diversidad de cultivos (pitaya, coco, maíz y frijol), muchos de ellos, combinan la actividad pesquera con el campo. En el año 2010 la población de Sisal fue de 1837 personas y el total de viviendas fue de 485.

El municipio de Tetíz ocupa una superficie de 180.11 km<sup>2</sup>. Limita al norte con Hunucmá, al sur con Kinchil, al este con Samahil-Hunucmá y al oeste con Celestún (Gobierno del Estado de Yucatán, 2014).

La población de Tetiz en el 2010 fue de 4,725 y el total de viviendas fue de 1173.

## 8. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron escenas multiespectrales de cuatro bandas (R, G, NIR, MIR) de la plataforma SPOT 5 provenientes de la “ERMEX NG--<0018> 20015” correspondientes a los años 2006 y 2014 (figura 2).

### 8.1. Pre-procesamiento de imágenes

En esta fase se llevó a cabo una corrección al elipsoide de referencia Datum WGS84, de igual manera se aplicó una corrección atmosférica a las imágenes mediante el software ATCOR (Atmospheric Correction) ERDAS 2011, que consistió en recuperar los parámetros físicos de la superficie de la tierra, utilizando tablas calculadas con el código de transferencia radiativa Modtran<sup>®</sup> 5 con el objetivo de reducir o eliminar en lo posible el efecto atmosférico por fenómenos de absorción y dispersión de la luz, los cuales generan opacidad y restan nitidez a la imagen. Una vez realizadas las correcciones, se llevó a cabo un proceso de co-registro entre la imagen multiespectral y su par pancromático correspondientes a cada año, lo cual incrementó la resolución espacial de las imágenes de 10 a 2.5 m por pixel.

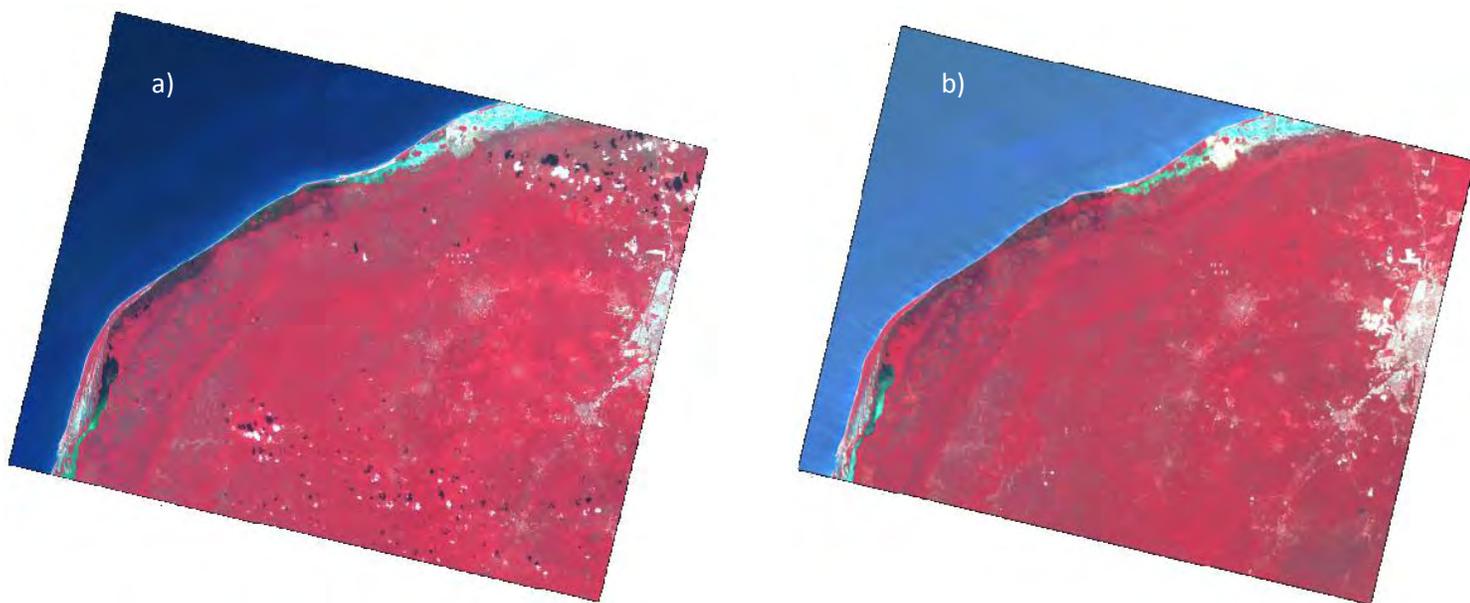


Figura 2. Imágenes multiespectrales falso color SPOT 5 utilizadas en el estudio, a) Es la imagen del año 2006 mientras que b) es la referente para el año 2014. © CNES 2006 y 2014, producidas por el SIAP bajo licencia de “SPOT

La imagen multiespectral obtenida para el año 2006 contaba con la presencia de nubes (figura 3a), mismas que fueron eliminadas por medio de un recorte (figura 3b). Aunque la imagen del 2014 no presentaba nubosidad, se procedió a eliminar la misma área eliminada en la imagen 2006 para tener dos imágenes homogéneas. En ambas imágenes también se eliminó el área marina por no ser de interés en este estudio. De esta manera se obtuvo el área de interés (AOI) utilizada en los análisis que se describen más adelante. Ambas imágenes (2006 y 2014) fueron co-registradas para asegurar la alineación de una imagen con respecto a la otra.

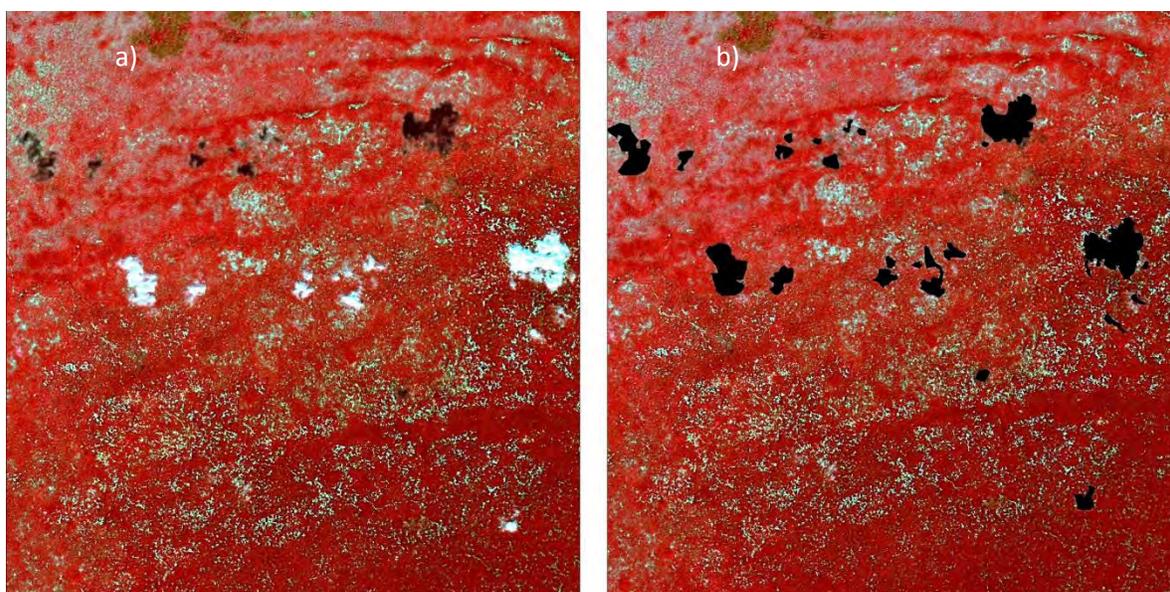


Figura 3. La imágenes a) muestra la nubosidad en la imagen multiespectral del año 2006 y en b) se muestra la misma imagen sin nubes © CNES 2006 y 2014, producidas por el SIAP bajo licencia de “SPOT IMAGE”. (Combinación de bandas 3, 2, 1, 4 )

## 8.2. Procesamiento de las imágenes

### 8.2.1. Clasificación No Supervisada

Previo a la clasificación no supervisada, utilizando las unidades del paisaje definidas en el Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Yucatán (POETCY) en conjunto con características de la vegetación de manglar de la Reserva Estatal El

Palmar (Moreno, 2013) y conocimiento del área mediante un análisis visual en google earth, se definieron las siguientes clases a representar en un mapa temático:

- 1) Manglar,
- 2) Otra Vegetación,
- 3) Suelo sin Vegetación y
- 4) Agua

Se consideró utilizar esta clasificación debido a que cada clase es fácil de reconocer en las imágenes y a la vez son fácilmente separables una de otra.

Para identificar estas clases, primero se generaron 100 grupos o clases (con el algoritmo ISODATA del programa ERDAS) como inicio para permitir una mayor separación espectral de los píxeles en las imágenes.

En base a la localización de los píxeles, conocimiento del área y de las unidades de paisaje definidas en el POETCY, las clases fueron agrupadas poco a poco evaluando su correcta distribución y representación espacial, utilizando la herramienta Grouping Tool hasta obtener las 4 clases definidas al principio. Las imágenes obtenidas se simplificaron mediante los análisis temáticos de Recode, Neighborhood, Clump, Eliminate y Thematic pixel aggregation para así obtener los mapas temáticos en formato y tamaño adecuado.

Mediante conocimiento del AOI, se llevó a cabo una edición contextual (Green *et al.*, 2000) para corregir aquellos píxeles que por sus características radiométricas presentaban una alta confusión espectral y por lo tanto clasificados incorrectamente (ej. Vegetación de selva baja ubicada en la costa, vegetación de manglar ubicada a más de 10 km de la costa), reclasificándolos a la clase dominante. De esta manera se obtuvieron los mapas temáticos de la Reserva Estatal “El Palmar” para los años 2006 y 2014.

Para procesar y analizar las imágenes temáticas producto de la clasificación no supervisada, se utilizó el Sistema de Información Geográfica ArcGis 10.0, software con que se obtuvieron los temas que a continuación se describen.

### 8.2.2. Cobertura y Compactación de parches de vegetación

Para cada polígono de las diferentes clases se calculó la cobertura referida en ha y la compactación en ambos años de estudio (ecuación 1).

$$\frac{2 X\sqrt{\pi A}}{P}$$

Ecuación 1. Fórmula de compactación de acuerdo a Bosch y Davis (1978), donde A representa el área ( $m^2$ ) y P el perímetro (m).

### 8.2.3. Fragmentación y Agregación

Para describir las características de fragmentación en el AOI para ambos tiempos se utilizaron como métricas el Número de Parches (NP) y Distancia Euclidiana al Vecino más Cercano (ENN). Estas métricas se calcularon mediante el programa FRAGSTATS (McGarigal y Marks, 1995), el cual basa las estimaciones en los mapas temáticos generados.

Los datos obtenidos no presentaron una distribución normal y ninguna transformación cambió esta condición. Por lo tanto, para determinar si existía una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en la cobertura, compactación y ENN de la vegetación (clases de manglar y otra vegetación) entre los dos años de estudio se utilizó una prueba de Kruskal-Wallis con la prueba de contrastes múltiples no paramétrica de Tukey (Zar, 1984). En el caso del número de parches se utilizó una prueba de chi-cuadrada con un análisis de contingencia (Crawley, 2002). Los análisis se llevaron a cabo con el software Matlab y/o Excel.

### 8.2.4. Delimitación del Área Urbana

El área de las poblaciones de Tetiz, Hunucmá y Sisal (consideradas como asentamientos urbanos de influencia de la REP) se definió mediante la digitalización directa sobre las escenas satelitales pre-procesadas. En este caso se digitalizaron calles, casas y manzanas para cada una de las poblaciones construyendo archivos vectoriales mediante el uso de ArcGIS 10.0.

Posteriormente se calculó el área urbana para cada uno de los tiempos de análisis.

#### 8.2.5. Análisis de Detección de Cambios

Por medio de ArcGIS 10.0 se llevó a cabo un análisis de detección de cambios para determinar el cambio de cada polígono en el periodo de ocho años. Por medio de un análisis de intersección entre los mapas temáticos de los años 2006 y 2014 se determinó el cambio en el tiempo de las coberturas presentes en la REP.

Con estos datos se generó un mapa temático de detección de cambios entre los años 2006 y 2014.

#### 8.2.6. Análisis de la variación del RVI entre los años comparados

Se obtuvieron imágenes compuestas para cada uno de los años de estudio mediante el cálculo del índice relativo de vigor RVI (ecuación 2) propuesto por Richardson y Wiegand (1997), el cual permite estimar la condición de la vegetación con base en la medición de la intensidad de la radiación electromagnética en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano que la vegetación refleja.

$$RVI = \frac{RED}{NIR}$$

Ecuación 2. Índice Relativo de Vigor, donde RED son los valores espectrales correspondientes a la banda del rojo y NIR son los valores espectrales correspondientes a la banda del infrarrojo cercano.

Los valores que arroja este índice van del 0 a infinito, donde valores bajos indican un mayor vigor y estructura de la vegetación. Se llevó a cabo un análisis de diferencia de imágenes en el programa ERDAS mediante la herramienta de Image Difference que detecta el cambio de cada pixel entre dos imágenes de diferente tiempo esto determina la variación de la condición de la vegetación en el tiempo.

## 9. RESULTADOS

### 9.1. Cobertura Vegetal de la Reserva Estatal “El Palmar”

El análisis de la cobertura indicó que en el año 2006, la cobertura de la clase de Manglar era de 19,499.37 ha, superficie que corresponde a 48.75% del AOI, mientras que para el año 2014 se presentó un área de 20,269.56 ha (50.77%).

Respecto de la clase Otra Vegetación, el área y porcentaje para el año 2006 fue de 14,771.81 ha (36.96%), tanto que para 2014 fue de 15,177,32 ha (38.02%), del área de la reserva (figura 6).

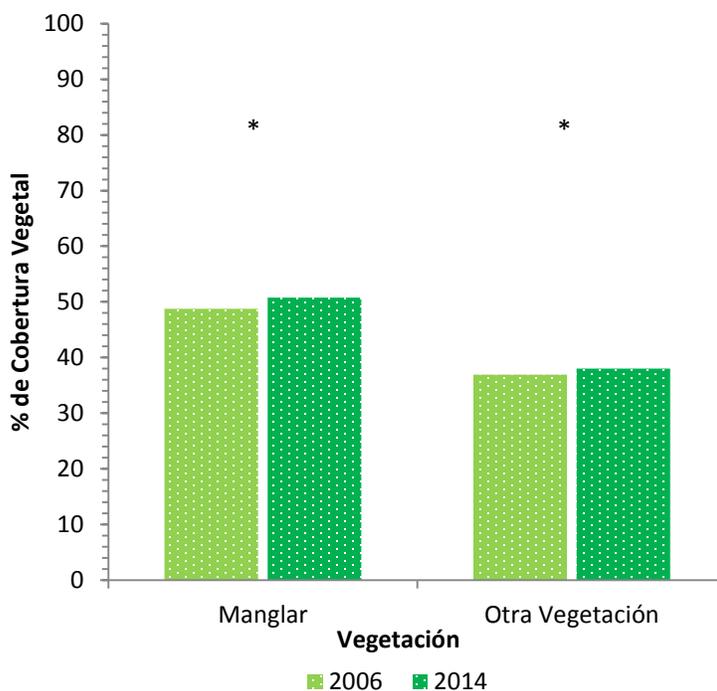


Figura 4. Comparación de vegetación en la Reserva Estatal el Palmar para los años 2006 y 2014

\*representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

A partir de los datos, se observó que existe un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) de la cobertura vegetal, tanto para la clase manglar como de otra vegetación durante el período de estudio.

En las figuras 4 y 5 se muestran los mapas de la cobertura vegetal para los años 2006 y 2014, respectivamente

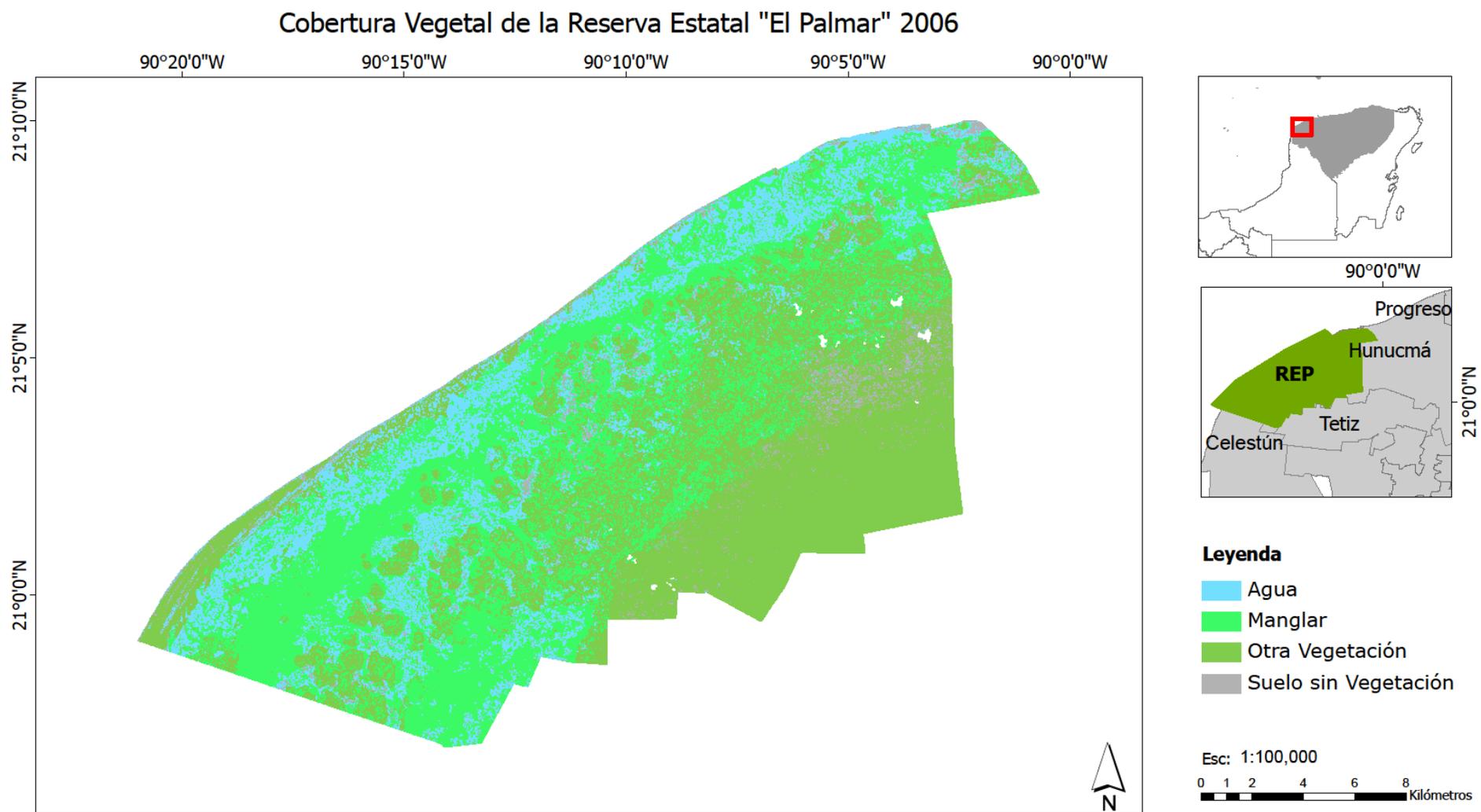


Figura 5. Mapa temático de cobertura vegetal del año 2006 para la Reserva Estatal El Palmar

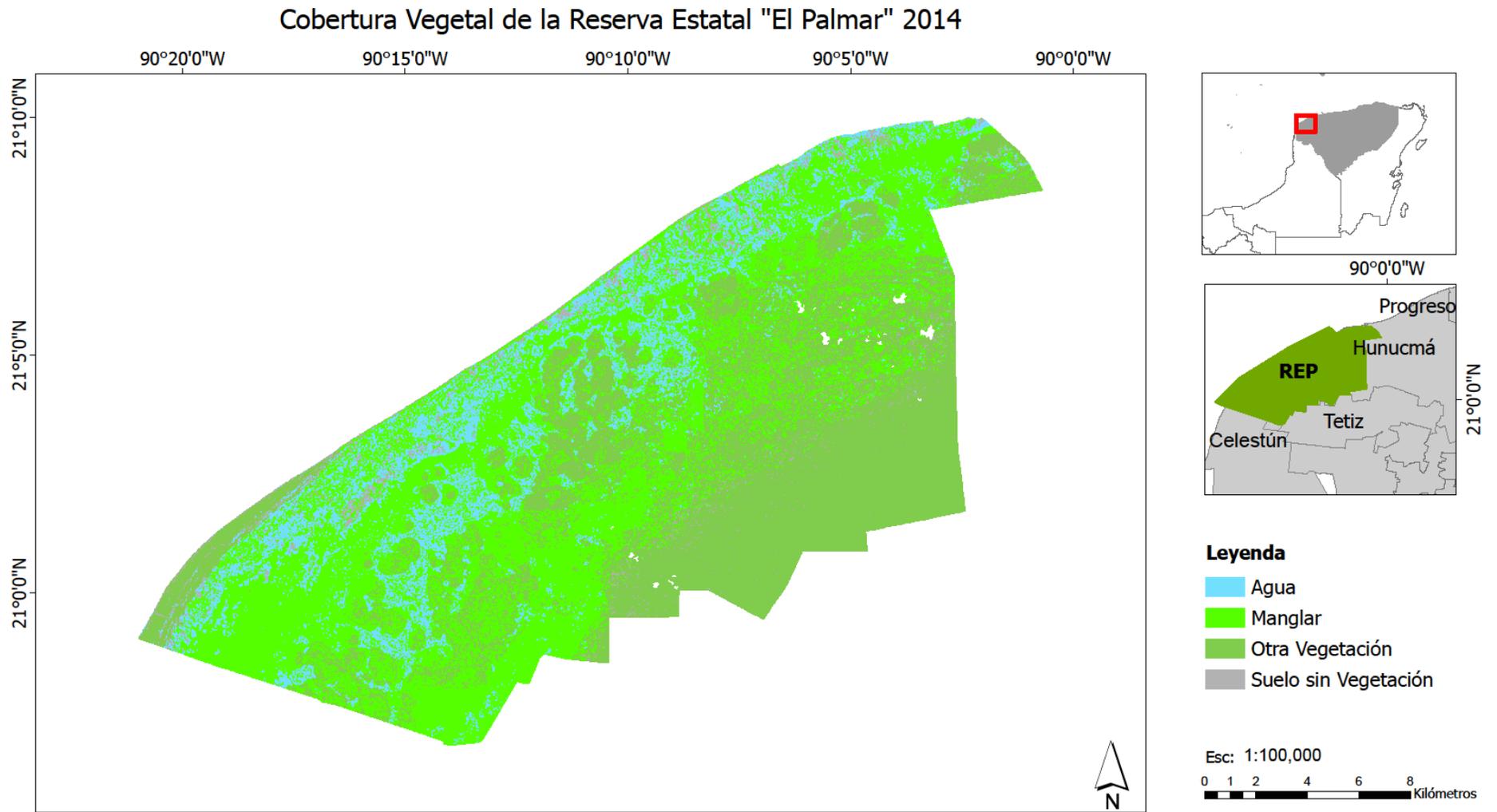


Figura 6. Mapa temático de cobertura vegetal del año 2014 para la Reserva Estatal "El Palmar"

## 9.2. Compactación de los parches de vegetación

Se observaron valores altos de compactación distribuidos en todo el AOI, en particular el área que corresponde a la clase manglar.

La figura 9 presenta el valor mediano y los cuartiles superior e inferior de la compactación de las clases de vegetación Manglar y Otra Vegetación para el área de la Reserva Estatal El Palmar. Los valores de la mediana son cercanos, sin embargo la compactación de la vegetación incrementó ( $p < 0.05$ ) con respecto al tiempo.

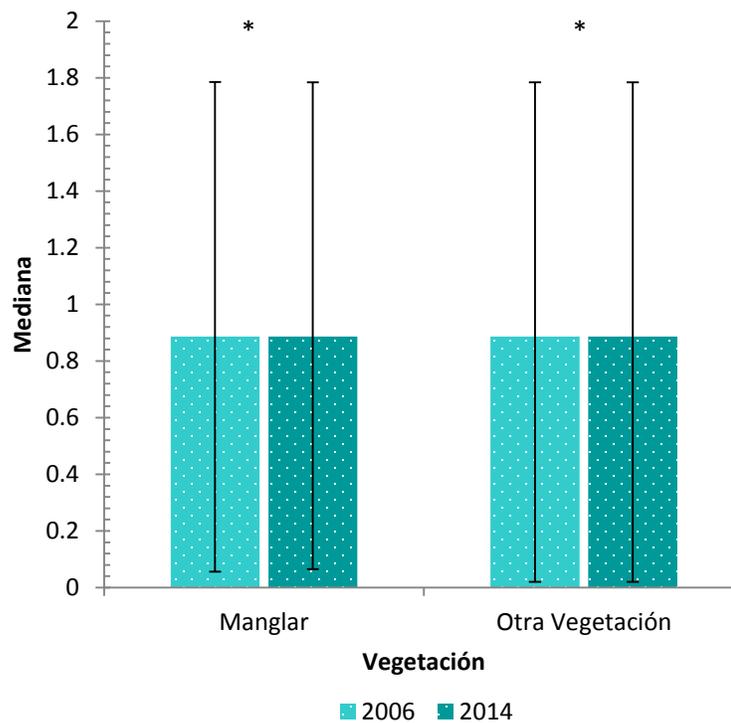


Figura 7. Mediana de la compactación para las clases de vegetación: Manglar y Otra Vegetación en los años 2006 y 2014. Las líneas representan el cuartil superior e inferior para cada tipo de vegetación.

\*representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

En las figuras 7 y 8 se muestran los mapas de compactación de los años 2006 y 2014, respectivamente

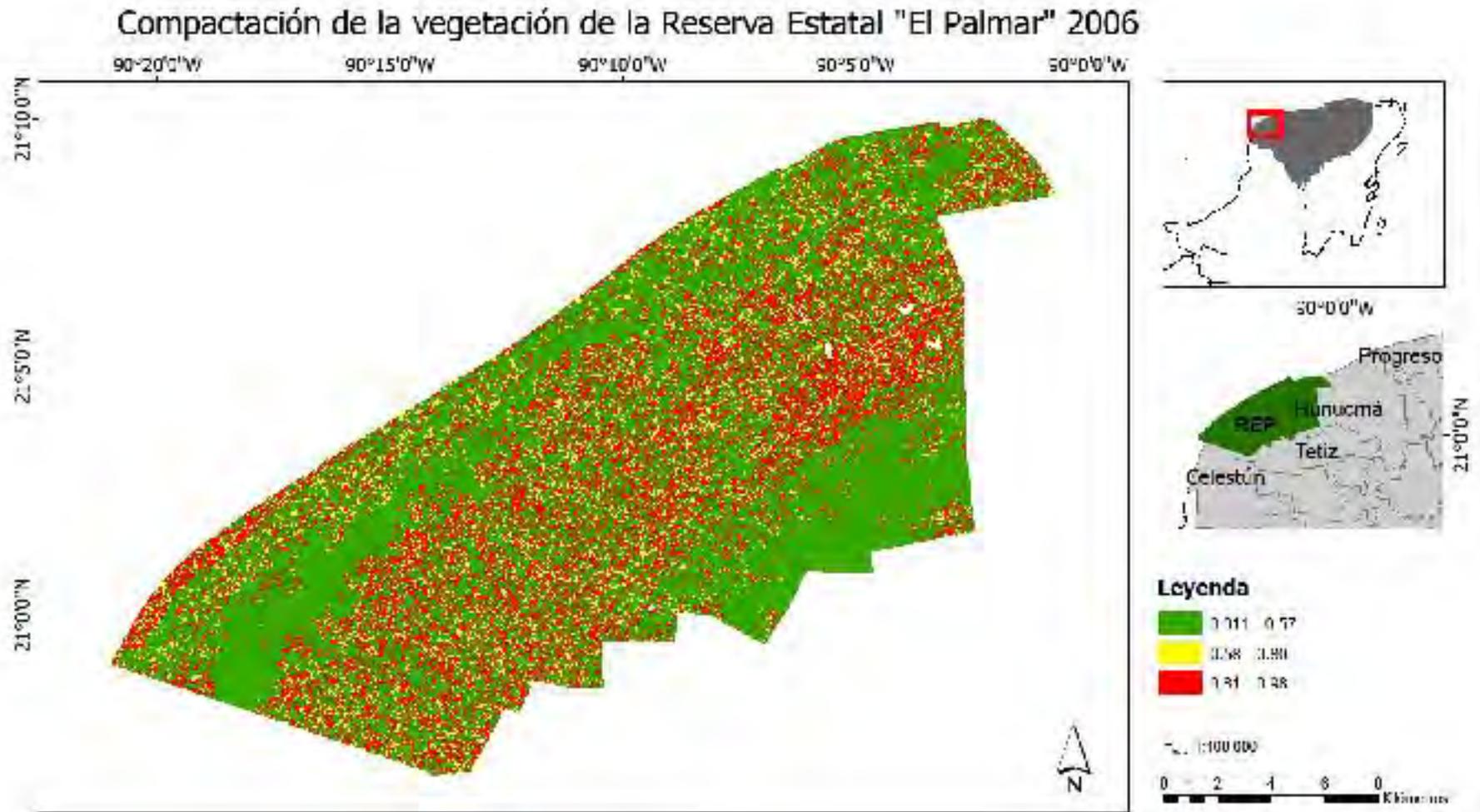


Figura 8. Mapa temático del grado de compactación, los colores verdes representan parches menos compactos, mientras que los colores amarillo y rojo indican un mayor grado compactación.

## Compactación de la vegetación de la Reserva Estatal "El Palmar" 2014

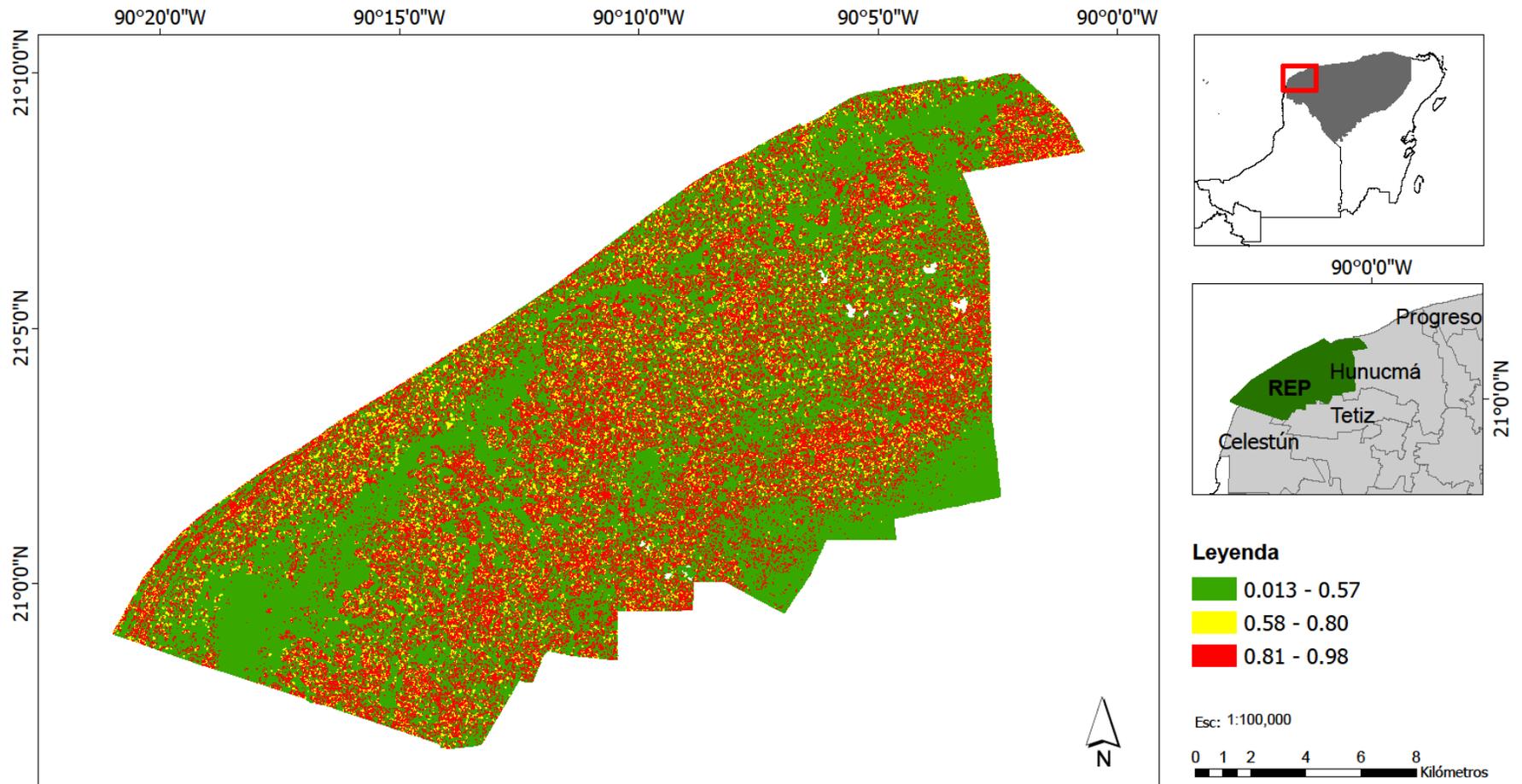


Figura 9. Mapa temático de la compactación de los parches de la Reserva Estatal "El Palmar" del año 2014. El color verde indica parches menos compactos, mientras que el amarillo y el rojo se refieren a parches con un mayor grado de compactación

### 9.3. Fragmentación y Agregación

En la figura 10 se presenta la comparación, en cuanto al número de parches de las clases de manglar y de otra vegetación, entre los años 2006 y 2014. Se observó un aumento en el número de parches en la clase de manglar y una disminución para la clase de otra vegetación ( $p < 0.05$ ). Para el caso de la clase manglar el incremento en el número de parches no indica un aumento en la fragmentación ya que la cobertura vegetal de esta clase también aumento

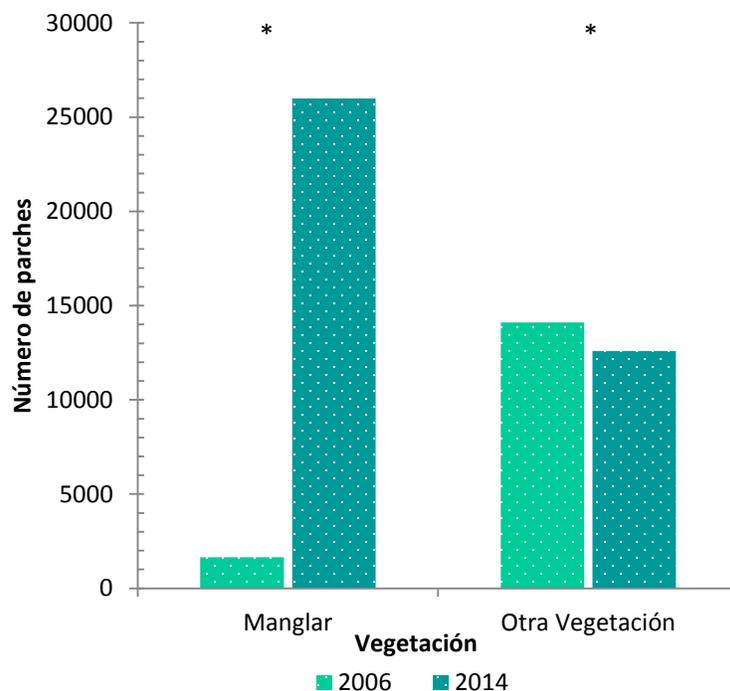


Figura 10 Número de parches correspondientes a las clases de manglar y otra vegetación para la Reserva Estatal “El Palmar” en los años 2006 y 2014.  
\*representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

En cuanto al índice ENN (figura 11) se observó una disminución de los valores ( $p < 0.05$ ) en la vegetación. Esto indica un aumento en la agregación de los parches con respecto al tiempo.

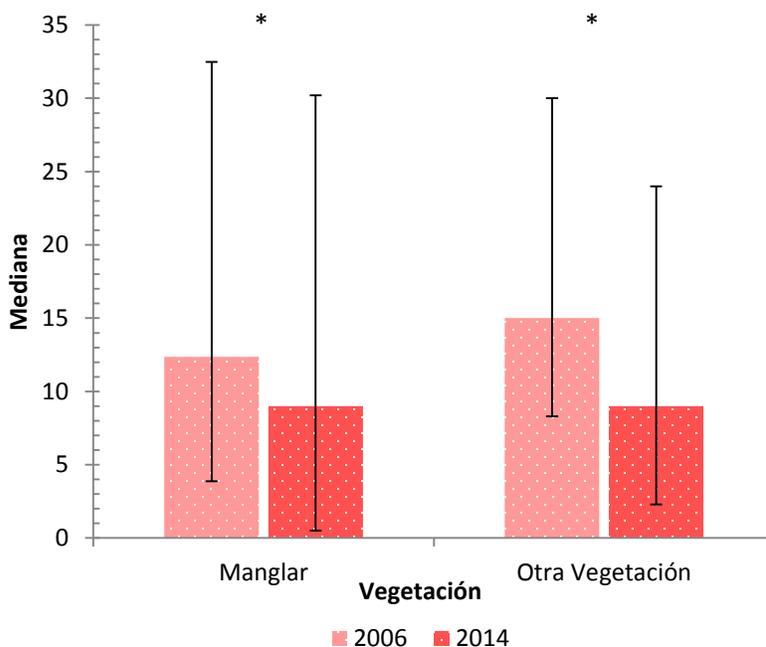


Figura 11. Mediana de los valores del índice ENN calculado para las clases de Manglar y Otra Vegetación en los años 2006 y 2014. Las líneas representan el cuartil superior y el cuartil inferior para cada tipo de vegetación. \*representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

## 9.4. Cobertura Urbana

La digitalización que se llevó a cabo para definir la zona urbana de influencia a la REP consideró las comunidades de Hunucmá, Tetz y Sisal. Para cada una de éstas se digitalizaron las calles y caminos (km), así como casas y manzanas (ha).

### 9.4.1. Hunucmá

El análisis del SIG demostró que en el año 2006, Hunucmá contaba con 187.59 km de calles y 182.44 ha de casas equivalente a 2135.06 ha de manzanas. Para 2014, la longitud de calles aumentó a 210.74 km, la superficie de las casas incrementó a 281.25 ha y en consecuencia el área de manzanas a 2465.07 ha (figura 12 y 13).

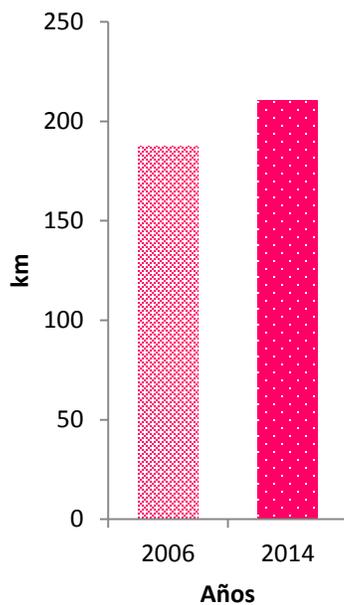


Figura 12. Número de kilómetros de calles en Hunucmá

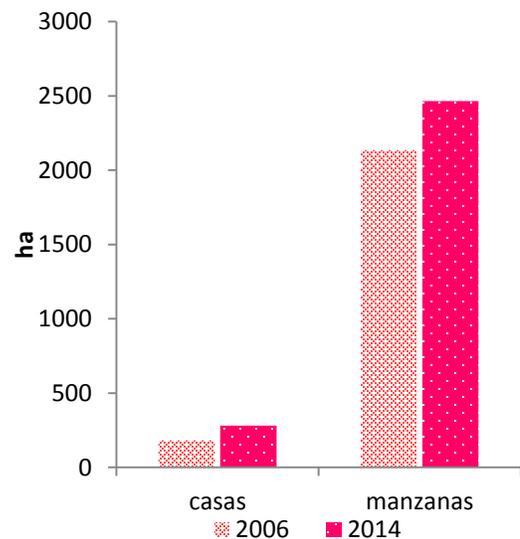


Figura 13. Hectáreas de casas y manzanas en la población de Hunucmá

Los datos anteriores indicaron que la zona urbana de Hunucmá aumentó a un ritmo de  $2.89 \text{ km}^{-1}$  en calles,  $12.4 \text{ ha año}^{-1}$  en casas y  $41.3 \text{ año}^{-1}$  en manzanas.

### 9.4.2. Tetiz

La zona urbana de Tetiz en el año 2006 contaba con 64.21 km de calles y 27.04 ha de casas equivalentes a 669.64 ha manzanas. Para 2014, la longitud de calles aumentó a 116.45 km la superficie de las casas incrementó a 43.17 ha y en consecuencia el área de manzanas a 801.83 ha (figuras 14 y 15).

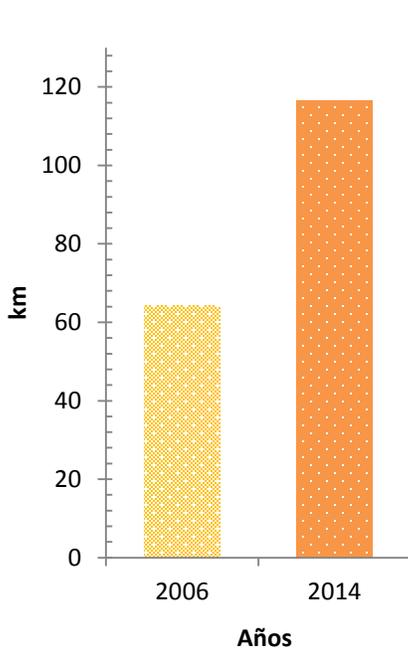


Figura 14. Kilómetros de calles en Tetiz

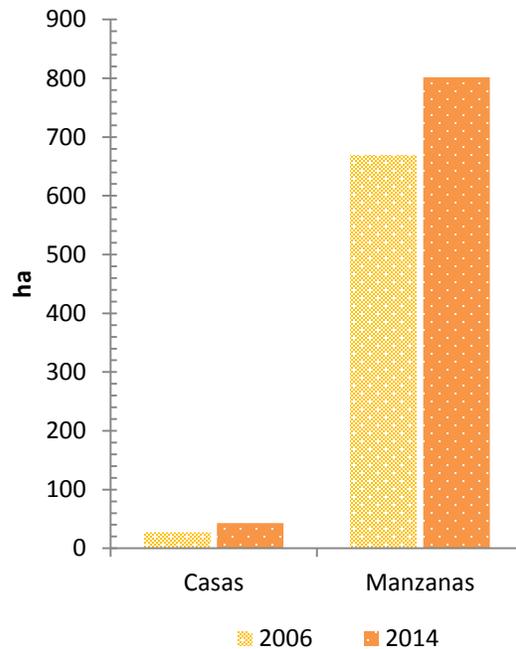


Figura 15. Hectáreas de casas y manzanas en Tetiz

Los datos obtenidos indicaron que la zona urbana de Tetiz aumentó a un ritmo de 6.53 km año<sup>-1</sup> en calles, 2.39 km año<sup>-1</sup> en casas y 16.52 km año<sup>-1</sup> en manzanas.

### 9.4.3. Sisal

En el año 2006 la zona urbana de Sisal contaba con 38.28 km de calles y 27.90 ha de casas equivalente a 58.84 ha manzanas. Para 2014, la longitud de calles aumentó a 41.97 km la superficie de las casas incrementó a 71.27 ha en consecuencia el área de manzanas a 67.62 ha (figura 16 y 17).

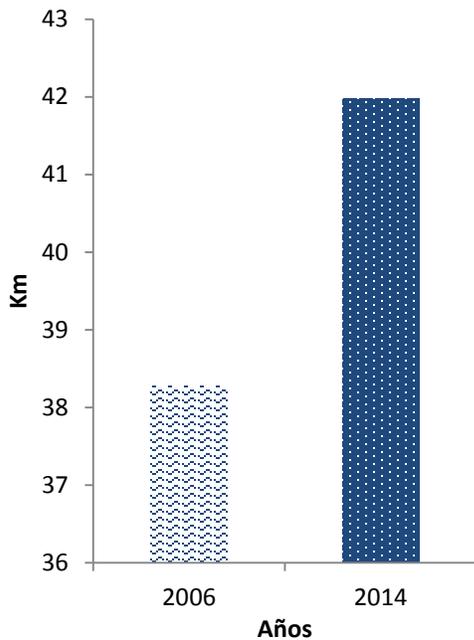


Figura 17. Kilómetros de calles en Sisal

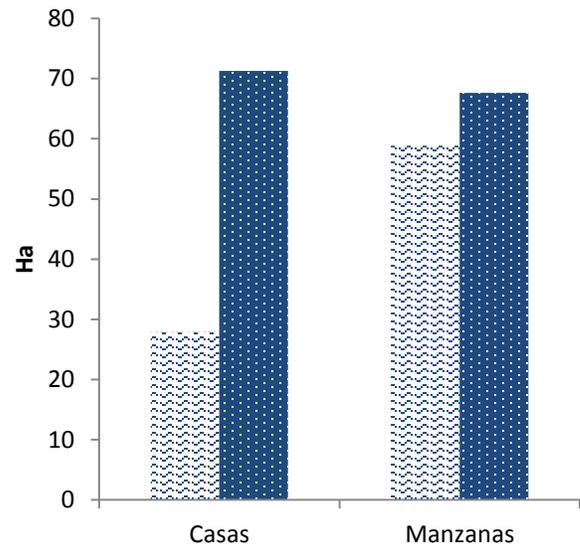


Figura 16. Hectáreas de casas y manzanas en Sisal

Los datos anteriores indicaron que la zona urbana de Sisal aumentó a un ritmo de  $0.46 \text{ km año}^{-1}$  en calles,  $5.42 \text{ km año}^{-1}$  en casas y  $1.09 \text{ km año}^{-1}$  en manzanas.

Los resultados mostraron que de manera general existe un aumento de cobertura urbana en el periodo de estudio (2006-2014) para todas las poblaciones de influencia de la REP. El mayor incremento se observa en la población de Hunucmá (Tabla 2).

Tabla 2 Cuadro comparativo del crecimiento urbano de las zonas urbanas de influencia de la Reserva Estatal "El Palmar" en el periodo de 2006 a 2014

Ciudad	Calles (km)		Casas (ha)		Manzanas (ha)	
	2006	2014	2006	2014	2006	2014
Hunucmá	187.59	210.74	182.44	281.25	2135.06	2465.07
Tetiz	64.21	116.45	27.04	43.17	669.64	801.83
Sisal	38.28	41.97	27.90	71.27	58.84	67.62

## 9.5. Análisis de Detección de Cambios

En la figura 18 se muestran las áreas que presentaron una ganancia o pérdida de cobertura vegetal. De manera general, se observa que al norte de la REP donde se obtuvo mayor presencia de la clase de manglar se presentó un mayor cambio en la cobertura y en la parte sureste de la REP se presenta mayor estabilidad. El cambio de cobertura en las clases de agua y suelo sin vegetación podría estar relacionado con la temporalidad de las imágenes.

En la figura 19 se muestran los valores estandarizados al porcentaje del AOI de las coberturas de las distintas clases.

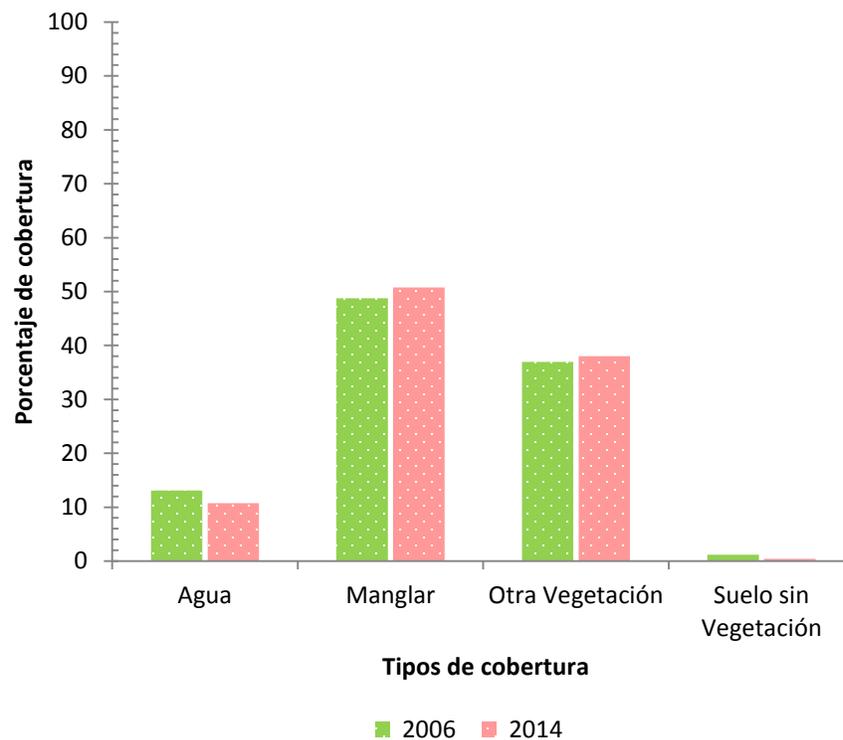


Figura 18. La grafica muestra el porcentaje de cobertura para cada tipo de cobertura de los años 2006 y 2014.

Como se ha mencionado anteriormente las clases de vegetación aumentan su cobertura mientras que las clases de agua y suelo sin vegetación presentan una disminución ( $p < 0.05$ ).

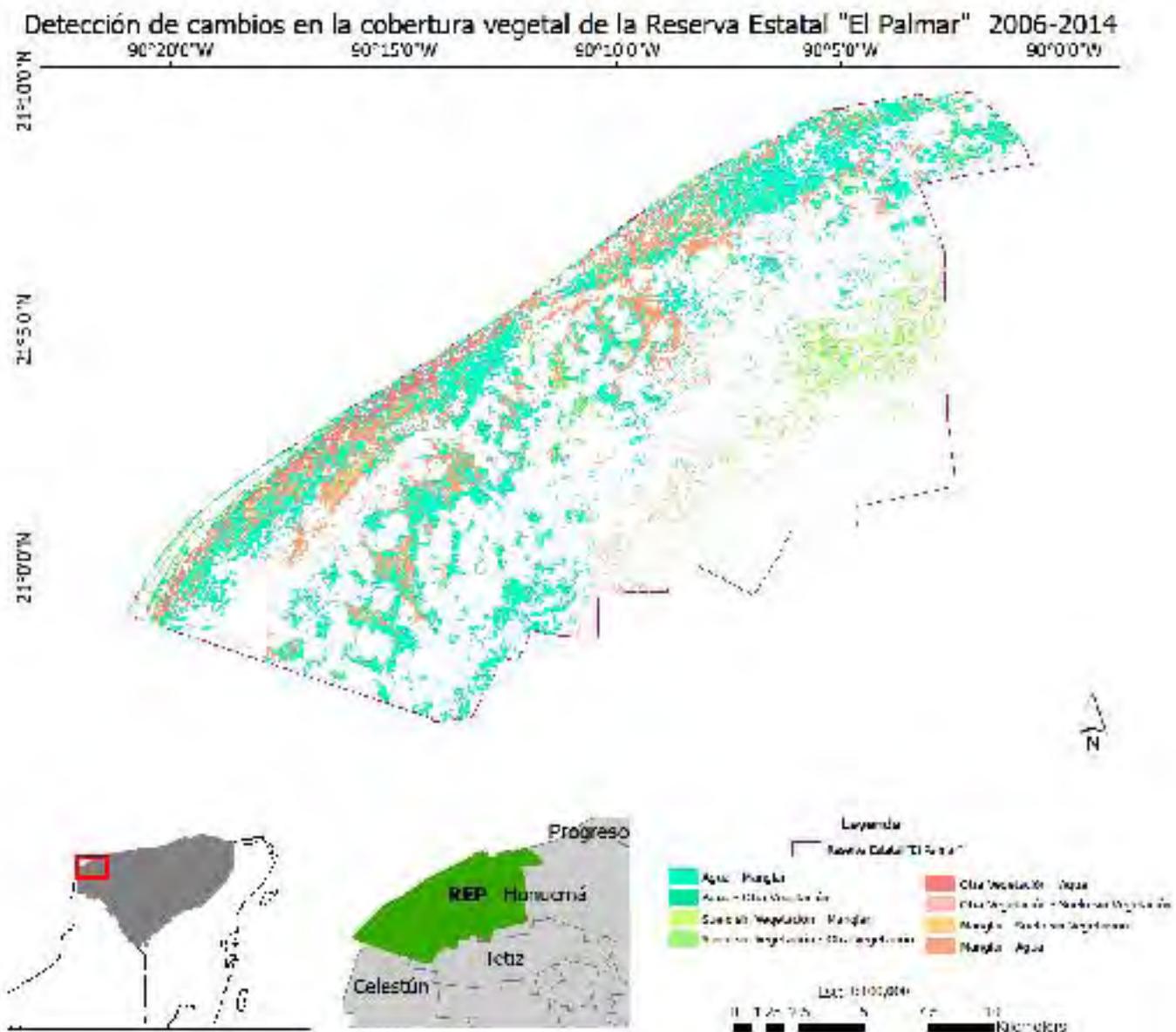


Figura 19. El mapa presenta las zonas de ganancia y pérdida de la vegetación de la Reserva Estatal "El Palmar" en el periodo de 2006 a 2014. Las tonalidades verdes indican una ganancia, las tonalidades rojas indican una pérdida y el color blanco dentro del polígono de la reserva denota áreas sin cambio. Los pares de clase en la leyenda indican el cambio de una clase a otra con respecto al tiempo.

## 9.6. Condición de la vegetación RVI

El índice de vegetación RVI mostro el cambio en la condición de la vegetación, este se presenta en la figura 19. La condición en la región sureste de la REP, algunas áreas de la zona centro y región oeste se mantienen relativamente sin cambio, estas áreas corresponden a la clase de otra vegetación y equivale aproximadamente a 15161.7004 ha de la cobertura vegetal de la reserva. El área central y norte de la REP presenta una disminución que equivalen a 20352.57 ha y corresponden a la cobertura de manglar. Las áreas cubiertas por vegetación que presentan un aumento en la condición son pequeñas en extensión y no son comunes, por lo cual no es posible observarlas a la escala del mapa utilizada.

### Condición de la Vegetación de la REP del 2006 al 2014

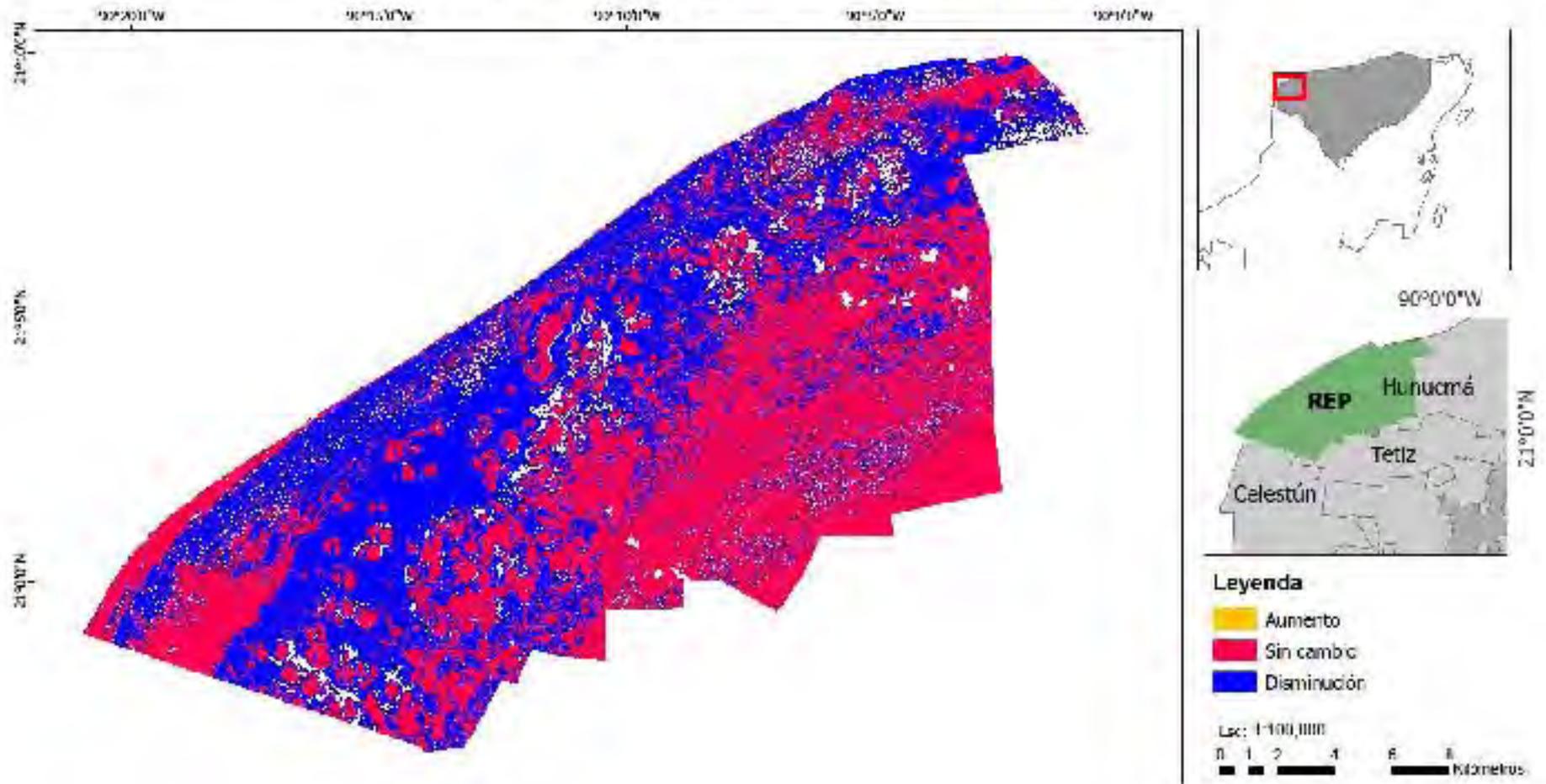


Figura 20. Mapa temático de la condición de la vegetación de la Reserva Estatal "El Palmar"

## 10.DISCUSIÓN

La generación de mapas temáticos, usando una clasificación no supervisada utiliza los valores espectrales de la escena digitalizados para formar series de agrupaciones o conglomerados (clusters), más o menos nítidos según el caso. Estos grupos equivalen a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo. Por lo tanto, definen clases temáticas de interés (Chuvieco, 1995). No obstante, estas categorías espectrales no siempre se separan adecuadamente, debido a características espectrales similares entre los objetos de interés. En el estudio se observó confusión espectral entre los diferentes tipos de vegetación presentes en la Reserva Estatal “El Palmar”, ya que su separación está altamente relacionada con la concentración de clorofila.

Una de las consecuencias al clasificar el mapa temático fue que algunos píxeles de otra vegetación se clasificaron incorrectamente como manglar más allá de 10 km de la costa, así como vegetación de selva baja ubicada muy cercana a la línea de playa. Con base en el conocimiento del área y literatura consultada (Acosta *et al.*, 2010; Rodríguez-Zúñiga *et al.*, 2012; Moreno, 2013; Ponce de León, 2015; Rioja-Nieto *et al.*, en prensa) se sabe que la vegetación de manglar y selva baja no se distribuyen en esas zonas, por lo que se realizó una edición contextual en la cual se cambió la identidad de los píxeles mal clasificados y se cambiaron a la clase dominante en esas zonas, en este caso a otra vegetación.

Dado que la vegetación tiende a presentar alta confusión espectral debido a que su separación está relacionada con la concentración de clorofila, la cual es relativamente similar entre las distintas especies y considerando que el método utilizado no emplea sitios de entrenamiento en campo y como los petenes son asociaciones vegetales que contienen una mezcla de elementos de sabana, manglar y/o selva (Barrera, 1982), así como la vegetación de selva subcaducifolia llegan a formar mosaicos complejos con otros tipos de vegetación (Rzedowski, 2006), se decidió conjuntar estos tipos de

vegetación (petenes, vegetación de duna costera sabana y selva) en una sola clase denominada otra vegetación.

#### 10.1. Cobertura vegetal y cobertura del área urbana

En México se estima que una cuarta parte de la población habita en una franja de 100 km a partir de la línea de costa (Rivera *et al.*, 2004) y al igual que en otras áreas del planeta, la población humana presenta un desplazamiento importante hacia las zonas costeras (CIMARES, 2011). El desarrollo acelerado de las actividades económicas ha propiciado por lo tanto un crecimiento desordenado en la zona costera y zonas urbanas de la costa (Lara-Lara *et al.*, 2008). Conforme a los resultados obtenidos de la digitalización del área urbana de influencia a la REP, se encontró un aumento de calles, casas y manzanas. Las poblaciones de Hunucmá, Tetz y Sisal crecieron en más del 50 % en el periodo de 2006 al 2014, de esta manera la superficie de la tierra ha sido transformada por las actividades antrópicas, modificando así el ecosistema (Vitousek *et al.*, 2008).

En la Reserva Estatal “El Palmar” se encontró un aumento en la cobertura de la vegetación de aproximadamente 2 %, tanto para el bosque de manglar como la clase de otra vegetación. Las poblaciones de Hunucmá, Tetz y Sisal en el año 2000 presentaban 25979, 4201 y 1629 habitantes, respectivamente. Para el año 2010, estas poblaciones aumentaron aproximadamente 18 % (Hunucmá) y 12 % (Tetz y Sisal). Por lo tanto, en principio parece que el aumento de la población humana no ha afectado negativamente a la cobertura vegetal de la REP.

De las poblaciones analizadas, Sisal es la única que se localiza contigua a la REP, pero esta población no presenta un aumento considerable en el periodo de estudio. De igual manera, la reserva al sureste colinda con una zona de varias miles de hectáreas ejidales y nacionales de selvas bajas y henequenales abandonadas (POETCY,

2007), así como con la Reserva de la Biosfera Ría Celestún, lo cual la aíslan de impactos antropogénicos.

En la reserva hay tres zonas en las cuales se permiten actividades: la subzona de aprovechamiento especial, la subzona de uso público en donde se permite pernoctar y acampar en las áreas establecidas, así como el desarrollo de infraestructura de bajo impacto y la subzona de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales donde se permite el ecoturismo, la observación de flora y fauna, aprovechamiento forestal maderable y no maderable, pesca deportiva, y aprovechamiento de aves cinegéticas durante cierto periodo al año (DOF, 2007). En conjunto el aumento de estas actividades si no se llevan a cabo de una manera regulada podría disminuir la cobertura vegetal de la reserva y cambiar las condiciones bióticas y abióticas del lugar. La existencia de la vegetación es un factor importante ya que es hábitat de distintas especies algunas de ellas consideradas con algún grado de amenaza, también provee de diversos servicios ambientales como la provisión de agua, regulación climática, protección ante fenómenos naturales como huracanes, entre otros.

Cabe mencionar que no se tienen datos sobre los patrones de cambio en periodos de tiempo más largos ni previos al establecimiento de las poblaciones humanas. De igual manera, en este estudio solo se evalúan dos periodos de tiempo, por lo que se desconoce si la tasa de variación de la cobertura vegetal de la REP presenta alguna modificación como consecuencia de la actividad antropogénica.

## 10.2. Fragmentación, Agregación y Compactación

El estudio de la fragmentación tuvo tres componentes importantes, el aumento de la cobertura vegetal, de la agregación de los parches, y la compactación de éstos.

Las distintas condiciones de los parches pueden afectar las dinámicas ecológicas fundamentales para el mantenimiento de la biodiversidad en la REP. El cambio progresivo en la configuración del paisaje debido a la fragmentación puede explicarse

mediante las tendencias de las métricas del paisaje, en primer lugar se encuentra la del número de los fragmentos (parches) de hábitat (Santos y Tellería, 2006). En este caso la métrica de número de parches analizada presentó variación, mostrando un aumento en el número de parches para la clase de manglar y una disminución para las clases de otra vegetación. Diversos autores (Mas, 2001; Gómez, 2005; Altamirano *et al.*, 2007; Benzanilla *et al.*, 2008; Valdés, 2011; Garmendia, 2013; Herrera, 2013; San José, 2013; Viña y Esteves, 2013; Wang *et al.*, 2014; Zaragoza *et al.*, 2014) señalan que la fragmentación del hábitat ha sido reconocida como una de las principales amenazas para los ecosistemas. En este caso, es importante considerar que la REP contiene ecosistemas que presentan paisajes naturalmente fragmentados (Mas, 2000).

El aislamiento de los parches del paisaje (segunda métrica analizada) se entiende como la distancia mínima entre el parche focal y el parche más cercano de la misma clase dentro del paisaje. Tomando esto en consideración, una similitud entre parches permiten un mayor paso de organismos de un parche a otro (Turner *et al.*, 2001; Tolon *et al.*, 2009 citados en Aguilera, 2012.), y un aumento en el contraste entre los parches adyacentes refleja un mayor grado de aislamiento de éstos, comportándose como bordes abruptos o impermeables que actúan como una barrera muy difícil de cruzar por organismos especializados en un hábitat (López-Barrera, 2004).

Por lo tanto, en la REP se observó un aumento en la agregación para las clases de manglar y otra vegetación, que supone una disminución en el aislamiento de los parches. En este sentido la REP tienen una mayor conectividad entre parches siendo este un factor importante para el mantenimiento de las especies dentro de los mismos, puesto que una baja conectividad limitaría el intercambio de individuos, así como la capacidad de reponerse, por recolonización, de un evento de extinción (Forman, 1995; Santos y Tellería, 2006).

La forma y tamaño de los parches pudiera estar relacionada con la composición y estructura de su vegetación, ofreciendo diferente cantidad de recursos a las especies. En este sentido, la REP presenta parches de formas más compactas para el año 2014 en la zona donde se presenta la cobertura de bosque de manglar, estas formas resultan efectivas en la conservación de los recursos (Forman, 1995) pues protegen a los recursos internos contra efectos perjudiciales del borde, estas formas también mejoran la conectividad. Mostrando de esta manera que el área natural protegida probablemente será menos susceptible a alguna perturbación.

En el periodo de estudio se observó un aumento para la clase de manglar en el número de parches, en el grado de compactación, la agregación y la cobertura.

En este caso, el incremento en el número de parches no indica un aumento en el grado de fragmentación, sino la aparición de nuevos parches ya que aumenta la cobertura de la clase y disminuye el área ocupada por las clases de agua y suelo sin vegetación e incrementa la conectividad entre los parches al haber menos distancia entre parches de la misma clase.

En cuanto a la clase de otra vegetación se observó, una disminución en el número de parches lo que parece estar relacionado con el crecimiento de éstos y que lleva a la unión de los parches haciéndolos más grandes, esto se sabe ya que incrementa la cobertura y la agregación. De esta manera, los datos sugieren que la REP no muestra repercusiones ecológicas debido a las actividades antrópicas del área de influencia.

### 10.3. Condición de la vegetación

El índice usado para conocer la condición de la vegetación fue el RVI el cual mostró cambios en la condición de la vegetación en cuanto al tiempo. Los cambios en la condición de la vegetación pueden ser detectables por la absorción y reflectancia emitida por la vegetación del área (Gialbert, 1997; Tillack, 2013; Mandujano, 2013; Silleos *et al.*, 2006).

Como ya se mencionó el estudio se realizó con imágenes satelitales de diferentes años 2006 y 2014. La imagen del año 2006, tomada en el mes de Noviembre, corresponde a la época de lluvias, mientras que la imagen del 2014, tomada en Marzo, corresponde a la época de secas. De esta manera, la variación observada en la condición de la vegetación podría estar relacionada a la variación en las condiciones ambientales asociadas a la época del año.

Tillack *et al.*, (2013), encontró una variación estacional, en la condición de la vegetación en dos temporadas (secas y lluvias) en Mecklenburg-West Pomerania, Alemania. De la misma manera, Pastor-Guzmán, *et al.*, (en revisión) observaron variaciones espacio-temporales en la condición del bosque de manglar en el Norte de Yucatán relacionados con la época del año. Por lo tanto, coincidiendo con estos autores, la condición de la vegetación en la Reserva Estatal “El Palmar” parece estar afectada por los cambios en el ambiente.

Es importante señalar que al igual que en el cambio entre coberturas en el periodo estudiado para la REP, la condición de la vegetación de la clase de manglar es la que presenta una alta variación, en cambio la zona alejada de la costa no se modifica, esta zona es la más estable dentro del AOI.

## 11. CONCLUSIONES

El análisis espacio-temporal permitió detectar los cambios en las características del paisaje en el periodo de estudio. De esta manera se pudo describir la variación del medio natural y de la urbanización de la zona de influencia a la Reserva Estatal “El Palmar”.

Con la ayuda de una clasificación no supervisada y conocimiento del área se crearon mapas temáticos para la vegetación existente en la Reserva Estatal “El Palmar” en los dos años de estudio al igual que para la cobertura urbana aledaña a la reserva. De esta manera se pudo conocer la cobertura, fragmentación, agregación y compactación de la vegetación y de la zona urbana.

En el periodo de estudio el aumento de aproximadamente el 50 % en la urbanización de las comunidades de Hunucmá, Tetiz y Sisal, siendo la primera la que presentó un mayor cambio, no parece estar afectando de manera negativa la cobertura vegetal del área natural protegida, ya que ésta incrementó en el mismo periodo de tiempo. Sin embargo se desconoce si hay variación en las tasas de cambio de cobertura vegetal.

Con base en los resultados se puede decir que la vegetación presente en la reserva se encuentra en un buen estado de conservación, ya que en el periodo 2006 a 2014 se encontró un aumento de la cobertura vegetal.

La condición de la vegetación está relacionada con la temporalidad. Es decir la vegetación presentó una disminución de la condición en época de secas. Es importante destacar que la vegetación de manglar presenta una mayor dinámica que la otra vegetación, en este caso constituida por selva baja, vegetación de dunas costeras, pastizales, y peten, principalmente.

Se sugiere hacer más análisis entre este periodo de tiempo para evaluar los cambios en la vegetación, aunado a esto obtener las imágenes de la misma temporada para eliminar la variable de la temporalidad y obtener datos más precisos de las variables analizadas.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Bertuzzi, M.I. (coord.). 2005. Ciudad y urbanización. Universidad Nacional del Litoral. Serie de Extensión. Santa Fe. pp. 32-35.
- Oyama, K y Castillo A. (coord.) 2006. Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México: perspectivas desde la investigación científica. Siglo XXI: UNAM, Centro de Investigaciones en Ecosistemas. México. pp. 180-182.
- Fernández, Á. 2005. Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico. Universidad de Almería. España. Pag. 425.
- Durán, R., García, G. 2010. Distribución espacial de la vegetación. En c. Durán R., y Méndez, M. BIODIVERSIDAD Y Desarrollo Humano en Yucatán. (pp131-135) CICY PPD-FMAM, Conabio, Seduma. Mérida, Yuc.
- García, M.J., Urrutia, A., Bernabé, M.A. 2009. Diseño de herramientas de análisis espacio-temporales para el estudio de bases de datos históricas. En Proceedings of VI Jornadas Técnicas de la IDE de España (JIDEE 2009) Madrid
- Rosas, I., Carranza, G., Nava, Y., Larqué, A. 2006. La percepción sobre la conservación de la cobertura vegetal. En C. Uribina y Martínez (coord.), Más allá del cambio climático. Las dimensiones psicosociales del cambio ambiente global. (pp.123-140). México. INE.SEMARNAT, UNAM.
- Abaurrea, P.M. 2013. Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Pública de Navarra. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Ackerman, G., Mering, C., 2007. Extracción de áreas construidas a partir del análisis de imágenes satelitales SPOT. Actas del XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. 19, 20 y 21 de septiembre de 2007-Mar del Plata, Argentina.
- Acosta, E., et al, (2010) Plan de conservación de la eco-región Petenes-Celestún-Palmar. México, UAC, Pronatura PY. Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico
- Aguilar, A.G., Ward, P.M., Smith Sr., C.B., 2003. Globalization, regional development, and mega-city expansion in LatinAmerica: analyzing Mexico City's peri-urban hinterland. Cities 20, 3-21.
- Aguilera, A. J. 2012. Caracterización estructural y dinámica del paisaje en lagunas arrecifales: estudio de caso Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de Maestría en Ecología y Pesquerías. Universidad Veracruzana. Instituto de ciencias y Pesquerías.
- Altamirano, A., Echeverría, C., Lara, A. 2007. Efecto de la fragmentación forestal sobre la estructura vegetacional de las poblaciones amenazadas de *Legrandia concinna* (Myrtaceae) del centro-sur de Chile. Revista Chilena de Historia Natural 80: 27-42.
- Andrén, H. 1994. Effects of hábitat fragmentation on birds and mammals in landscape with different proportions of suitable habitat: a review. Oikos 71: 355-366.

- Barrera, A. 1982. Los petenes del noroeste de Yucatán: Su exploración ecológica en perspectiva. *Biotica*. Volumen 7 Num. 2 pp. 165-169.
- Belal, A.A., Moghanm, F.S., 2011. Detecting urban growth using remote sensing and GIS techniques in Al Gharbiya governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Sensing and Space Science* 14, 73-79.
- Benzanilla, C. D., Sosa, R. J., De Alba, A. A. 2008. Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques*, vol. 14, núm. 1 pp. 37-51.
- Campo, A. M., Peña, O., Gandullo, R., De la Cal, R. 2011. Papeles de Geografía. 53-54, pp. 35-48.
- Capote-Fuentes, R. T., Menéndez, L., Garcell, G., Macías, D., Roig, E Y. 2006. Regeneración de la vegetación como parte de la resiliencia del manglar; en Ecosistemas de manglar en el Archipiélago Cubano. *Estudios y experiencias enfocados a su gestión*. Editorial Academica La Habana. p.329.
- Castillo, Miguel Ángel. 2009. Análisis con imágenes satelitales de los recursos forestales en el trópico húmedo de Chiapas: Un estudio de caso en Marqués de Comillas. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología.
- Chablé, J.B. 2009. Composición y Distribución de la Avifauna de la Reserva Estatal El Palmar, Yucatán, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas.
- Chuvieco E. 2002. Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel, S. A. España. Pág. 41.
- Chuvieco, E. 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones RIALP, S.A. Madrid. Pag. 445.
- Chuvieco, E. 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*. Núm. 10 pp. 1-9.
- CIMARES, 2011. Política Nacional de Mares y Costas de México, en: SEMARNAT (Ed.), México, p.65.
- CONABIO, 2015. Manglares de México. En: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/manglares2013/manglares.html>. última vez consultada 7 de mayo 2015.
- CONANP, 2015. Áreas Naturales Protegidas. En [http://www.conanp.gob.mx/que\\_hacemos/](http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/). última vez consultada 7 de mayo 2015.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2014.
- Coronado, Z. M.E. 2014. Análisis de la fragmentación en el Parque Nacional Cerro Azul Meámbar (PANACAM). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Coutiño, Laura. 2013 Análisis multitemporal de imágenes satelitales en estudios ambientales. México. Tesina de Especialidad en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado de Ingeniería.
- Crawley, M. J. 2002. *Statistical Computing An Introduction to Data Analysis using S-Plus*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd.

- Diario Oficial del Gobierno de Yucatán. Acuerdo Número 100. 2007.
- Duch, J. 1988. La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico. Centro Regional de la Península de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo, México
- Durán, G. R., Méndez, G. M., ed. 2010. Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. Mérida, Yuc. 496 pp.
- ERDAS. (2010). *ERDAS Field guide*. USA.
- Fahring, L. 2003. Effects of fragmentation on biodiversity. *Annual Revision of Ecology Evolution and Systematics*. 34: 487-515.
- Forman, R. 1995. *Land Mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press. 632 p.
- Foster, D. 2002. Thoreau's country: a historical-ecological perspective on conservation in the New England landscape. *Journal of Biogeography*, 10, 1537-1555.
- García, T. J., Mas, J.F., 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. 67 pp. 7-19.
- Garmendia, A.C. 2012. Efectos de la fragmentación del hábitat sobre la diversidad de mamíferos terrestres en la Selva Lacandona, Chiapas: Una aproximación paisajística. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Ecosistemas.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, J. 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección*. Núm. 8 pp. 1-10.
- Gobierno del Estado de Yucatán. 2012. Programa Subregional de Desarrollo Integral de la Zona Costera de Yucatán 2007-2012.
- Gómez, M. A.M., Adolfo, A. J., Álvarez, D. E. 2005. Análisis de fragmentación de los ecosistemas boscosos en una región de la cordillera central de los andes colombianos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 4, núm. 7, pp. 13-27.
- Harrington, G.N., Freeman, A.N.D., Crome, F.H.J. 2001. The effects of fragmentation of an Australian tropical rain forest on population and assemblages of small mammals. *Journal of Tropical Ecology* 17: 225-240.
- Hernández, E. H. 2015. Uso del NDVI para determinar impactos ambientales en la vegetación ocasionados por la intervención del hombre mediante técnicas de percepción remota. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- Herold, M., Goldstein, N.C., Clarke, K.C. 2003. The spatio-temporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sens. Environ.* 86, 286-302.
- Herrera, A. M.L. 2013. Efectos de la fragmentación del hábitat en la diversidad y estructura genética de poblaciones de *Quercus castanea* Née, en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Ecosistemas.

- Herrera, A., 2013. Efectos de la fragmentación del hábitat en la diversidad y estructura genética de poblaciones de *Quercus castanea* Née, en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias Biológicas. Tesis de Doctorado.
- Herrera-Silvera, J. A. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, Diagnostico y Manejo. ECOTROPICOS 19(2): 94-108.
- INEGI 2010, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo de Población y Vivienda. 2010.
- INEGI. 2010. México en Cifras. Información nacional, por entidad federativa y municipios. En <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=31> última vez consultada 23 de enero de 2014.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2011. Aspectos Técnicos de Imágenes SPOT. En [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos\\_tecnicos\\_de\\_imagenes\\_spot.pdf](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_de_imagenes_spot.pdf) última vez consultada 9 de Enero de 2014.
- Kay, R. y J. Alder. 1999. Coastal Planning and Management. E & FN SPON, Londres 375 pp.
- Kennedy, R., Townsend, P. A., Gross, J. E., Cohen, W.B., Bolstad, P., Wang, Y.Q. Adams, P., 2009. Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. Remote Sensing of Environment 113, 1382-1396.
- Lara-Lara, J.R., *et al* 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, en *Capital Natural de México*, vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México, pp.109-134.
- Leff, Enrique, coord. 1990. Medio Ambiente y Desarrollo en México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades UNAM. Miguel Ángel Porrúa. México. 362 págs.
- LGEEPA. 2014. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1998, última reforma publicada el 05 de noviembre del 2011, artículo 3.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., Duhau, E., 2001. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: a case in Morelia city, Mexico. Landsc. Urban Plann. 55, 271- 285.
- López-Barrera, F. 2004. Estructura y función en borde de bosques. Ecosistemas 13(1): 67-77.
- Lubis, M.I., Langston, J.D. 2015. Understanding landscape change using participatory mapping and geographic information systems: case study in North Sulawesi, Indonesia. Procedia Environmental Sciences vol. 24 206-2014.
- Mandujano, H. R.A. 2013. Análisis multitemporal de las condiciones de la vegetación para el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl- Zoquiapan (PNIPZ), período 1996-2006, mediante imágenes AVHRR. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

- Mas Causel, J. F. 2001. Fragmentación de hábitats y evaluación de la biodiversidad en la región Los Petenes, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Ecología Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. Q026. México D.F.
- Mas, J.F., Correa, S. J. 2000. Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida Los Petenes, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, núm. 43, pp. 42-59.
- Maya, Y., Lacaze, B., Monteforte, M., Passini, M. F. 2004. Análisis de imágenes SPOT: erosión en la región montañosa del sur de la península de Baja California, México. *Terra Latinoamericana*, Enero-Marzo, 23-34.
- McGarigal, K., Marks, B.J. 1995. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW.GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest. Research Station. 122.
- Miranda, F. y Hernández, E.X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su Clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 28:29-179.
- Miranda, Gabriela. 2011. Generador de vistas rápidas de imágenes satelitales de SPOT, para representación espacial-visual-temporal en la estación ERMEXS, a través de un Sistema de Información Geográfica. México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado de Geografía.
- Mohan, M., Pathan, S. K., Narendrareddy, K., Kandya, A., Pandey, S., 2011. Dynamics of Urbanization and Its Impact on Land-Use/Land Cover: A Case Study of Megacity Delhi. *Journal of Environmental Protection* 2, 1274-1283.
- Moreno-Ruiz, J. 2013. Comparación de la cobertura y fragmentación del bosque de manglar entre un área natural protegida y área adyacente sin esquema de protección. Tesis de Licenciatura, Licenciatura en Manejo Sustentable de Zonas Costeras, Facultad de Ciencias, Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación-Sisal (UMDI-Sisal), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 91 p.
- Pastor-Guzman, J., P.M. Atkinson, J. Dash y Rioja-Nieto, R. En revisión. Spatiotemporal variation in mangrove chlorophyll concentration using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*.
- Pernneta J. y D. Elder. 1993. Cross-sectoral, Integrated Coastal Area Planning (CICAP): Guidelines and Principles for Coastal Area Development. A Marine Conservation and Development Report. IUCN, Suiza. 63 pp.
- Philipson, P., & Lindell, T. 2003. Can coral reefs be monitored from space. *Ambio*, 32,586-593.
- Pilon, P.G., Howarth, P.J., Bullock, R.A., 1988. An enhanced classification approach to change detection in semi-arid environments. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 54,1709-1716.
- Ponce de León, A.L. 2015. Plan de Manejo Paisajístico para la REP. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Arquitectura. Tesis de Licenciatura.
- Ramirez, G. 2003. El corredor biológico mesoamericano en México. *Biodiversitas* 47:4-7.

- Reboratti, C. 2000 Ambiente y sociedad: conceptos y relaciones. Ed. Ariel, Buenos Aires. Cáp. 1.
- Ricahrdson, A.J., y Wiegand, C.L. 1997. Distinguishing Vegetation from soilbackground Information, Photogrammetric Enginerring and Remote Sensing, 43(12): 1541-1552.
- Rioja-Nieto R., E. Barrera Falcón, G. Hinojosa-Arango & R. Riosmena-Rodríguez 2013. Benthic habitat  $\beta$ -diversity modelling and landscape metrics for the selection of priority conservation areas using a systematic approach: Magdalena Bay, Mexico as a case study. *Ocean&Coastal Management* 82: 95-103.
- Rioja-Nieto, R., Moreno-Ruiz, J. y Gómez-Valdéz, J. *Aceptado*. Efecto del Manejo de un Área Natural Protegida en el paisaje del bosque de manglar en la Península de Yucatán. *Hidrobiológica*.
- Rivera Arriaga, E., G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (eds.), 2004. El Manejo Costero en México. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 p.
- Rodríguez-Zúñiga M.T., Troche-Souza C., Vázquez-Lule A. D., Márquez-Mendoza J. D., Vázquez- Balderas B., Valderrama-Landeros L., Velázquez-Salazar S., UribeMartínez A., Acosta-Velázquez J., Díaz-Gallegos J., Cruz-López M. I. y Ressler R. 2012. Los manglares de México: estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo: 2ª y 3era etapas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. GQ004. México, D.F.
- Rosete, V. F., Pérez, D. JL., Bocco, G. 2008. Cambio de uso de suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. 67 pp. 39-58
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México
- San José. A. M. 2013. Respuesta de los roedores a la pérdida y fragmentación del hábitat: Un enfoque paisajístico en la Selva Lacandona, Chiapas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Ecosistemas.
- Sánchez, R., Rebollar, S., 1999. Deforestación en la Península de Yucatán, los retos que enfrentar. *Madera y Bosques* 5(2), 3-17.
- Santos T., Tellería, J.L. 2006. Pérdida y fragmentación del hábitat: efectos sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas*. 2006/2 pp. 3-12.
- Saunders, D.A., Hobbs, R.J., Margules, C.R. 1991. Biological consequences of ecosystems fragmentation: a review. *Conservation Biology*. 5: 18-32.
- Seingier, G., Espejel, I., & Fermán Almada, J. 2009 Jun 29. Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*. [Online] 1:1
- SEMAR. 2013. Percepción remota. Secretaria de Marina. En <http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion-remota.html> última vez consultada 9 de enero de 2014.

- SEMARNAT. 2006. Situación Ambiental de la Zona Costera y Marina, en particular Humedales Costeros y Manglares. Gestión 2000-2006. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2005. En [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_04/pdf/cap1.pdf](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/pdf/cap1.pdf). última consulta: 9 de enero de 2014.
- Sharman, P. 2009. Ecology and Environment. Rastogi Publications. New Delhi India. p.160.
- Silleos, G. N., Alexandridis, K. T., Gitas, Z. I., Perakis, K. 2006. Vegetation Indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. Geocarto International, Vol. 21, No. 4. pp. 21-28.
- Smith, T.M., Smith, R.L.. 2012. Elements of Ecology. 8 edición. Pearson Education Inc. United States of America.
- Soria, R. J., Granados, R.R. 2005. Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. CENIA Ergo Sum, vol. 12, núm. 2, pp. 167-174.
- Stow, D. A., Hope, A., McGuire, D., Verbyla, D., Gamon, J., Huemmrich, F., *et al.* 2004. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic tundra ecosystems. Remote Sensing of Environment, 89, 281-308.
- Suzanchi, K., Ravinder, K., 2011. Land use land cover change in National Capital Region of India: a remote sensing & GIS based two decadal spatial-temporal analyses. International Conferences: Spatial Thinking and Geographic Information Sciens 2011.Procedia Social and Behavioral Sciences. 212-221.
- Tillack, A., Clasen, A., Kleinschmit, B., Förster, M. 2013. Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices. Remote Sensing of Environment 141 pp. 52-63.
- Valdés, A. 2011. Modelos de paisaje y análisis de fragmentación de la biogeografía de islas a la aproximación de paisaje continuo. Ecosistemas 20 (2-3): 11-20.
- Valdez, J. R., González, J. Santos, H. M., 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. Revista Agrociencia. Volumen 40. Número 3.
- Vázquez-Lule, A. D. y Díaz-Gallegos, J. R. 2009. Caracterización del sitio de manglar El Palmar, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.
- Velázquez, A., *et al.* 2010. La cobertura vegetal y los cambios de uso de suelo, en *Atlas fisiográfico de la cuenca del Tepalcatepec*. INE, México, pp. 28-32.
- Viña, A., Estévez, J. 2013. Fragmentation of a tropical lowland forest in a trans-boundary region: Colombia and Ecuador. Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural. 17 (1), pp. 53-63.
- Vitousek, M.P., Mooney, A.H., Lubchenco, J., Melillo, M.J. 2008. Sciences, New Series, Vol. 227, No. 5325. pp. 494-499.

- Wang, D., Gong, J., Chen, L., Zhang, L., Song, Y., Yue, Y., 2012. Spatio-temporal pattern analysis of land use/cover change trajectories in Xihe watershed. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14, 12-21.
- Wang, X., Blanchet, G., Koper, N. 2014. Measuring hábitat fragmentation: An evaluation of landscape pattern metrics. *Methods in Ecology and Evolution* Núm. 5, pp. 634-646.
- Wu, J. 2008. Landscape Ecology. In: S. E. Jorgensen (ed), *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, Oxford. pp. 2103-2108.
- Xiao, J., Shen, Y., Ge, J., Tateishi, R., Tang, C., Liang, Y., Huang, Z., 2006. Evaluating urban expansion and use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. *Landscape and Urban Planning* 75 69-80.
- Zar, J. H. 1984. *Biostatistical Analysis*. USA, Prentice-Hall.
- Zaragoza- Peralta, L., Mota-Narváez, L.A., España-Boquera, M.L., Champo-Jiménez, O., Gutiérrez-Vázquez, E. 2014. Pérdida estimada de bosque tropical seco en Carácuaro, Mich., México (2004-2012) a partir del análisis comparativo de imágenes SPOT.