

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS**  
**COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

Análisis espacio-temporal del manglar en el Corredor Turístico  
Cancún-Tulum, Quintana Roo, utilizando imágenes de satélite

**TESIS**

**que para obtener el grado académico de:**

**LICENCIADA EN GEOGRAFÍA**

**Presenta:**

**Lorena Miranda Ramírez**

**Director de tesis:**

**M. en C. ARTURO GARRIDO PÉREZ**

México D. F. 2008



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.

# AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a M. en C. Arturo Garrido por sus consejos y sabiduría cuando los necesitaba. Aunque en ocasiones chocaban nuestras ideas, pero supimos manejar esas ideas.

Al Dr. Eduardo Peters (Profe) gracias por ser mi profesor de la carrera y enseñarme la importancia de conservar los recursos, además por estos 3 años, por darme la oportunidad de estar en la dirección aprendiendo toda clase de temas. Aunque me gano en la carrera de quién se titulaba de primero, pero por fin ya termine.

Pastor Gerardo por enseñarme el otro lado de la geografía, que no sólo es aprender cosas de memoria. Gracias por el tiempo dedicado y sus sabios consejos sobre esta tesis.

Al Mtro. José Morales gracias de todo corazón por enseñarme como aterrizar esas ideas en el papel y el tiempo dedicado.

Al Mtro. Toño Navarrete aunque fue todo precipitado la parte final de la tesis gracias por tus acertados comentarios que sin ellos no estaría terminada.

Quiero agradecer el apoyo prestado por las autoridades de la delegación de SEMARNAT en Quintana Roo, las facilidades para la realización del trabajo en campo.

Además a la CONANP de Puerto Morelos por las facilidades y apoyo en la verificación de puntos de manglar en el área.

A la familia Zaragoza Alvarez les agradezco por permitirme entrar a su hogar y el cariño brindado en estos años. Gracias al Sr. Alfonso Zaragoza por dedicarme tiempo para las correcciones de redacción de la tesis.

A mi madrina Gloria y Joy por su ayuda en la tesis y su cariño brindado en este tiempo. Donde quiera que estén gracias.

A toda la familia de Cancún por el apoyo durante el trabajo de campo y a mi prima Sakni gracias por acompañarme en mi trabajo de campo y esos ratos de diversión.

Mis amigos del CCH Vallejo Del, Belén, Clau, Tere, Gis e Iván gracias el apoyo, cariño, las patoaventuras que pasamos juntos y estar aun presentes en mi vida. También a mis amigos de la carrera Estrellita, Magys, Pau, Aurelio, Caro, AnaLilia y Araceli gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas. Aunque ya no los vea, otros no estén aquí, y tengamos diferencias aun están presentes en mi vida.

Leonel, Robert, Alex, Alba, Piliy Nora gracias por su apoyo y esos momentos de alegría. Asimismo, a los compañeros del INE: Chucho, Enrique, Gil, Carlitos, Noemí, Antonio, Salomón y José Luis por el apoyo para la realización de la tesis.

Gracias por el apoyo brindado y la preocupación de la realización de la tesis a la Dra. Ana Córdova y M. en C. Margarita Caso.

A los chicos del Instituto de Biología por enseñarme un poco el mundo de la biología en Xochimilco.

Por último quiero agradecer al Instituto Nacional de Ecología por permitirme trabajar aplicando los conocimientos que obtuve en mi formación académica, aprender sobre la conservación de los ecosistemas y seguir creciendo profesionalmente.

# Dedicatorias

Agradezco a mis padres Lorena y Roberto por el apoyo y amor incondicional brindado a lo largo de mi carrera profesional, así como en la vida y mi formación como una persona responsable.

A mis hermanos Beto, Andrea y Guadalupe por estar conmigo en las buenas y en las malas y darme su apoyo cuando lo necesitaba.

A mí cuñada Angélica por estar ahí y a mi sobrina Mayte por brindarme alegría en mi vida.

Y a ti mi pequeño Rigel por llenar ese hueco en mi corazón con tu amor, alegría y enseñanzas, por estar conmigo apoyándome a lo largo del camino, tanto académico como personal y gracias a ti termine mi tesis.

# PENSAMIENTOS

Hay tiempo para todo. Cada cosa a su tiempo.

Gottfried Keller

El único modo de superar una prueba es realizarla. Es inevitable.

El Anciano Cisne Negro Real

Todos los humanos son espíritus que sólo están de paso en este mundo. Todos los espíritus son seres que existen para siempre. Todos los encuentros con otras personas son experiencias y todas las experiencias son relaciones para siempre.

# CONTENIDO

I. Resumen.....	9
II. Introducción y justificación.....	10
III. Objetivos.....	13
III.1 Objetivo general.....	13
III.2 Objetivos particulares.....	13
IV. Hipótesis.....	13

## Capítulo 1. Percepción remota

Introducción.....	14
1.1 Definición.....	14
1.2 Importancia.....	15
1.3 Aplicaciones generales.....	16
1.4 Tipos de sensores.....	17
1.4.1 Sensores activos.....	17
1.4.2 Sensores pasivos.....	18
1.4.2.1 Landsat.....	18
1.4.2.2 Spot.....	21
1.5 Estructura de una imagen de satélite.....	22
1.6 Tipos de resolución.....	23
1.7 Procesamiento digital.....	24
1.7.1 Correcciones radiométricas.....	24
1.7.2 Correcciones geométricas.....	25
1.7.2.1 Métodos de re-muestreo geométrico.....	26
1.7.3 Clasificación de imágenes.....	27
1.7.4 Análisis e interpretación visual.....	27
1.7.4.1 Pre-Procesamiento de imágenes para su interpretación.....	28
1.7.4.2 Elementos de interpretación.....	29
1.7.5 Clasificación no supervisada.....	31
1.7.6 Clasificación supervisada.....	32
1.7.7 Algoritmos de clasificación.....	33

1.8 Evaluación de la exactitud de las clasificaciones.....	34
1.9 Análisis multitemporal con imágenes de satélite y SIG.....	36

## **Capítulo 2. El Manglar y su importancia**

2.1 ¿Qué son los manglares?.....	40
2.2 Importancia ecológica.....	46
2.2.1 Fauna asociada a los manglares.....	53
2.3 Distribución geográfica mundial del manglar y su tendencia actual.....	55
2.4 Problemática del manglar en el mundo y en México.....	59
2.4.1 Conversión a tierras de cultivo o ganaderas.....	61
2.4.2 Tala de árboles.....	61
2.4.3 Taninos.....	61
2.4.4 Instalación de industria camaronera.....	62
2.4.5 Caminos de terracería y carreteras.....	64
2.4.6 Asentamientos humanos y desarrollos turísticos.....	65
2.4.7 Infraestructura petrolera.....	65
2.4.8 Instalación de líneas de energía eléctrica.....	65
2.5 Restauración del manglar.....	65
2.6 Distribución geográfica del manglar en México y su tendencia actual.....	69
2.7 Métodos para el mapeo del manglar.....	72
2.7.1 Percepción remota y el mapeo del manglar.....	72
2.8 Problemas durante el mapeo del manglar utilizando imágenes de satélite	77

## **Capítulo 3. Área de estudio**

3.1 Localización y vías de acceso.....	80
3.2 Clima.....	81
3.3 Geología.....	81
3.4 Fisiografía.....	82
3.5 Geomorfología.....	83
3.6 Hidrología.....	84
3.7 Suelos.....	85
3.8 Vegetación.....	86
3.9 Fauna.....	87



3.10 Características generales de la población.....	88
3.11 Principales problemas ambientales.....	89

## **Capítulo 4. Materiales y métodos**

4.1 Materiales.....	91
4.1.1 Imágenes de satélite.....	91
4.1.2 Fotografías aéreas.....	92
4.1.3 Cartografía.....	92
4.2 Método supervisado.....	93
4.2.1 Clasificación digital.....	94
4.3 Evaluación de la exactitud de las clasificaciones.....	99
4.3.1 Verificación para la fecha 1.....	99
4.3.2 Verificación para la fecha 2.....	99
4.3.3 Verificación para la fecha 3.....	99
4.3.4 Verificación para la fecha 4.....	100
4.4 Análisis de cambios de uso de suelo y vegetación.....	100
4.5 Estimación de la tasa de pérdida del manglar.....	102

## **Capítulo 5. Resultados y discusión**

5.1 Método supervisado y validación de la exactitud.....	103
5.1.1 Fecha uno (1972).....	103
5.1.2 Fecha dos (1988).....	106
5.1.3 Fecha tres (1990).....	109
5.1.4 Fecha cuatro (2006).....	112
5.2 Trabajo de campo.....	115
5.3 Análisis espacio-temporal en el SIG.....	116
5.3.1 Cambios de los 70's a 80's.....	117
5.3.2 Cambios de los 80's a 90's.....	120
5.3.3 Cambios de los 90's al 2006.....	122
5.3.4 Cambios de los 70's al 2006.....	124
5.3.5 Cambios totales en el manglar.....	127
5.3.5.1 Dinámica del manglar de los 70's al 80's.....	128
5.3.5.2 Dinámica del manglar de los 80's a 90's.....	131

5.3.5.3 Dinámica del manglar de los 90's al 2006.....	132
5.3.5.4 Dinámica del manglar de los 70's al 2006.....	137
5.4 Tasa de pérdida del manglar.....	140

## **Capítulo 6. Conclusiones**

Conclusiones y recomendaciones.....	142
Bibliografía.....	145

# I. Resumen

En el Corredor Cancún-Tulum se encuentran diversos tipos de vegetación con gran importancia ambiental debido a los servicios ecosistémicos que le brindan a la población que allí se asienta. Entre ellos, el manglar que es un ecosistema complejo y frágil y cuyas tasas aceleradas de pérdida y deterioro han atraído la atención nacional y mundial.

Uno de los principales problemas para su estudio y conservación en esta zona, es su delimitación geográfica exacta, para así poder comprender mayormente su degradación y pérdida.

En el presente estudio se ha recurrido a la percepción remota para obtener, de una manera rápida y eficaz, un inventario sobre la distribución espacial del manglar así como su extensión a lo largo del corredor turístico; no está por demás expresar que su degradación, fragmentación y pérdida obedece principalmente al desarrollo de actividades turísticas.

Empleando a la percepción remota es posible conocer, identificar y clasificar diferentes tipos de vegetación y cobertura del terreno como los manglares, pues es común en esta zona que éstos se desarrollen en lugares con acceso restringido provocando que su levantamiento directo en campo sea muy complicado.

Para comprender mejor el estado actual del manglar en la zona de estudio, se optó por realizar diversas clasificaciones digitales de imágenes de satélite (bajo el método *supervisado*) con 12 diferentes tipos de cobertura y vegetación del terreno a lo largo de las cuatro fechas disponibles (70's, 80's, 90's y 2006), para de esta forma, obtener una visión global sobre el comportamiento espacial del manglar y los otros tipos de vegetación en un periodo que cubre 36 años.

Los mapas obtenidos de las clasificaciones fueron evaluados empleando matrices de confusión, por lo que se considera que la tasa global de pérdida de manglar en la zona de estudio es de 25 km<sup>2</sup> por año.

## II. Introducción y justificación

Los ecosistemas marinos y costeros forman parte de los ambientes más productivos en el mundo, además proporcionan importantes servicios ambientales para la sociedad. Sin embargo, la mayoría de estos ecosistemas se han degradado, alterado o destruido, debido al cambio de uso de suelo ocasionado principalmente por el crecimiento desmedido de las poblaciones humanas (UNEP, 2006).

Se sabe que, del total de la población costera en el mundo, el 71% vive a menos de 50 kilómetros de distancia de los estuarios, y en regiones tropicales, los asentamientos se concentran más cerca de los manglares y de los arrecifes coralinos. Mucha de la población costera de los trópicos y subtrópicos reside cerca de los manglares; el 64% de todos los manglares del mundo están actualmente a 25 kilómetros, en promedio, de centros urbanos importantes, es decir, mayores a 100 000 habitantes. Por lo tanto, muchas áreas de manglar en el mundo han llegado a degradarse debido a la presión ejercida por la población a través de la conversión de su hábitat y contaminación (*idem*).

En México, en las últimas cuatro o cinco décadas, la actividad humana se ha convertido en un importante elemento modificador de la naturaleza y los procesos ecológicos. Se ha estimado una deforestación de entre 370 000 y 1 500 000 ha/año, presentando una tasa anual que va de 0.8 a 2% anual (Velázquez *et al.* 2002 citado en Masera, 1996). Al menos el 50% de la superficie original forestal se ha perdido o deteriorado a tal grado que su papel ecológico se ha perdido en su totalidad (Velázquez *et al.* 2002 *op cit* Toledo, 1989; Masera, 1996).

La disminución o eliminación de la cubierta vegetal original, ocasiona problemas tales como la modificación en los ciclos hidrológicos, de carbono y de nutrientes así como cambios regionales en el clima, el descenso de la acumulación de CO<sub>2</sub>, y la fragmentación de los ecosistemas o la pérdida de hábitat (Aguilar *et al.* 2000). Por lo tanto, esto conlleva a que se den fenómenos críticos como la extinción de especies a escala local o regional, a que exista una alta ocurrencia de plaga en una zona, a que se dé un aumento en los procesos de erosión del suelo, alteración de recarga de los mantos acuíferos, entre otros (FAO, 1993).

Debido a su importancia ecológica y a la particularidad de combinar algunas características propias de ecosistemas terrestres y acuáticos, los manglares son sistemas naturales complejos y frágiles; éstos brindan una serie de servicios ambientales fundamentales para la sociedad tales como, la prevención de inundaciones, sirven como barreras contra el impacto de huracanes y tsunamis, son excelentes almacenadores de carbono, son buenos filtradores y descontaminadores de las aguas provenientes de los ríos de cuenca arriba y también son generalmente el sostén de una alta biodiversidad.

Por otro lado, el ecosistema manglar es difícil de evaluar debido a su distribución tan estrecha a lo largo de las costas del país. Sin embargo, en un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología (2005) en el período de 1976 al 2000 empleando fuentes cartográficas con escala 1: 250 000, la tasa de pérdida anual a nivel nacional se estimó en 2.5%; esto es, para la vertiente del Golfo de México fue de 2.8% y para la del Pacífico fue de 2.0%. De mantenerse esta tasa, en unos de 20 años los manglares perderán la mitad de la extensión que tenía en el año 2000.

Según datos del INE (2005), los manglares están desapareciendo a un ritmo de cerca de 10 mil hectáreas por año, hecho que motivó la creación de la Norma Oficial Mexicana 022 (NOM-022) para proteger a estos ecosistemas en 2003, y en 2007 se modificó la Ley General de Vida Silvestre (Artículo 60 TER) quedando totalmente prohibido el aprovechamiento del manglar.

El área de estudio objeto de este trabajo fue seleccionada por ser uno de los territorios que mejor ejemplifican la degradación de los manglares en México, debido a la enorme presión que es ejercida sobre estos ecosistemas por el desarrollo turístico financiado por inversiones nacionales y trasnacionales.

En la zona de estudio aún se puede apreciar la existencia de selvas medianas, al menos tres tipos de selvas bajas, selvas enanas, tintales, tulares y cuatro tipos diferentes de manglar (Conabio, 2006). Estos hábitats también le dan sustento a un sinnúmero de fauna y por supuesto como ya se remarcó arriba, los servicios ambientales que le brindan al ser humano son vitales para su supervivencia. Por esto, desde 1994 existe un Acuerdo de Coordinación para el Ordenamiento Ecológico de esta zona, denominada Corredor Cancún-Tulum, firmado por instancias federales, estatales y municipales.

Por todo lo anterior, es necesario y apremiante realizar un seguimiento de esta cobertura vegetal para establecer su comportamiento en el tiempo y el espacio, campo de estudio que compete al quehacer geográfico principalmente por su carácter territorial, y con ello poder diseñar y mejorar las políticas públicas para su protección y conservación.

### **III. Objetivos**

Los objetivos del presente estudio se enumeran a continuación:

#### **III. 1 Objetivo general**

Analizar la dinámica espacio-temporal del manglar en el área definida como “Corredor Turístico Cancún-Tulum” en el Estado de Quintana Roo, empleando imágenes satelitales a lo largo de un período de 36 años.

#### **III. 2 Objetivos particulares**

- Realizar 4 mapas de la cobertura vegetal y uso del suelo del área de estudio empleando imágenes de satélite de 4 diferentes fechas
- Realizar el análisis espacial de los cambios en la cobertura del manglar utilizando los mapas elaborados
- Establecer la tasa de deforestación del manglar entre cada periodo comparativo así como las tendencias espaciales de cambio de este ecosistema
- Presentar la distribución geográfica y la extensión actual del manglar en la zona de estudio
- Determinar algunas causas de degradación y deforestación del manglar en el área bajo análisis así como algunas recomendaciones

### **IV. Hipótesis**

La percepción remota es una herramienta fundamental para realizar un seguimiento del comportamiento geográfico del manglar a lo largo del tiempo. En particular, resulta útil para detectar aquellos cambios en el paisaje debidos a actividades antrópicas.

# Capítulo 1. Percepción Remota

## Introducción

En los últimos años, la percepción remota (PR) ha sido una eficaz herramienta metodológica y tecnológica para una gran variedad de estudios sobre la superficie terrestre y muy importante cimiento, desde la década de los cincuentas, para la cartografía de la vegetación. Esta ciencia y arte ha servido para conocer, identificar y clasificar una gran variedad de ecosistemas y tipos de vegetación y coberturas del terreno, entre ellos el manglar; éstos son un caso especial como muchos otros ya que, por lo general, se desarrollan en zonas de difícil acceso para los especialistas que realizan trabajos de investigación *in situ* mediante métodos convencionales (Alvarez e Interián, 2005); la percepción remota también brinda una visión sinóptica de la superficie terrestre que no se podría complementar sin un trabajo de campo exhaustivo (Kannan *et al.*, 1998).

Por otro lado, la creciente necesidad de monitorear y evaluar la estructura de los manglares y su dinámica, ha permitido ganar una mejor comprensión de su biología y ayudar a guiar los esfuerzos de conservación y restauración (Wang *et al.*, 2004; Hussin *et al.*, 1999). En este campo, la PR es importante porque ayuda a identificar e inventariar a los humedales en una zona de interés, así como llevar a cabo una planificación y gestión para una conservación adecuada de los mismos (Vega, 2006).

Por lo tanto, cabe mencionar que no se debe tener la idea errónea que la percepción remota nos brinda toda la información de algún sitio en particular, sino que proporciona parte de la información necesaria para las investigaciones físicas, biológicas o sociales (Jensen, 2007); el trabajo de campo es fundamental.

## 1.1 Definición

La percepción remota (PR) es la ciencia y el arte de adquirir información sobre un objeto, área o fenómeno de la superficie terrestre, por medio del análisis de los datos



adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Lillesand and Kiefer, 1994).

Los datos obtenidos a través de la percepción remota pueden utilizarse con una mayor eficacia, si el usuario cuenta con la habilidad necesaria para interpretar correcta y consistentemente, imágenes, fotografías, gráficas o estadísticas derivadas de los datos. Para ello, se debe contar con personal capacitado como geólogos, geógrafos, físicos, agrónomos, ingenieros forestales, etc., que tengan cierto dominio del espacio geográfico para así evitar demoras innecesarias y usos inapropiados de los datos, así como una errónea interpretación (USAID, 1993).

La PR es una alternativa para llevar a cabo levantamientos de la superficie terrestre presentando algunas ventajas sobre los métodos tradicionales como el trabajo de campo, aunque más que invalidarlos los complementa muy adecuadamente (Chuvienco, 2002; Bragachini *et al.*, 2006).

## **1.2 Importancia**

La percepción remota es una herramienta de gran ayuda para poder localizar, inventariar y cuantificar muchos de los recursos naturales del planeta, desde los minerales hasta los cuerpos de agua. Con esta herramienta se pueden llevar a cabo estudios diversos como los diferentes levantamientos de objetos de la superficie terrestre hasta análisis estadísticos y geo-estadísticos más complejos.

Asimismo, puede ser de gran importancia en un amplio rango de aplicaciones, como por ejemplo, la delimitación y caracterización de humedales, mapeo de la composición de especies vegetales, hidrología, asentamientos humanos, vías de comunicación, geomorfología, geología, etc., así como para el desarrollo de planes de manejo, zonificación para un uso adecuado de los recursos, identificación de amenazas y monitoreo de cambios en la cobertura vegetal y de otras aplicaciones de carácter ecológico. (<http://sedac.ciesin.org/ramsardg/casestudies/index.html>)

Por lo que no se debe tener la idea equivocada de que la PR brinda toda la información de la superficie terrestre, sino que es tan sólo una herramienta más que proporciona parte de la información necesaria para algún estudio específico (Jensen, 2007).

La ventaja que presenta la percepción remota sobre los métodos convencionales (trabajo en campo, fotografía aérea) es el costo, la rapidez y la extensión del cubrimiento, por ejemplo, si se requiere de un estudio de una zona muy extensa, con fotografía aérea convencional sería muy costoso y con imágenes de satélite sería relativamente menor. Si es el caso de estudiar un incendio por ejemplo, la necesidad de contar con datos actuales y rápidos es primordial para evitar desastres.

### **1.3 Aplicaciones generales**

En un principio los datos que se obtuvieron de la percepción remota se utilizaron principalmente para uso militar, aunque hoy en día se han diversificado en una amplia gama de disciplinas (Bragachini *et al.*, 2006). Los datos obtenidos de una imagen o de fotografías aéreas pueden llegar a emplearse en cuestiones agronómicas, planificación de uso de suelo urbano e industrial, estudios de suelo y vegetación, detección y monitoreo de cambios de la cobertura vegetal, exploración minera y petrolera, ecología, forestal, geología, hidrología, oceanografía, meteorología, medio ambiente (<http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/>), geomorfología, ingeniería de carreteras, etc.

Un ejemplo de su aplicación es en el estudio del fenómeno de El Niño, así como en la realización de mapas de la temperatura de la superficie del mar. También se utilizan en la evaluación de algunos parámetros como la biomasa, el nivel del mar, la precipitación y los vientos superficiales (Janssen, 2001), trayectoria de huracanes, incendios forestales, tsunamis, sismos, etc.

Hoy en día, el empleo de los satélites, como se ha mencionado, tiene una gran variedad de aplicaciones, por lo que, algunos se emplean en cuestiones

meteorológicas como NOAA-AVHRR<sup>1</sup>, Meteosat, GOES<sup>2</sup>, Insat<sup>3</sup>, GOMS<sup>4</sup>. Asimismo, hay satélites que se enfocan al estudio de los recursos naturales como IRS<sup>5</sup>, LISS<sup>6</sup> (I-II), Radarsat, ASTER<sup>7</sup>, MODIS, Landsat (1-7) y Spot (1-5). Sin embargo, hay satélites que nos brindan una alta resolución como Ikonos y Quickbird, para cuestiones catastrales (Chuvieco, 2002) y urbanas.

## 1.4 Tipos de sensores

Los sensores son dispositivos que registran y miden la energía electromagnética (Janssen and Bakker, 2001). Se dividen en sensores activos y pasivos.

### 1.4.1 Sensores activos

Cuando se habla de sensores activos se refiere a los que emiten su propio haz de energía (Chuvieco, 2002), es decir generan su propia fuente de energía. En los sensores activos las mediciones son más controladas porque no dependen de las condiciones de iluminación (Janssen and Bakker, 2001), es decir, no importa si es de día o de noche e inclusive si se encuentra cubierto de nubes el área de interés. Un ejemplo de este tipo de sensores es el Radarsat o el altímetro láser.

Este tipo de sensor se utiliza cuando la radiación solar en una banda particular del espectro no es suficiente para iluminar adecuadamente al objeto, ya que se encuentra por debajo del umbral de la señal, por lo que el objeto no llega a distinguirse (Butler *et al.*, 1990).

Por último, se puede utilizar para medir el estado hídrico de los cultivos en una zona o para generar Modelos Digitales del Terreno, mapas topográficos y modelos de 3D (tercera dimensión) de la superficie terrestre y del fondo marino.

---

<sup>1</sup> National Oceanic Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer

<sup>2</sup> Geostationary Operational Environmental Satellite

<sup>3</sup> Indian National Satellite

<sup>4</sup> Geostationary Operational Meteorological Satellite

<sup>5</sup> Indian Remote Sensing Satellite

<sup>6</sup> Linear Imaging Self Scanning

<sup>7</sup> Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

## 1.4.2 Sensores pasivos

Estos sensores dependen de una fuente externa de energía, usualmente el sol (Janssen and Bakker, 2001). Los sensores que entran en este grupo son: espectrómetros de rayos gamma, cámaras fotográficas, cámaras de video, escáner multiespectral, escáner termal, etc. (Chuvieco, 2002; Janssen and Bakker, 2001). Con este sistema se realizan mapas topográficos, mapas catastrales, tipo y salud de la vegetación, aplicaciones geológicas y detección de incendios.

A continuación se explica con detalle el satélite Landsat y Spot debido a que se emplearon para llevar a cabo esta tesis.

### 1.4.2.1 Landsat

El programa Landsat es una serie de satélites de observación de los recursos naturales, que se encuentra operada conjuntamente por National Aeronautics and Space Administration (NASA) y el U.S. Geological Survey (USGS), desde 1972. (NASA, 2007).

El primer satélite lanzado de esta serie fue el Landsat 1, el 23 de julio de 1972, que anteriormente se llamaba ERTS (Earth Resources Technology Satellite). A bordo transportaba 2 instrumentos: Return Beam Vidicon (RBV) y el *Multispectral Scanner* (MSS) (NASA, 2007). En enero de 1978 se dejó de utilizar.

El Landsat 2 fue lanzado el 22 de enero de 1975, contaba con los mismos sensores que su predecesor. En febrero de 1982 después de siete años de operaciones se dejó de utilizar.

El Landsat 3 fue lanzado el 5 de marzo de 1978, transportó los mismos sensores que sus antecesores. A este satélite se le incorporó una quinta banda (Infrarrojo térmico), por lo que se logró obtener datos a cualquier hora del día, sin embargo pocos meses después salió de operación. En marzo de 1983 se dejó de utilizar.

El Landsat 4 fue lanzado el 16 de julio de 1982. Este satélite además de contar con *MultiSpectral Scanner* (MSS) se le incorporó un nuevo instrumento llamado *Thematic Mapper* (TM) proporcionando una mejor resolución espectral, radiométrica y espacial, es decir, de 4 a 7 bandas, de 6 a 8 bits y de 80 a 30 m respectivamente (Butler *et al.*, 1990; Chuvieco, 2002; NASA, 2007; Richards, 1993). En el 2001, quedó fuera de servicio.

El Landsat 5 lanzado el 1 de marzo de 1984, transportó los mismos sensores que el Landsat 4, el MSS y el TM. En agosto de 1995 fue apagado el MSS. En noviembre del 2005, las operaciones del satélite fueron suspendidas a causa de problemas con los paneles solares y el 30 de enero del 2006 reanudó sus operaciones normalmente.

El Landsat 6 fue lanzado el 5 de octubre de 1993 pero una falla después de su lanzamiento causó que no alcanzara la velocidad necesaria para obtener órbita. Este llevaba un nuevo sensor denominado *Enhanced Thematic Mapper* (ETM).

Y el último de los satélites de este programa fue el Landsat 7 lanzado el 15 de abril de 1999, se rediseñó el sensor siendo el *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+). Incluyó una característica adicional, la banda pancromática con una resolución espacial de 15 m y la resolución espacial de la banda térmica a 60 m (Chuvieco, 2002; NASA, 2007).

En la tabla 1 se muestra las características de cada uno de los satélites del Programa Landsat.

Tabla 1. Características de los satélites Landsat

	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 7
Sensor	RBV y MSS	RBV y MSS	RBV y MSS	MSS y TM	MSS y TM	ETM+
Órbita	Heliosincrónica	Heliosincrónica	Heliosincrónica	Heliosincrónica	Heliosincrónica	Heliosincrónica
Hora local	9:30 -10:00 am	9:30 -10:00 am	9:30 -10:00 am	9:30 -10:00 am	9:30 -10:00 am	9:30 -10:00 am
Altitud	920 km	920 km	920 km	705 km	705 km	185 km
Duración orbital	18 días	18 días	18 días	16 días	16 días	16 días
Número de bandas	4	4	4 y una termal	7	7	7 y una pancromática
Longitud	B4 0.50-0.60	B4 0.50-0.60	B4 0.50-0.60	B1 0.45-0.52	B1 0.45-0.52	B1 0.45-0.52

	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 7
( $\mu\text{m}$ )	B5 0.60-0.70 B6 0.70-0.80 B7 0.80-1.10	B5 0.60-0.70 B6 0.70-0.80 B7 0.80-1.10	B5 0.60-0.70 B6 0.70-0.80 B7 0.80-1.10 B8 10.5-12.4	B2 0.52-0.60 B3 0.63-0.69 B4 0.76-0.90 B5 1.55-1.75 B6 10.4-12.5 B7 2.08-2.35	B2 0.52-0.60 B3 0.63-0.69 B4 0.76-0.90 B5 1.55-1.75 B6 10.4-12.5 B7 2.08-2.35	B2 0.52-0.60 B3 0.63-0.69 B4 0.76-0.90 B5 1.55-1.75 B6 10.4-12.5 B7 2.08-2.35 PAN 0.50-0.90
Resolución (m)	80	80	80 y 240 <sup>a</sup>	30 y 120 <sup>a</sup>	30 y 120 <sup>a</sup>	30, 60 <sup>a</sup> y 15 <sup>b</sup>
Resolución radiométrica (bits)	6	6	6	8	8	8

<sup>a</sup> Banda termal    <sup>b</sup> Pancromática

Fuente: Bakker, 2001; Butler *et al.*, 1990; Canada Centre for Remote Sensing, 2007; Howard, 1991; Jensen, 1996; Pouncey *et al.*, 1999; Richards, 1993

En la figura 1 se puede apreciar la cronología del Programa Landsat.

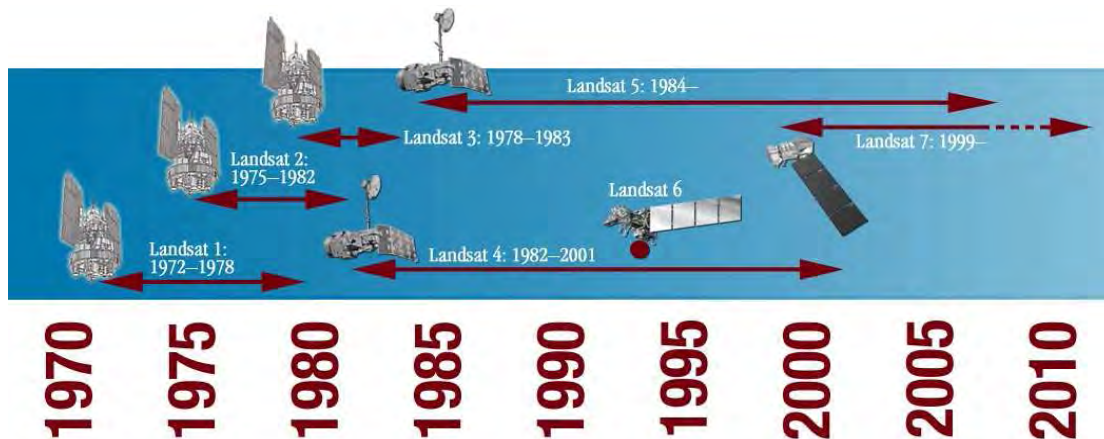


Figura 1. Cronología del programa Landsat. Fuente: Nasa, 2007

En mayo del 2003, el satélite Landsat sufrió un desperfecto en un componente de almacenamiento. Al principio se pensó que sólo era un error de calibración del sensor, pero se descubrió que dichos sensores, en el borde izquierdo de la imagen, no registraban información en algunas líneas, dejando huecos visibles sin registrar (NASA, 2007).

Actualmente, la LDCM (Landsat Data Continuity Mission por sus siglas en inglés) es el futuro de los satélites Landsat, éste seguirá obteniendo datos valiables e imágenes para ser usadas en la agricultura, educación, comercio, ciencia y el

gobierno (<http://ldcm.gsfc.nasa.gov/>). Las imágenes adquiridas proporcionarán una visión global, sinóptica y de cobertura repetitiva de la superficie terrestre a una escala donde los cambios naturales e inducidos por el hombre pueden ser detectados, diferenciados, caracterizados y monitoreados en el tiempo ([http://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/apr/HQ\\_C08021\\_Landsat\\_Data.html](http://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/apr/HQ_C08021_Landsat_Data.html)).

#### 1.4.2.2 Spot

La constelación de satélites Spot (Système Pour l'Observation de la Terre) fue diseñada y desarrollada por CNES (Centre National d'Études Spatiales) de Francia con apoyo del gobierno de Suecia y Bélgica. El primer Spot se lanzó el 21 de febrero de 1986, y Spot 2 y 3 en 1990 y 1993 respectivamente (Canada Centre for Remote Sensing, 2007; Jensen, 1996). A bordo transportaba el sensor: *2 High Resolution Visible* (HRV) que opera en dos modos multiespectral y pancromático (Pouncey *et al.*, 1999).

El Spot 4 fue lanzado el 24 marzo de 1998, llevando a bordo el *High Resolution Visible Infrared* (HRVIR) que obtiene información del espectro visible y del infrarrojo cercano. Sin embargo, en lugar de tener 3 bandas como los anteriores satélites, se le agregó una banda así como el instrumento VEGETATION (Bakker, 2001).

El Spot 5 es el quinto satélite de la serie Spot que fue lanzado el 4 de mayo del 2002, llevando a bordo dos instrumentos de *High Resolution Geometric* (HRG) y el VEGETATION 2.

Los satélites SPOT tienen la capacidad de ser dirigidos hasta 27° a la izquierda o a la derecha de la trayectoria orbital. Esta característica permite vistas repetidas, fuera del nadir, de una misma franja del terreno, produciendo imágenes estereoscópicas (USAID, 1993), esto se realiza por programación desde una estación en Tierra (Pouncey *et al.*, 1999).

En la tabla 2 muestra las características generales de los satélites Spot.

Tabla 2. Características de los satélites Spot

	Spot 5	Spot 4	Spot 1 a 3
Instrumentos	2 HRG y VEGETATION 2	2 HRVIR y VEGETATION 1	2 HRV
Órbita	heliosincrónica	heliosincrónica	heliosincrónica
Hora local	10: 30 am	10: 30 am	10: 30 am
Altitud	822 km	822 km	822 km
Duración orbital	26 días	26 días	26 días
Número de bandas	4 y una pancromática	4 y una monoespectral	4 y una pancromática
Longitud ( $\mu\text{m}$ )	B1 0.50-059 B2 0.61-0.68 B3 0.78-0.89 B4 1.58-1.75 P 0.48-0.71	B1 0.50-059 B2 0.61-0.68 B3 0.78-0.89 B4 1.58-1.75 M 0.61-0.68	B1 0.50-059 B2 0.61-0.68 B3 0.78-0.89 P 0.50-0.73
Resolución (m)	10 <sup>a</sup> , 20 <sup>b</sup> y 5 ó 2.5 <sup>c</sup>	20 <sup>a</sup> , 20 <sup>b</sup> y 10 <sup>c</sup>	20 <sup>a</sup> y 10 <sup>c</sup>
Resolución radiométrica (bits)	8	8	8

<sup>a</sup> bandas multispectrales    <sup>b</sup> banda infrarroja media    <sup>c</sup> banda pancromática

Fuente: Spot Image, 2005

El 11 de septiembre del 2003 se firmó el convenio para la recepción directa de los satélites SPOT 2, 4 y 5 entre Spot Image y el Ejecutivo Federal de los Estados Unidos Mexicanos, a través de Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA), Órgano Administrativo Desconcentrado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (Spot Image, 2005), por lo tanto desde esa fecha se cuenta con imágenes Spot.

## 1.5 Estructura de una imagen de satélite

En términos generales, una imagen es una *fotografía* en formato digital o representación de un objeto. Cada imagen registrada a distancia, representa digitalmente la superficie terrestre (Pouncey *et al.*, 1999), es decir, son las mediciones de la energía del espectro electromagnético. Los datos de una imagen son almacenados en un formato de rejilla o matriz (filas y columnas) (Fig. 2). El elemento mínimo más simple es llamado *píxel* (pequeña parte de la imagen con un único valor), que es la abreviatura de “*elemento pictórico*” (*picture element* en inglés). Para cada píxel, las mediciones se almacenan como Niveles Digitales (ND), que corresponden a una longitud de onda específica (Janssen & Bakker, 2001). Su



nombre se debe a que se trata de un valor numérico, y no visual, pero que puede entenderse como una intensidad visual o a un nivel de gris (Chuvienco, 2002).

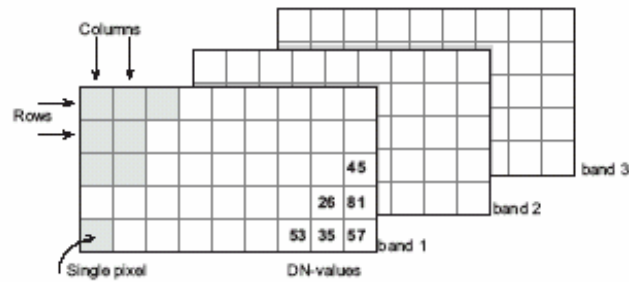


Figura 2. La estructura de una imagen multispectral (Janssen & Bakker, 2001)

El conjunto de esas filas y columnas conforman una matriz donde el origen de coordenadas se ubica en la parte superior izquierda (fila 1, columna 1), en lugar de la parte inferior izquierda como en un plano cartesiano, esto se debe a que la secuencia del registro de la imágenes, es de Norte-Sur, de acuerdo a la traza del satélite (Chuvienco, 2002).

La "calidad" de los datos de la imagen está determinada principalmente por las características del sensor. Estas características se refieren a: resolución espacial, resolución espectral, resolución radiométrica y resolución temporal (Janssen & Bakker, 2001).

## 1.6 Tipos de resolución

Podemos entender la resolución de un sensor como la capacidad para distinguir o discriminar información a detalle (Chuvienco, 2002).

Existen cuatro tipos de resolución que separados contienen información que puede ser extraída de los datos en bruto de una imagen (Pouncey *et al.*, 1999).

La resolución espacial es la capacidad de distinguir objetos de la superficie terrestre que se encuentran cerca unos de otros en una imagen o fotografía aérea. Cuanto más pequeño es el tamaño del píxel, mayor será la resolución (USAID, 1993). Este

tipo de resolución se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen (Rosete y Bocco, 2003).

La resolución espectral se refiere al ancho de banda o a un rango de bandas que ofrece el sensor (USAID, 1993), es decir, un amplio intervalo en el espectro electromagnético representa una gruesa resolución espectral, en cambio, un estrecho intervalo se refiere a una fina resolución espectral (Pouncey *et al.*, 1999).

La resolución radiométrica es el grado de sensibilidad que tiene el sensor, o sea (Rosete y Bocco, 2003) detecta variaciones en la radiancia espectral que recibe (Chuvienco, 2002). Por ejemplo, en datos de 8 bits, los valores de los datos van de un rango de 0 a 255 por cada píxel, pero en 1 de 6 bits, los valores de cada píxel tienen un rango de 0 a 128 (Pouncey *et al.*, 1999).

La resolución temporal se refiere a la frecuencia en que el sensor obtiene imágenes de un área en particular. Por ejemplo, el satélite Landsat registraba la misma área cada 16 días, por otro lado Spot revisita el mismo punto cada 3 días (Pouncey *et al.*, 1999).

## **1.7 Procesamiento digital**

Las imágenes de satélite en ocasiones presentan errores debido a las condiciones ambientales y topográficas además de aspectos técnicos del sensor, por lo que se deben de realizar las correcciones apropiadas antes de analizar los datos, puesto que puede alterar la calidad de la información colectada e interpretada. Los tipos más comunes de errores que se encuentran en una imagen son los radiométricos y geométricos (Jensen, 1996).

### **1.7.1 Correcciones radiométricas**

La corrección radiométrica se refiere a aquellas técnicas que modifican los ND originales de una imagen, acercándolos a los que habría en las condiciones ideales (Chuvienco, 2002). Los errores pueden ser introducidos por el sensor cuando los

detectores individuales no funcionan apropiadamente o son incorrectamente calibrados a lo que se le conoce como bandeado (*idem*; Teillet, 1986).

Además se puede presentar en una imagen una serie de líneas anómalas negras o blancas o algunos píxeles aislados que son diferentes a los vecinos (este último conocido como “sal y pimienta”), esto se debe a un mal funcionamiento del sensor o de la antena receptora. Si se encuentra alguno de éstos, la información se pierde por completo. La forma de contrarrestar este error es estimando los ND de los píxeles erróneos con sus vecinos (Chuvieco, 2002).

$$ND_{i,j} = ND_{i-1,j}$$

donde  $ND_{i,j}$  corresponde al nivel digital del píxel de la línea  $i$  (la defectuosa) y columna,  $j$ , y  $ND_{i-1,j}$ , indica el nivel digital situado en la línea precedente.

Asimismo, la presencia de la atmósfera entre el área de interés y el satélite puede contribuir a que la energía registrada por el sensor no se asemeje a la reflejada o emitida por el terreno, a esto también se le llama atenuación atmosférica (Jensen, 1996).

Otro error es la atenuación topográfica, es decir, es un efecto provocado por el relieve cuando la ladera orientada al Sol, no coincide el ángulo del cenit y el ángulo de incidencia causando que el área de interés quede a la sombra, implicando problemas para clasificar las coberturas. Teillet *et al.* (1982) describen cuatro métodos de corrección: corrección de coseno simple, dos métodos semi-empíricos (método de Minnaert y corrección C) y una corrección empírico-estadístico (ver más detalles, por ejemplo, en Chuvieco, 2002; y Jensen, 1996).

### **1.7.2 Correcciones geométricas**

La corrección geométrica es el cambio de posición de la imagen con respecto a un sistema de coordenadas  $x$ ,  $y$  (Chuvieco, 2002). En una imagen las fuentes de distorsión geométrica son: rotación de la Tierra durante la adquisición de la imagen, la amplitud del campo de visión de algunos sensores, la curvatura de la Tierra, variaciones en la altitud, orientación y velocidad de la plataforma y efecto panorámico relacionado a la geometría de la imagen (Jensen, 1996; Richards, 1993).

Existen dos técnicas que se emplean en la corrección de estos errores geométricos presentes en una imagen. La primera consiste en realizar modelos de la naturaleza y magnitud de las fuentes de distorsión para poder establecer fórmulas de corrección. Esta técnica es efectiva cuando los tipos de distorsión son bien conocidos, tal como la curvatura de la Tierra. La segunda técnica depende de establecer relaciones matemáticas entre las posiciones de los píxeles en una imagen y las coordenadas correspondientes en esos puntos (puntos de control) en la superficie terrestre (vía mapa, trabajo de campo, GPS o empleando otra imagen) (Richards, 1993).

#### 1.7.2.1 Métodos de re-muestreo geométricos

En la etapa final de la corrección geométrica, si se requiere que la imagen original esté en las coordenadas y proyección cartográfica que le corresponden es necesario re-muestrear los píxeles de la imagen para así obtener su posición correcta (Chuvieco, 2002). Los métodos para realizar tal proceso son: el vecino más próximo o cercano (*nearest neighbour*), la interpolación bilineal (*bilinear interpolation*) y la convolución cúbica (*convolution cubic*) (Fig. 3).

El vecino más próximo se basa en que el valor del píxel es asignado al píxel más cercano en la imagen original (Janssen and Weir, 2001). Es el más usado porque altera lo menos posible los ND originales en el proceso (Jensen, 1996); sin embargo introduce distorsiones en las formas lineales de la imagen (carreteras, fallas) que aparecen como líneas quebradas en la imagen corregida (Chuvieco, 2002).

La interpolación bilineal promedia los cuatro píxeles más cercanos de la imagen original (Janssen and Weir, 2001), este promedio se pondera a la distancia que existe entre el píxel original y el corregido. Aunque la distorsión en las formas lineales es menor difumina el contraste de la imagen original (Chuvieco, 2002).

La convolución cúbica aplica una polinomial basada en los 16 valores o píxeles más cercanos (Janssen and Weir, 2001). La ventaja que proporciona es que visualmente es más correcta (Chuvieco, 2002).

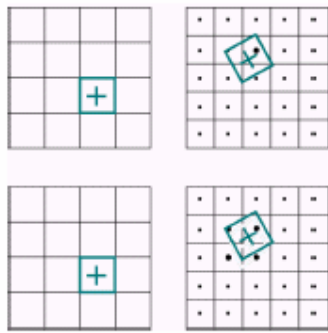


Figura. 3. Arriba el vecino más próximo y abajo interpolación bilineal

### 1.7.3 Clasificación de imágenes

En el proceso de clasificar una imagen el usuario instruye a la computadora para efectuar una interpretación acorde con las condiciones definidas por el usuario. Una clasificación se basa en las diferentes respuestas espectrales de los distintos materiales y objetos de la superficie terrestre (Janssen and Gorte, 2001).

La clasificación es un proceso en el cual se catalogan a los píxeles en un número finito de clases individuales, categorías o datos basándose en sus ND y bandas. Si un píxel satisface un criterio es asignado a la clase que le corresponde según el criterio utilizado (Pouncey *et al.*, 1999).

Dependiendo del tipo de información que se requiere extraer de la imagen original, las clases pueden ser asociadas con características conocidas en el terreno o pueden representar simplemente áreas que se ven diferentes en la computadora.

### 1.7.4 Análisis e interpretación visual

Por otro lado, el análisis visual se define como un acto visual de interpretación, identificación y/o medición de objetos de la superficie terrestre en una imagen de satélite o fotografía aérea (Howard, 1991). Estos objetos pueden ser rasgos ambientales o artificiales que consisten en puntos, líneas o áreas (Canada Centre for Remote Sensing, 2007).

La interpretación visual se basa en la capacidad del hombre de relacionar color y patrones en una imagen en donde se presentan rasgos de la superficie terrestre (Janssen, 2001).

Antes de realizar un análisis visual de una imagen es necesario tener un conocimiento previo de la zona de estudio. Con este conocimiento se puede ubicar la imagen en cierto contexto, tomando en cuenta el objetivo del análisis. No es lo mismo un análisis de tipos de vegetación y uso de suelo que un estudio de índole geológica (Fernández-Coppel y Herrero, 2001).

#### 1.7.4.1 Pre-Procesamiento de imágenes para su interpretación

Antes de realizar la interpretación de una imagen hay que tener presente los errores que puede tener, con ello no afectar la interpretación o más aun detectar fenómenos irreales. La fuente de este último se debe a diferencias de absorción atmosférica y dispersión de la energía a causa de las variaciones de vapor de agua y concentración de aerosoles en la atmósfera en los momentos de adquisición, variaciones temporales en los ángulos solares del cenit y/o del azimut, y las inconsistencias de la calibración del sensor para imágenes separadas (Coopin *et al.*, 2002).

El pre-procesamiento abarca una serie de operaciones secuenciales, incluyendo (pero no necesariamente en este orden) la calibración de la radiancia o en la reflexión basada en los satélites, corrección atmosférica o normalización, registro de la imagen, corrección geométrica, mosaicos y máscaras (por ejemplo, para nubes, agua, rasgos irrelevantes) (*idem*).

Las operaciones de pre-procesamiento, a veces llamadas restauración de la imagen y rectificación, son usadas para corregir las distorsiones geométricas y radiométricas específicas de los datos provenientes del sensor o plataforma (Canada Centre for Remote Sensing, 2007). Igualmente, se puede aplicar una corrección radiométrica y geométrica para corregir ese error presente en la imagen.

Los datos digitales pueden ser mejorados y/o manipulados usando técnicas tales como ampliación del contraste, compuestos en color, análisis de componentes principales, filtraje, entre otros.

Al realizar las correcciones adecuadas se podría obtener un buen resultado en las comparaciones de imagen a imagen (comparación índice a índice) para llevar a cabo un análisis multitemporal (Sbardella and Barichello, 2002).

#### 1.7.4.2 Elementos de interpretación

Las reglas de interpretación visual de imágenes de satélite son muy similares a los métodos desarrollados para interpretar fotografías aéreas desde hace más de 100 años (Horning, 2004).

Cuando vemos los datos de una imagen visualizamos las características presentes en ella; éstas características son llamadas elementos de interpretación (Janssen, 2001). Estos elementos son tono o color, tamaño, forma, textura, sombra y patrón; a éstos puede agregarse, la altura, sitio y asociación (Howard, 1970a), también diferencias temporales cuando se analizan imágenes de varias fechas (Howard, 1991).

**Tono** es definido como el relativo brillo de una imagen en blanco y negro. El matiz se refiere al color de una imagen como se define en el sistema intensidad-matiz-saturación (IHS). La expresión tonal de objetos en la imagen está directamente relacionada con la cantidad de luz reflejada por la superficie terrestre (Janssen, 2001). Generalmente, el tono es un elemento fundamental para distinguir entre diferentes objetivos o características (Canada Centre for Remote Sensing, 2007). Las variaciones en las condiciones de humedad son también reflejadas como diferencias en la tonalidad de una imagen: incremento en el contenido de humedad dan tonos de grises oscuros.

**Forma** se refiere a la forma general, estructura o contorno de objetos individuales (*ídem*; Howard, 1991). La forma a menudo ayuda a determinar el carácter de los objetos (áreas en construcción, carreteras y ferrocarriles, campos agrícolas, entre

otros) (Janssen, 2001). La forma de un valle por ejemplo, frecuentemente proporciona un importante indicio de sus procesos climatológicos y edad, puede también ser indicativo del tipo de roca (Howard, 1991).

**Tamaño** de objetos puede ser considerado en un sentido absoluto o relativo (Janssen, 2001), es decir, el tamaño de los objetos esta en función de la escala y de otros objetos adyacentes (Canada Centre for Remote Sensing, 2007). La amplitud de una carretera puede ser estimada, por ejemplo, a partir de la comparación del tamaño de los autos, que sí es generalmente conocido. Igualmente esta amplitud determina el tipo de carretera, por ejemplo, carretera primaria, carretera secundaria, etc.

**Patrón** se refiere al arreglo espacial de los objetos (Canada Centre for Remote Sensing, 2007; Howard, 1991; Janssen, 2001) e implica la repetición de las características de ciertas formas o relaciones (Howard, 1991; Janssen, 2001). Estos patrones a menudo pueden estar asociados con la geología, la topografía, los suelos, el clima y las comunidades de plantas, y su conocimiento ayudará a evaluar la calidad de la tierra y a evaluar la calidad del sitio de un bosque por ejemplo. Particularmente en estudios de uso de suelo, es importante distinguir entre los patrones naturales de aquellos producidos por la actividad humana (Howard, 1991).

**Textura** se refiere al arreglo y frecuencia del cambio tonal en un área en particular de la imagen (Janssen, 2001). La textura puede ser descrita por términos como gruesa o fina, liso o rugoso, llano o desigual, granular, lineal, lanoso, entre otros. Visualmente se manifiesta como la rugosidad o suavidad de los tonos de grises (Chuvieco, 2002). La textura esta fuertemente relacionada con la resolución espacial del sensor aplicado (Chuvieco, 2002; Janssen, 2001).

**Sombra** también es útil en la interpretación proporcionando una idea del perfil y la relativa altura del objeto u objetos lo que puede hacer a la identificación más fácil. Sin embargo, la sombra puede reducir o eliminar la interpretación en su zona de influencia, ya que los objetos dentro de la sombra son mucho menos (o nada) discernibles de su alrededor (Canada Centre for Remote Sensing, 2007; Chuvieco, 2002). Una aplicación, es cuando la altura se obtiene a través de la sombra



utilizándola para estimar la calidad del bosque conociendo las relaciones entre la altura y la edad, que es usualmente obtenida de un gráfico previamente preparado basado en las mediciones en campo (Howard, 1991).

**Sitio** relaciona a la situación topográfica o geográfica. Por ejemplo, es probable que un edificio grande al final de varios ferrocarriles convergiendo sea una estación de ferrocarriles, no se esperaría un hospital en ese sitio (Janssen, 2001).

**Asociación** toma en cuenta las relaciones entre otros objetos reconocibles o características en la proximidad del objeto de interés. La identificación de rasgos que se esperaría asociar con otros rasgos puede proporcionar información para facilitar la identificación (Canada Centre for Remote Sensing, 2007).

### **1.7.5 Clasificación No supervisada**

En la clasificación no supervisada su propósito principal es producir grupos espectrales basados en similitudes de ND. El usuario tiene que definir el número máximo de *clusters* (clases) en un conjunto de datos. Basado en esto, el programa localiza arbitrariamente los vectores medios como el punto central de los clusters. Entonces, cada píxel es asignado a un clúster por la mínima distancia del centro del clúster en la regla de decisión. Todos los píxeles deben ser etiquetados, recalculando el centro del clúster tomando su lugar y el proceso se repite hasta que encuentra los centros apropiados del clúster y todos los píxeles son por lo tanto etiquetados.

La iteración se detiene cuando los clusters ya no cambian más. Sin embargo, los clusters con pocos píxeles se eliminan. Al terminar el *clustering* o agrupación se analiza la proximidad o la separabilidad de los clusters por medio de la distancia o media de la divergencia (ver fórmula abajo). La necesidad de juntar los clusters es para reducir las innecesarias subdivisiones en los datos, esto se realiza con un umbral especificado. El usuario define el máximo número de clusters/clases, la distancia entre dos clusters, el radio de un clúster y el número mínimo de píxeles como un número de umbral para la eliminación del clúster. El análisis de la agregación de los clúster alrededor del punto central es hecho por la medida de la

desviación estándar que el usuario definió para cada banda espectral. Si un clúster es alargado, la separación debe ser realizada perpendicularmente al alargamiento del eje espectral.

El análisis de proximidad de los clusters es realizado midiendo la distancia entre los dos centros del cluster. Si no hay separabilidad con respecto a la clase o es muy poca de acuerdo al umbral especificado las dos clases se tienen que juntar. En cada iteración, cualquier clúster con poco número de píxeles especificados son eliminados. Los clusters que son resultantes de la iteración pasada son descritos por su estadística (Janssen and Gorte, 2001). Al finalizar el proceso el usuario etiqueta los clusters resultantes, es decir, asigna nombres a las clases de cobertura resultantes

$$d_{a,b} = \sqrt{\sum_{i=1, m} (ND_{a,i} - ND_{b,i})^2}$$

donde  $d_{a,b}$ , indica la distancia entre dos píxeles cualquiera  $a$  y  $b$ ;  $ND_{a,i}$  y  $ND_{b,i}$ , los niveles digitales de esos píxeles en la banda  $i$ , y  $m$  el número de bandas.

### 1.7.6 Clasificación Supervisada

En una clasificación supervisada el usuario es quien define las características espectrales de las clases identificadas a partir del conocimiento previo que tiene del área de estudio (Janssen and Gorte, 2001). Además, que identifica y localiza tipos de cobertura del terreno, tal como urbano, agricultura o humedales a través de una combinación de trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas, mapas o personal con experiencia (Jensen, 1996 tomado de Mausel *et al.*, 1990). Entonces se delimitan áreas que representen a los tipos de coberturas o clases en una imagen, a los que se le denomina *sitios de entrenamiento*; éstos tienen que ser representativos, homogéneos, no se tienen que traslapar con otras clases y se pueden o deben tener varios para una misma clase (Chuvieco, 2002; Janssen and Gorte, 2001; Jensen, 1996). También se puede llevar a cabo por un método semi-automático llamado "semillado". Tales sitios sirven para que cada píxel que compone la imagen sea usado para "entrenar" a la computadora para reconocer áreas espectralmente similares para cada clase. La computadora usa un algoritmo o programa especial para determinar la composición numérica de la "firma" para cada uno de los sitios de entrenamiento. Una vez que se han determinado las firmas por cada clase, cada

píxel en la imagen es comparado con esas firmas y etiquetado como la clase más cercana y que se parece digitalmente. Así, en una clasificación supervisada se identifica las clases de información que son usadas para determinar las clases espectrales que se presentan en la zona de interés (Canada Centre for Remote Sensing, 2007).

### **1.7.7 Algoritmos de clasificación**

Después que los sitios de entrenamiento son definidos, la clasificación de la imagen puede realizarse aplicando un algoritmo de clasificación (Janssen and Gorte, 2001); asimismo, éste ayudará a definir las fronteras entre clases (Chuvienco, 2002). La elección del algoritmo depende del propósito de la clasificación, las características de la imagen y los datos muestreados. A continuación se explican los tres tipos de algoritmos (Janssen and Gorte, 2001).

El primero, en el algoritmo de paralelepípedos el usuario define un área de influencia para cada clase donde se toma en cuenta su centralidad y dispersión. De esta manera, un píxel es elegido para ésta clase, siempre y cuando sus ND estén dentro del área de influencia determinando su distancia del centro. La distancia es dada por el usuario (Chuvienco, 2002). Durante la clasificación, un píxel desconocido debe ser verificado para ver si cae en cualquier paralelepípedo. Entonces el píxel es etiquetado con la clase en la que encaja. Los píxeles que no caen dentro de cualquiera de los paralelepípedos deben ser asignados a una *clase desconocida*, a veces llamados como *clases rechazadas* (Janssen and Gorte, 2001).

Las desventajas que puede presentar este algoritmo es que algunos paralelepípedos llegan a encimarse, esto porque algún píxel candidato desconocido puede satisfacer el criterio de mas de una clase (Jensen, 1996). En tal caso, un píxel es arbitrariamente asignado a la etiqueta del primer paralelepípedo que encuentra (Janssen and Gorte, 2001). Aunque algunos píxeles pueden quedar sin clasificar (Chuvienco, 2002).

El segundo algoritmo, de mínima distancia, requiere que el usuario proporcione el vector medio a cada clase para cada banda de los datos o sitios de entrenamiento.

Para efectuar la clasificación por medio de mínima distancia el programa debe calcular la distancia de cada vector la media, de cada píxel desconocido (Jensen, 1996 citado en Jahne, 1991). No se trata de la distancia geográfica, sino espectral, es decir, la comparación de los ND de cada píxel con respecto a los centros de las diferentes clases para todas la bandas (Chuvieco, 2002). En otras palabras, es posible calcular usando la distancia Euclidiana basada en el teorema de Pitágoras (Jensen, 1996).

Por otra parte, varios algoritmos de mínima distancia permiten que el usuario especifique una distancia o un umbral de los medios de la clase más allá de los cuales un píxel no será asignado a una clase aunque ésta se encuentre más cercana a la media de esa clase (Jensen, 1996).

El problema que muestra este algoritmo es que no toma en cuenta la variabilidad de las clases, es decir, algunas clases son pequeñas y densas mientras que otras son grandes y dispersas (Janssen and Gorte, 2001).

Por último, el algoritmo de máxima probabilidad considera no sólo el centro de la clase sino también la forma, el tamaño y orientación (Janssen and Gorte, 2001). Este método utiliza el cálculo de una distancia estadística basada en los valores medios y la matriz de covarianza de las clases (Chuvieco, 2002; Janssen and Gorte, 2001; Jensen, 1996). La distancia estadística es un valor de probabilidad, esto es, la probabilidad de observación que "x" pertenezca a una clase específica. El píxel es asignado a la clase que tiene la probabilidad más alta. El supuesto de la mayoría de los clasificadores de máxima probabilidad, es que la estadística de las clases tiene una distribución "normal" o Gausiana (Janssen and Gorte, 2001).

No obstante, permite al usuario definir una distancia del umbral para delimitar un valor máximo de probabilidad. Una elipse central en la media define el valor con la probabilidad más alta de la pertenencia de una clase. Progresivamente, las elipses más grandes que rodean el centro representan contornos de probabilidad de pertenecer a una clase, con la probabilidad que disminuye conforme se aleja del centro (*ídem*).

## 1.8 Evaluación de la exactitud de las clasificaciones

Cualquier base de datos geográfica presenta un cierto grado de incertidumbre en la calidad de los insumos y la metodología empleada para su elaboración. Conocer la confiabilidad de un producto cartográfico nos permite valorar el ajuste con la realidad de estos, y así tomar decisiones a partir del producto obtenido, además de saber el grado de error que tiene con respecto a otros productos cartográficos (Chuvieco, 2002; Mas *et al.*, 2003).

La verificación de la confiabilidad consiste en comparar los resultados obtenidos con una fuente auxiliar, que se considere como “verdad de campo” y que represente la realidad del terreno en el momento de la adquisición de la imagen. La verificación se puede realizar a través de técnicas de muestreo que permitan estimar con mayor exactitud y a menor costo, el error que se obtuvo de nuestros resultados (Chuvieco, 2002).

Según Stehman y Czaplewski (1998) el proceso de evaluación de la confiabilidad se divide en tres pasos: 1) diseño del muestreo, 2) evaluación de los sitios de verificación y 3) análisis de los datos.

El diseño del muestreo se refiere a la determinación del tipo de elementos de muestreo que depende del método de la selección de éstos y también el número de elementos de muestreo.

La evaluación de los puntos de verificación consiste en la identificación del sitio de entrenamiento para relacionarlo con una o varias clases de la leyenda del mapa que se está evaluando.

La matriz de confusión consiste en que las filas representan las clases de referencia y las columnas las clases del mapa. La diagonal de la matriz nos indica el número de puntos de verificación que coinciden con las clases del mapa y las de referencia, y los marginales indican errores de asignación (tabla 3).

El número de puntos correctamente asignados encontrados en la diagonal indican la exactitud total o la confiabilidad del mapa. En la matriz de confusión se pueden encontrar dos tipos de error, el error de comisión que se refiere al número de puntos de verificación que correspondían a una cierta clase pero fue asignada a otra y el error de omisión que es el número de puntos de verificación que pertenecían a una cierta clase y no fueron incluidos en ella.

Tabla 3. La matriz de confusión con los errores y la exactitud expresados en porcentaje. A, B, C y D se refieren a las clases de referencia; a, b, c, y d se refieren a las clases en la clasificación resultado. La exactitud total es del 53%.

	a	b	c	d	Total	Error de omisión	Error del producto
A	35	4	12	2	53	34	66
B	14	11	9	5	39	72	28
C	11	3	38	12	64	41	59
D	1	0	4	2	7	71	29
Total	61	18	63	21	163		
Error de comisión	43	39	40	90			
Exactitud del usuario	57	61	60	10			

La validación de los resultados en los mapas de cambios de cobertura puede ser difícil porque uno necesita determinar qué cobertura del terreno estaba presente en los períodos de tiempo que están comparándose. Típicamente cuando se evalúa la exactitud de un mapa de cobertura, se toma nota de la cobertura del terreno existente. En algunos casos, se podría encontrar fotografías aéreas que tienen la información suficiente del período de tiempo de interés. Una posibilidad, aunque raramente práctica, es usar entrevistas de las personas que se encuentran familiarizadas con el paisaje. Las áreas o parcelas pueden entonces verificarse cada vez que una nueva capa se agrega a la serie de mapas de cambios de la cobertura del terreno. De esta manera se guarda un antecedente de la situación de cambio en el terreno para áreas específicas (Horning, 2004).

## 1.9 Análisis multitemporal con imágenes de satélite y SIG

El análisis multitemporal implica detectar cambios entre dos fechas o más, estudiando la dinámica de una zona de interés a través del tiempo, por ejemplo, el

desarrollo urbano, instalación y construcción de infraestructura, deforestación, entre otros (Chuvieco, 2002).

Un estudio multitemporal involucra el uso de fotografías aéreas y otras imágenes de la superficie terrestre junto con verificaciones en campo para lograr un conocimiento más detallado del área en cuestión. Este conocimiento puede ser extrapolado a áreas más extensas utilizando imágenes de satélite adquiridas, por ejemplo de Landsat o Spot.

El análisis de cobertura multitemporal se justifica por la necesidad de estudiar varios fenómenos dinámicos en el espacio geográfico cuyos cambios pueden ser identificados a través del tiempo. Estos incluyen eventos de peligros naturales, patrones de cambio del uso de suelo y los aspectos hidrológicos y geológicos del área de estudio (USAID, 1993).

En muchas aplicaciones, el objetivo de la detección de cambios consiste en mapear sólo una (o sólo pocas) transición (es) de cobertura vegetal de interés para el usuario, por ejemplo, tierras agrícolas a áreas urbanas, o bosques a áreas quemadas (Fernández-Prieto, 2002).

Para poder comparar imágenes adquiridas en distintos momentos, se deben tener en cuenta los factores que afectan su registro (por ejemplo los efectos atmosféricos y de radiación) para así poder estandarizar las imágenes (Bragachini *et al.*, 2006).

Las técnicas basadas en datos multispectrales o multitemporales obtenidos por satélites, han demostrado tener un potencial alto para detectar, identificar, mapear y monitorear cambios en los ecosistemas, sin tomar en cuenta sus agentes causales (Coppin *et al.*, 2002).

Cuando se requiere detectar cambios con datos y materiales diferentes, tal como fotografías aéreas e imágenes de satélite la solución es digitalizar, georreferenciar y orto-corriger las fotografías aéreas para poderlas trabajar en un formato digital. También si se trata de dos imágenes de satélite pero de diferente sensor, se pueden remuestrear para igualarlas en cuanto a resolución espacial (Horning, 2004).

La detección de cambios se puede realizar a través de índices como: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Perpendicular (PVI) e índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Los índices de vegetación permiten estimar cuantitativamente y cualitativamente la distribución y la cantidad de la cubierta vegetal (Casacchia *et al.*, 2002 *op cit* Mas, 1999) y ser utilizada para discriminar entre áreas con vegetación, suelos desnudos y áreas urbanas (Casacchia *et al.*, 2002).

Para el caso específico de los manglares, objeto principal de estudio de este trabajo, se reportan varios trabajos que se han enfocado al estudio espacio-temporal de dicho ecosistema.

Wang, *et al.* (2003), por ejemplo, efectuaron un estudio de detección de cambios en Tanzania, en donde compararon las áreas de cambios del bosque de manglar que fueron reconocibles entre 1990 y 2000 usando 3 imágenes de Landsat (1990, 1998 y 2000). En el capítulo siguiente, se abordarán más casos específicos sobre este tema.

Cabe mencionar que en la actualidad, las técnicas de detección de cambios usan los enfoques, o de pre- o post-clasificación que han sido representados limitadamente en ecosistemas biológicamente complejos, debido (en gran parte) a la fenología de la vegetación, la cual introduce errores (Lunetta, 2002).

Por otro lado, existen diferentes métodos y técnicas para la detección de cambios, los más comunes son: detección de cambios usando compuesto multi-fecha para detección de cambios en una imagen, álgebra de imagen para detección de cambios, comparación post-clasificación para detección de cambios, detección de cambios multi-fecha usando una máscara binaria aplicada a la fecha 2, Detección de cambios multi-fecha utilizando como fuente de datos auxiliares fecha 1, Manual, Digitalización en pantalla de cambios, Análisis de cambios espectrales vectoriales y por último el Sistema de visión basada en el conocimiento para detección de cambios (Jensen, 1996).



No todos los cambios son detectables, sin embargo, son de igual importancia. En otras palabras, es probable que algunos cambios de interés no sean capturados con exactitud, o todos, por cualquier sistema dado (Coppin *et al.*, 2002).

Un análisis de cambios de cobertura y uso del suelo relacionado con actividades humanas nos ayuda a entender y pronosticar la dinámica del paisaje o del ecosistema bajo estudio. Además de tener el conocimiento de la dinámica de un sitio nos proporciona elementos para el diseño de políticas y estrategias de protección, conservación y manejo sostenible de los recursos naturales (Dupuy *et al.*, 2007).

Finalmente, la incorporación del Sistema de Información Geográfica en los métodos de detección de cambios o análisis multitemporales permite tener mapas de disturbio como una aplicación, derivado de cualquier modelo de cambio descriptivo, en una manera oportuna en las escalas que son consistentes con los objetivos en el manejo del ecosistema (Coppin *et al.*, 2002). Los SIG's son herramientas de análisis muy ventajosas ya que permiten manipular a las clasificaciones resultantes en combinación con información geográfica relacionada al área de interés.

## Capítulo 2. El manglar y su importancia

### 2.1 ¿Qué son los manglares?

Debido a su importancia ecológica y a la particularidad de combinar algunas características propias de ecosistemas terrestres y acuáticos, los manglares son sistemas naturales complejos y frágiles; éstos brindan una serie de servicios ambientales fundamentales para la sociedad tales como, la prevención de inundaciones, sirven como barreras contra el impacto de huracanes y tsunamis, son excelentes almacenadores de carbono, son buenos filtradores y descontaminadores de las aguas provenientes de los ríos y también son generalmente sostén de una alta biodiversidad. Para el ecosistema conocido como “manglar” existen diferentes definiciones alrededor del mundo y se adecuan a una serie de criterios y requerimientos de cada una de las instituciones u organizaciones encargadas de su protección, manejo y conservación.

El manglar es un ecosistema conformado de árboles y arbustos leñosos (Cordero y Solano, 2000 *op cit* UICN/ORMA, 1997; Duke, Ball & Ellison, 1998; Field *et al.*, 1998 *op cit* Woodroffe, 1987; Lluch y Ríos, 1984; Rey y Rutledge, 2002; Tomlinson, 1986) que llegan a medir de 3 a 5 m pudiendo alcanzar 25 m de altura, encontrándose en zonas de inundación o saturación de agua en el suelo en donde el oleaje no es fuerte como en esteros, desembocaduras de ríos, lagunas, estuarios, entre otros (Cordero y Solano, 2000 *op cit* UICN/ORMA, 1997; Flores *et al.*, 1971 tomado de Miranda y Hernández X., 1963 y Rzedowski, 1966; Sánchez-Paéz *et al.*, 2000).

Del mismo modo, es considerado como un ecotono o zona de transición entre el mar y la tierra (Herrera y Ceballos, 1998; MEPG, 2001). Crecen y se reproducen en condiciones de salinidad muy variable (de agua dulce hasta hipersalina) (Cordero y Solano, 2000 *op cit* UICN/ORMA, 1997; Pellerin *et al.*, 2004; Snedaker y Getter, 1985). Los suelos en donde se desarrolla son pobres en oxígeno (Cordero y Solano, 2000 *op cit* UICN/ORMA, 1997; Pellerin *et al.*, 2004). Además, el manglar puede penetrar tierra adentro, siguiendo el curso de los ríos llegando a asociarse con otro tipo de vegetación.

De igual forma, pueden localizarse en las islas coralinas y las praderas de fanerógamas (Sánchez-Paéz *et al.*, 2000).

El manglar también es considerado como un tipo de humedal junto con otros tipos de vegetación tales como el tular, popal, carrizal, marismas de agua dulce, marismas turbosas, arrecifes coralinos, lechos de pastos marinos, etc. (Choudhury, 1997). A continuación se presenta la definición “oficial” tomada de la Reunión Conabio-INE-Conafor-Conagua-INEGI (2006), en donde se trató de unificar criterios técnicos y metodológicos para el estudio y clasificación de este ecosistema.

“El manglar es una formación leñosa, densa, arbórea, o bien arbustiva, de 1 a 30 m de altura, compuesta de una o varias especies de mangles, prácticamente sin plantas herbáceas y trepadoras. Las especies que lo componen son de hoja perenne, algo suculenta y de borde entero (2006).”

También es llamado, como se menciona arriba, ecotono siendo la transición entre el medio terrestre y acuático (Herrera y Ceballos, 1998; MEPG, 2001). Algunas de sus adaptaciones son: a) sus embriones son capaces de flotar y son dispersados por el agua y b) sus hojas se adaptan también a la escasez de agua dulce y son capaces de eliminar el exceso de sal (Cordero y Solano, 2000 *op cit* UICN/ORMA, 1997). El mangle, es considerado uno de los ecosistemas más productivos debido a su alta diversidad biológica.

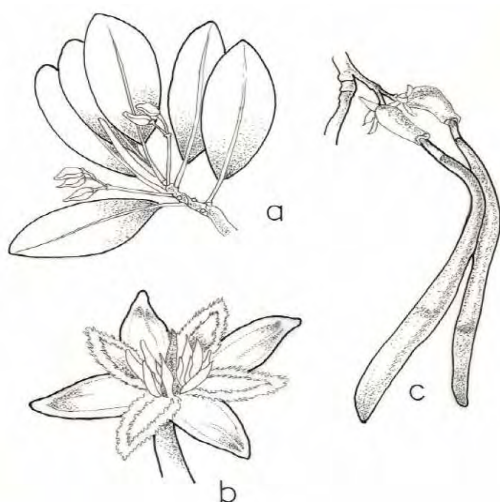
En México, las especies de manglar más características son:

- *Rhizophora mangle* (mangle rojo)
- *Avicennia germinans* (mangle negro)
- *Laguncularia racemosa* (mangle blanco)
- *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo)

Todas se presentan tanto en el Golfo de México y Mar Caribe como en el Océano Pacífico y a menudo se hallan en la misma comunidad, aunque en otros sitios pueden faltar una o más.

El género *Rhizophora* es el componente más común y típico de los cuatro; este mangle forma con frecuencia comunidades puras que son las más sumergidas y más expuestas a cambios de nivel de agua y de salinidad; presenta raíces de zancas arqueadas, que se fijan en sitios cubiertos con una capa de agua hasta de 1 a 1.5 m de profundidad. El género denominada *Laguncularia* puede acompañar a la *Rhizophora*, aunque por lo general se desarrolla en sitios de agua menos profunda. El género *Avicennia* en cambio, prospera formando bosquecillos o matorrales a lo largo de una franja situada más tierra adentro en suelos emergidos durante la mayor parte del tiempo y que se inundan sólo ligeramente. El género *Conocarpus* ocupa los lugares aún menos afectados por la sumersión en agua salada, aunque a veces constituye agrupaciones sobre suelos permanentemente anegados, pero con un contenido de cloruros mucho menos elevados (Rzedowski, 1988).

A nivel especie las características morfológicas de *Rhizophora mangle* son: árbol o arbusto que puede llegar a medir 25 metros de altura de copa redondeada, su corteza es de color gris claro o blanquecina y en el interior es de color rojo, sus hojas de color verde oscuro; sus flores tienen un diámetro de 2.5 cm, sus frutos sólo tienen una semilla (Fig. 4) y todo el año florecen (Herrera y Ceballos, 1998).



#### Morfología del mangle rojo

##### (*Rhizophora mangle*)

a) Rama vegetativa con yemas florales

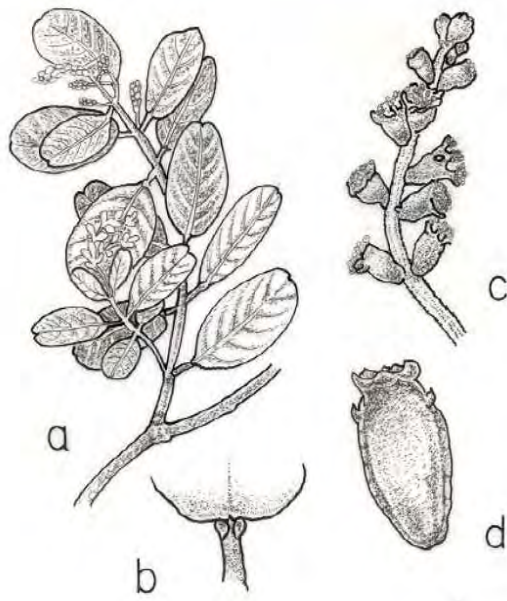
b) Flor

c) Frutos en forma de pincel que han germinado estando en el árbol

Figura 4. *Rhizophora mangle* (tomado de Clinton J. Dawes 1986)

La especie *Laguncularia racemosa* se caracteriza por ser un árbol o arbusto con una altura de hasta 20 m; corteza de color gris-pardo y en el interior rosa, sus hojas tienen una forma ovalada de color verde-amarillento en la base tiene unas glándulas por

donde elimina el exceso de sal (Gómez y Flores, 2003), sus flores miden 4 milímetros son de color blanco, los frutos de color verde parduzco (Fig. 5) y a partir de febrero a mayo florecen (Herrera y Ceballos, 1998).



**Morfología del mangle blanco  
(Laguncularia racemosa)**

- a) Rama vegetativa con yemas florales
- b) Base de una hoja mostrando las 2 glándulas que expulsan la sal, características de la especie
- c) Racimo de flores
- d) Fruto

Figura 5. Laguncularia racemosa (tomado de Clinton J. Dawes 1986)

La especie *Avicennia germinans* es un árbol que puede medir de 15 a 20 metros de altura, corteza de color gris negruzca, las hojas tienen una forma elíptica de color verde oscuras, las flores son de color blanco, sus frutos son capsulas ovoides de color pardo-verdoso que miden de 2 por 1.5 cm, dentro se encuentra una semilla ovoide que germina en el interior del fruto, antes de caer (Fig. 6) y todo el año florece (Herrera y Ceballos, 1998).



### Morfología del mangle negro

#### (*Avicennia germinans*)

- a) Rama vegetativa y flores jóvenes
- b) Racimo floral
- c) Fruto maduro

Figura 6. *Avicennia germinans* (tomado de Clinton J. Dawes 1986)

El *Conocarpus erectus* se caracteriza por ser un arbusto o árbol que puede llegar a medir hasta 20 m de altura, con una corteza color pardo oscuro, las hojas tienen una forma elíptica siendo de color verde claro brillante, sus flores de color verde-amarillento (Fig. 7), al igual que el *R. mangle* y el *A. germinans* florece todo el año (Herrera y Ceballos, 1998).

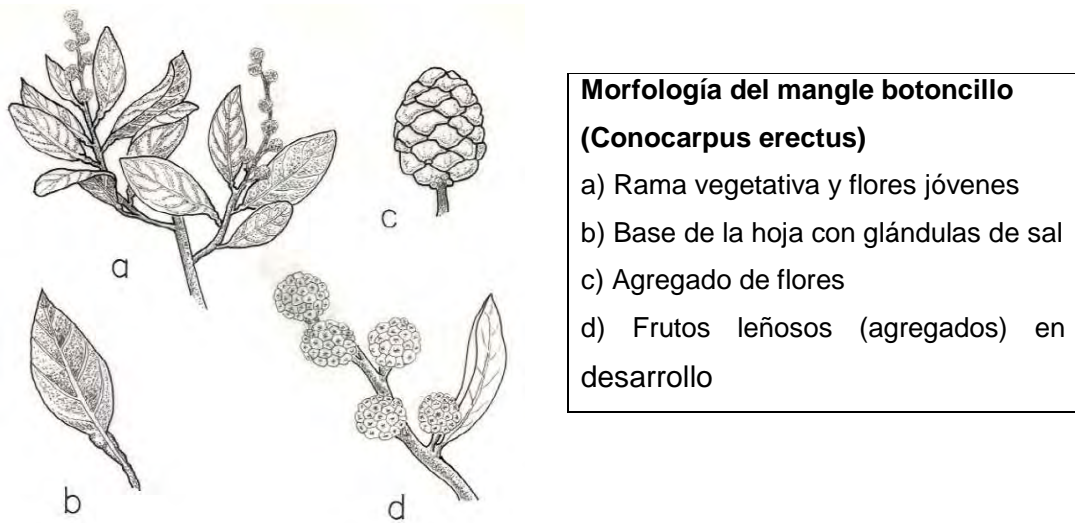


Figura 7. *Conocarpus erectus* (tomado de Clinton J. Dawes 1986)

La influencia climática, para la distribución del manglar en México está regida mayormente por la temperatura, pues estos ecosistemas sólo prosperan en zonas cálidas. La precipitación no parece jugar un papel importante en el determinismo de su existencia, aunque es posible que la baja humedad propicie un desarrollo menos exuberante de los individuos y la comunidad en general. También se desarrolla en ambientes estuarinos, a la orilla de lagunas y cerca de desembocaduras de ríos.

La distribución a nivel nacional y local tiene que ver con varios factores que influyen, como los suelos, la disponibilidad de minerales y nutrientes, la geomorfología, las mareas, la aireación del suelo, los vientos las corrientes, etc. (Villalba, 2002).

Los manglares tienen varias adaptaciones como el anclaje en sedimentos suaves, raíces respiratorias, mecanismos especializados para la dispersión, y mecanismos especializados para lidiar con concentraciones excesivas de sal. Éstas son las únicas plantas verdaderamente vivíparas, en las cuales las semillas se mantienen fijadas a la planta madre y germinan formando un

embrión ("propágalo") antes de caer del árbol (Rey y Rutledge, 2006).

## 2.2 Importancia ecológica

EL manglar, como ya se dijo antes, es considerado como un ecosistema, es decir, un conjunto de elementos bióticos y sus relaciones con el medio físico. Los componentes del sistema son los rasgos bióticos y no abióticos y abarcan el suelo, el agua, las plantas y los animales (MEPG, 2001).

Estos ecosistemas generan bienes y servicios para la sociedad y realizan varias funciones ecológicas y ambientales importantes que se describen más abajo; sin embargo, su valor no ha sido reconocido en su totalidad, esto es que, los bienes y servicios que se pueden medir en términos monetarios no han sido valorados económicamente para un mejor manejo del recurso (Sanjurjo, 2001). Asimismo, los economistas han utilizado un conjunto de técnicas de valoración que han *sobrevalorado* los servicios de los ecosistemas debido a la insuficiencia de datos e hipótesis dudosas (Aburto-Oropeza *et al.*, 2008)

En la actualidad se reconoce a los manglares como una de las áreas de mayor productividad de fitoplancton que la que se presenta en el mar abierto. Mientras que la producción de fitoplancton costero en áreas no sujetas a efectos de surgencias es de alrededor de 50-250 g C/m<sup>2</sup> por año, la producción en los manglares va de 300-1000 g C/m<sup>2</sup> por año (MEPG, 2001).

Los manglares proveen un amplio rango de servicios ecológicos que impactan en el bienestar tanto de las comunidades adyacentes a ellos, como de sociedades lejanas. Entre los servicios locales que proveen los ecosistemas de manglar destacan la protección de la zona costera contra huracanes e inundaciones, la protección contra la erosión de la línea de costa, el mantenimiento de especies de importancia para actividades comerciales (pesca, ecoturismo) y el mantenimiento de la calidad del agua para actividades de acuicultura. Otros servicios como la captura de CO<sub>2</sub> y la función como trampas de sedimentos y material orgánico en suspensión, son de suma



importancia para la permanencia de numerosas actividades económicas en los manglares y en ecosistemas adyacentes (Rönnbäck, 1999).

Los servicios ambientales prestados por el ecosistema manglar, que benefician a la sociedad son (Barbier, 1994 y Costanza 1997, con modificaciones):

- Soporte biofísico a otros ecosistemas costeros
- Proveedor de áreas de crianza, reproducción y alimentación de especies de importancia comercial (Fig. 8)
- Mantenimiento de la biodiversidad
- Pilar de la resistencia de sistemas costeros adyacentes
- Producción de oxígeno
- Trampa de agua dulce y recarga de mantos freáticos
- Formación de suelos; mantenimiento de nutrientes
- Regulación de clima local y global
- Valores culturales, espirituales y religiosos asociados
- Fuente de inspiración artística
- Fuente de información científica
- Recreación y turismo

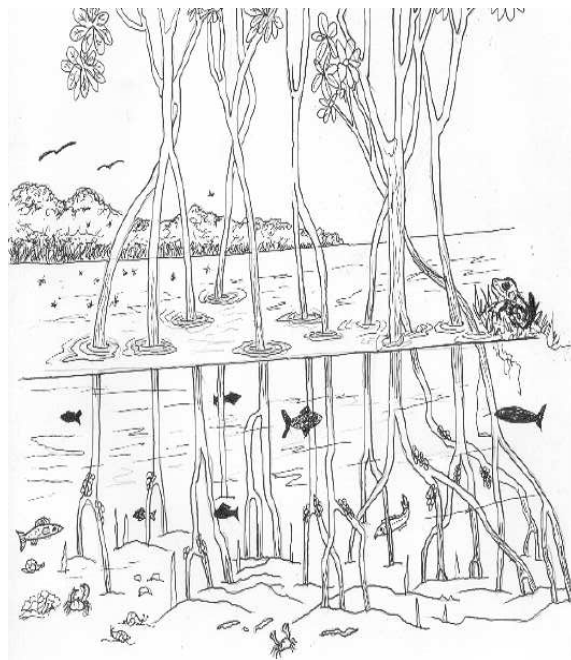


Figura 8. Tomado de Gómez y Flores, 2003

También los humedales en general, han sido descritos a la vez como los “riñones” del medio natural, a causa de las funciones que pueden desempeñar en los ciclos hidrológicos y químicos, y como “supermercados” biológicos, en razón de las extensas redes alimentarias y la rica diversidad biológica que sustenta (Sanjurjo, 2001, *op cit* de Mitsch y Gosselink, 1993).

Asimismo los manglares son excelentes evapotranspiradores, ya que abastecen significativamente de humedad a la atmósfera y al llevarse a cabo esta función, se vuelve una fuente de enfriamiento natural para las comunidades cercanas (Sanjurjo, 2001).

Según Moreno *et al.*, (2002) el manglar es el principal factor relacionado con la magnitud de la producción pesquera costera. Si se encuentra el manglar en un estado de degradación, la pesca se ve afectada (Kairo *et al.*, 2002 *op cit* Tiensoygrumee, 1991). En Sri Lanka el manglar deteriorado es considerado una de las principales causas de la reducción de la pesca (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2002). Por ejemplo, en Tamil Nadu, India se ha perdido el 40% de su manglar teniendo como consecuencia la reducción de un 18% de sus recursos pesqueros en el período de 1976 a 1989 (Kannan *et al.*, 1998). Otro ejemplo, en el Golfo de California encontraron que el manglar de franja esta íntimamente relacionado con la pesca (Aburto-Oropeza *et al.* 2008)

Recientemente la flora del manglar ha sido identificada como donadora de genes tolerantes a la sal que pueden ser utilizados en variedades de cultivos resistentes a la salinidad a través de la tecnología de recombinación de ADN (Selvam *et al.*, 2003).

Los manglares constituyen uno de los ecosistemas más frágiles, y por este motivo su protección es prioritaria, para garantizar mediante su gestión integral, la continuidad de la utilización de los recursos forestales, biológicos e hidrobiológicos.

Como antes se ha mencionado, uno de los servicios de los manglares es la protección que brindan contra los efectos colaterales de los huracanes, un

ejemplo de esto fue el caso en la India, cuando al presentarse el ciclón "07B" en noviembre de 1996, en donde existía manglar en buenas condiciones los daños fueron menores que donde fue reemplazado por granjas camaronícolas (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2005).

El manglar ha sido utilizado por las sociedades de manera diferente, a continuación se listan algunos ejemplos (Choudhury, 1997; Loa, 1994):

- Se utilizan como leña y carbón,
- En localidades donde alcanzan tallas muy grandes, la madera se emplea en construcciones rurales y fabricación de instrumentos rústicos,
- La madera se aprovecha para hacer vigas, durmientes y pequeñas construcciones navales,
- En las lagunas costeras las ramas se utilizan en la construcción de artes de pesca para el camarón,
- Los taninos<sup>1</sup> tienen uso en curtiembre y tinción,
- Se les utiliza como remedio popular para diversas dolencias, dadas sus propiedades astringentes y desinfectantes,
- Se utiliza como alimento para ganado (forraje)
- Es área de cría de especies (camarón, ostión y almejas)
- Materias primas para la industria
  - i) fábricas de tableros de partículas
  - ii) fábricas de tableros de fibra
  - iii) fábricas de rayón
  - iv) fábrica de fósforos
  - v) industrias químicas (alcohol industrial de jugo de *Nypa*) etc.
- Material de paja para techados
- Miel y cera
- Producto comestibles como
  - i) Frutos de *Nypa*, frutos de *C. tagal*
  - ii) Bebidas a partir de frutos de *Sonneratia caseolaris*, jugo de *Nypa*
  - iii) Azúcar (del jugo de *Nypa*)

---

<sup>1</sup> Compuesto químico que se encuentra en algunas plantas pero no cumple ninguna función en su metabolismo. Se extrae para curtir piel de animal con lo cual se tiene mas resistencia a los insectos, al agua y al calor

Amo (1979) menciona algunos otros usos tradicionales medicinales del manglar rojo en los estados de Yucatán y Veracruz, por ejemplo:

<b><i>Uso</i></b>	<b><i>Parte usada</i></b>	<b><i>Manera de utilizarse</i></b>	<b><i>Vía de administración</i></b>
Diarrea	corteza	cocimiento	lavativas
Disentería	corteza	cocimiento	lavativas
Elefantiasis	corteza	cocimiento	oral
Escorbuto	hojas	cocimiento	oral
Lepra	corteza	cocimiento	oral
Dolor de muelas	hojas	cocimiento	buches
Ulceras leprosas	hojas	cocimiento	local

Para el manglar botoncillo se utiliza para:

<b><i>Uso</i></b>	<b><i>Parte usada</i></b>	<b><i>Manera de utilizarse</i></b>	<b><i>Vía de administración</i></b>
Asma	hojas	infusión	oral
Estado bilioso	hojas	infusión	oral
Cámaras amarillas	raíz, hojas	cocimiento	oral
Cámaras de corrupción	raíz, hojas	zumo	oral
Dolor de cabeza	planta	emplasto	local

<b>Uso</b>	<b>Parte usada</b>	<b>Manera de utilizarse</b>	<b>Vía de administración</b>
Evacuaciones amarillas	hojas	cocimiento	oral
Evacuaciones pestilentes	cogollos	cocimiento	oral
Ictericia	hojas	-----	oral
Reumatismo	raíz	infusión	oral
Testículos inflamados	raíz	infusión	oral

En el caso del manglar blanco y el manglar negro\*:

<b>Aplicación</b>	<b>Parte utilizada</b>	<b>Método utilizado</b>	<b>Vía de administración</b>
astringente	corteza		
tónico			
*antiinflamatorio	tallo		oral
*antidiarreico	corteza	cocimiento	oral
*contra hemorroides	corteza	cocimiento	oral y local

Otros beneficios que brinda el manglar en los estados de Oaxaca, Sonora, Chiapas (Secretaría de Ecología de Campeche, 2006)

<b>Beneficios obtenidos de los manglares</b>		
energía / combustible	agricultura	hogar
leña para cocinar	forraje	ceras
leña para ahumar	abonos verdes	muebles

Beneficios obtenidos de los manglares		
leña para ladrillos	postes de secado de hojas	camas
carbón	— — —	aceite para cabello
alcohol	papel	herramientas de casa
— — —	papel	morteros de arroz
construcción	envoltura de cigarros	juguetes
madera para construcción pesada	— — —	palillos de fósforos
rieles de tren	comida / medicinas / bebidas	incienso
madera para pisos	peces, crustáceos, moluscos, aves, huevos, mamíferos, reptiles, anfíbios, e insectos	cajas de embalaje
botes, lanchas	miel de abeja	— — —
postes de cerca	azúcar	textiles
tuberías para agua	bebidas	fibras
pegamento, gomas	aceite de cocina	colorantes de agua
— — —	vinagre	taninos para curtir
pesca	bebidas fermentadas	— — —
nasas para peces	condimentos de corteza	— — —

Beneficios obtenidos de los manglares		
boyas de pesca	edulcorantes, verduras, hojas y frutas	- - -
taninos conservadores de redes	medicinas de hojas y cortezas	- - -
venenos para pesca	- - -	- - -

### 2.2.1 Fauna asociada a los manglares

Como se ha dicho antes, los manglares albergan generalmente una gran riqueza biológica que incluye tanto especies terrestres como marinas, y su presencia depende de la época del año, es decir, si son migratorias o residentes, de la marea, las fases de su ciclo de vida y de la época de lluvia o sequía.

Entre las especies más comunes en estas comunidades se encuentra la ostra de mangle (*Crasostrea rhizophorae*), la cual es uno de los productos fundamentales en la economía de los pobladores costeros; y el cangrejo de mangle (*Aratus pisonii*), que tiene un papel fundamental en los procesos de herbivoría (Lacerda *et al.*, 1993).

Muchas áreas de manglar en América Latina y el Caribe se han tornado en santuarios importantes para el mantenimiento de algunas especies amenazadas en peligro de extinción, tales como, el ibis escarlata (*Trichechus manatus*), el manatí (*Trichechus manatus*), el caimán de la costa (*Crocodylus acutus*), así como varias especies de tortugas marinas.

Numerosas especies animales cohabitan en el manglar entre las que destacan diversos grupos de mamíferos, aves, reptiles y peces, así como numerosas especies de invertebrados (insectos, moluscos, crustáceos poliquetos y equinodermos). En el Golfo de México se han contado en los manglares más de 150 especies de peces y más de 350 especies de aves, así como

innumerables crustáceos, moluscos, copépodos, decápodos, arácnidos, insectos, anélidos, etc. (Secretaría de Ecología de Campeche, 2006).

Algunas de las especies de vertebrados que se pueden encontrar en los manglares de México son:

<b>Mamíferos</b>	<b>Aves</b>	<b>Reptiles</b>	<b>Peces</b>
Mono araña	Garzas	Cocodrilo de río	Pargo
Cacomixtle	Zambullidores	Cocodrilo de pantano	Lisa
Serete	Halcones	Culebras	Sargo
Jabalí labios blancos	Búhos	Tortugas	Róbalo
Viejo de monte	Patos	Iguanas	Huachinango
Tigrillo	Pericos	Lagartijas	Pampano
Venado temazate	Playeritos	Tequereques	Mojarra
Zorrillo	Cormoranes	Bejuquillo	Jurel
Tejón o Coati	Palomas	Serpiente ranera	Corvina
Mapache	Chipes	Solcoate	Bagre marino
Martucha	Calandrias	Apalcoate	Sierra
Manatí	Águilas	Anolis	Trucha de mar
Tlacuache	-	-	-

Especies de mamíferos, aves, reptiles y peces; muchos de ellos se encuentran enlistados en la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2001) Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, se hallan en la categoría de en peligro de extinción, amenazada, sujeta a protección especial y probablemente extinta en el medio silvestre, algunos de ellos son endémicos de nuestro país.



## **2.3 Distribución geográfica mundial del manglar y su tendencia actual**

Tomlison (1986) catalogó alrededor de 34 especies de manglares que corresponden a nueve géneros y cuatro familias de plantas como componentes principales de los manglares de todo el mundo, y 20 especies de 11 géneros y 10 familias como componentes menores. Biogeográficamente, los manglares forman parte de dos grupos: el grupo uno se localiza en la parte Indo-Pacífico, con aproximadamente 40 especies de manglares, que incluye África Oriental, India, el Sureste de Asia, Australia, y el Pacífico Occidental que es donde se concentra la mayor diversidad en todo el mundo, aunque aún no se puede afirmar concisamente el número de especies para cada hemisferio (Méndez, 2001). Se sostiene la teoría de que esta desproporción se debe a que las corrientes oceánicas evitan el movimiento y migración de las especies (FAO/Montes, 1994); el grupo dos incluye África Occidental, el Caribe, y las Américas, sólo se encuentran ocho especies de manglares. La mayor diversidad en especies ocurre en las costas de Malasia, Indonesia, y Nueva Guinea.

Aunque los manglares extensivos sólo se encuentran en las regiones tropicales y subtropicales, algunos mangles ocurren tan al Norte como en Bermuda (32° 20') y la isla Kyushu en Japón (35°N) y tan al Sur como en Australia (38° 45'), Auckland, Nueva Zelanda (37° S) y la costa Este del sur de África (32° 45') (Rey y Rutledge, 2006; Villalba, 2002).

Dado que las diferentes especies disponen de distintas capacidades para afrontar el exceso de sal, la distribución de especies en el manglar se ve influida por el aumento de salinidad en dirección a tierra (Lighthouse Foundation, 2006). La figura 9 ilustra este proceso.

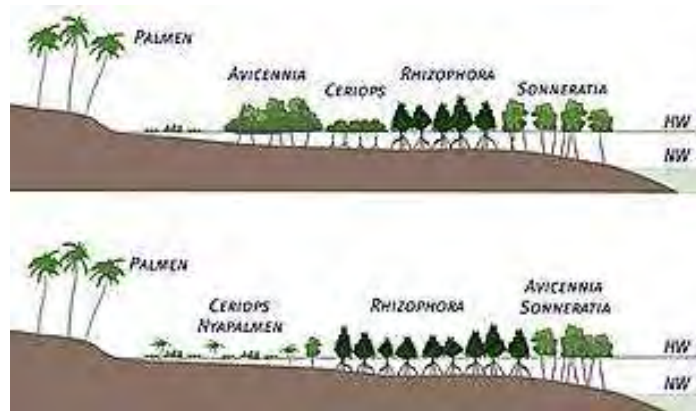


Figura 9. La distribución de especies en el manglar se ve influida por el aumento de la salinidad (arriba: África oriental, abajo: Australia) (Lighthouse Foundation, 2006)

Existen por lo tanto, variaciones en las estimaciones del área total del manglar en el mundo, esto se debe a la disponibilidad de información en cada uno de los países que cuenta con este ecosistema; en algunos países el manglar se encuentra muy fragmentado o el área es muy pequeña por lo que se dificulta cartografiarlo en escalas medias; por lo que varios autores manejan distintas cantidades en la superficie y en su distribución del manglar (Fig. 10 y 11, Tabla 4).



Figura 10. Distribución mundial de los manglares (Bios Iguana A. C., 2006)

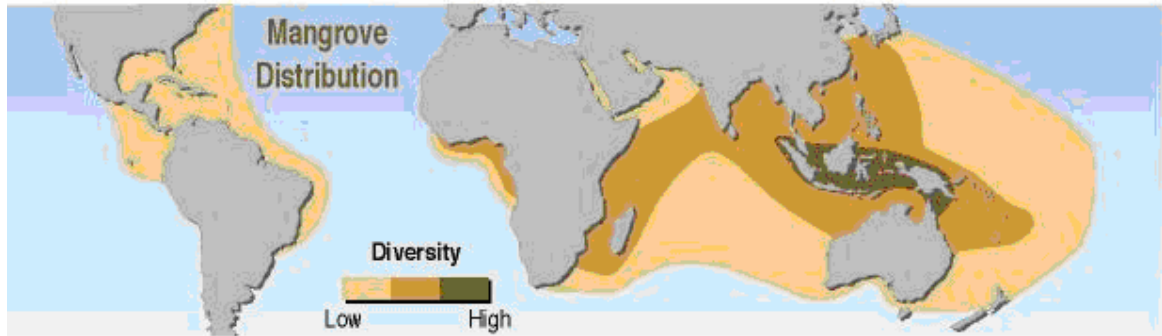


Figura 11. Distribución mundial (UNEP-WCMC, 2001)

Tabla 4. Varias estimaciones del área del manglar, junto con el porcentaje total global (km<sup>2</sup>)

Región	Área del manglar Spalding <i>et al.</i> (1997)	Área del manglar Fisher y Spalding (1993)	Área del manglar IUCN (1983)
Sur y sureste de Asia	75.173 (41.5%)	76.226 (38.3%)	51.766 (30.7%)
Australasia	18.789 (10.4%)	15.145 (7.6%)	16.980 (10.0%)
Las Américas	49.096 (27.1%)	51.286 (25.8%)	67.446 (40.0%)
Oeste de África	27.995 (15.5%)	49.500 (24.9%)	27.110 (16.0%)
Este de África y Medio oriente	10.024 (5.5%)	6.661 (3.4%)	5.508 (3.3%)
Área total	181.077	198.818	168.810

Fuente: Blasco *et al.*, 2001

Según la literatura, reporta que son 70 países los que cuentan con este ecosistema, incluyendo las pequeñas islas del Pacífico sur y las Antillas Menores. Sin embargo, en 18 países se concentra cerca del 80% de los manglares del mundo (Tabla 5) (Blasco *et al.*, 2001).

Tabla 5. Estimaciones del área del manglar de las principales países que lo sostiene (km<sup>2</sup>)  
(Aizpuru *et al.*, 2000)

<b>América</b>		<b>África</b>		<b>SE Asia</b>		<b>Oceanía</b>	
Brasil	13,800	Guinea-Bissau	2,500	Vietnam	2,500	Australia	11,700
Colombia	3,700	Nigeria	10,500	Bangladesh	6,300	PNG	4,100
Cuba	5,600	Gabon	2,500	Indonesia	42,500		

<b>América</b>		<b>África</b>		<b>SE Asia</b>		<b>Oceanía</b>	
México	5,300	Camerún	2,400	Malasia	6,400		
Venezuela	2,500	Madagascar	3,200	Myanmar	5,200		
				India	6,700		
<b>Total</b>	<b>30,900</b>	Total	21,100	Total	69,600	Total	15,700

Fuente: Blasco *et al.*, 2001

De acuerdo con los mapas y las tablas no concuerda la distribución del ecosistema en las diferentes regiones del mundo, ya que la discusión radica en la forma de vida del manglar, la mala calidad de los datos y la variedad de técnicas para mapearlos.

El manglar en el mundo se encuentra bajo intensa presión debido a las actividades humanas (FAO, 2005; Hussin *et al.*, 1999; Nayak, 2004; Ratanasermping *et al.*, 2000; Satyanarayana *et al.*, 2001). Su protección es uno de los mayores retos ambientales de las próximas décadas. En muchas partes del mundo los están destruyendo y/o dañando a ritmos alarmantes. Debido a su conversión a tierras agrícolas o urbanas, al corte total para madera, leña, carbón, productos papeleros, y forraje; embalsamiento para el control de mosquitos; la destrucción para el cultivo de peces y mariscos; y la conversión a salitrales han resultado en la pérdida de más de la mitad del área que era ocupada por manglares en el pasado (AAA, 1995).

Se estima que durante las décadas pasadas se han destruido la mitad de los manglares originalmente existentes en todo el mundo (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2005). Tradicionalmente se ha aprovechado su madera para la obtención de leña, carbón vegetal o material para curtir. Pero la extracción de estas cantidades relativamente escasas de madera por parte de la población costera no ha supuesto un peligro para la existencia de los manglares, si no las otras actividades antes mencionadas.

Asimismo, en el retroceso de las superficies de manglares en todo el mundo se ha dado especialmente por la proliferación de instalaciones para el cultivo de camarones y langostinos (Lighthouse Foundation, 2006), pero no son los

únicos factores que intervienen en la disminución, también se debe a la construcción de carreteras, contaminación del agua, relleno de los canales en lugares donde se encuentra el manglar, incumplimiento de la ley etc.

La tabla 6 muestra el proceso de pérdida del manglar en varios países que cuentan con este ecosistema.

Tabla 6. Pérdida del manglar en varios países

Países	Periodo		Área en tiempo 1 (ha)	Área en tiempo 2 (ha)	Pérdidas (%)
	T1	T2			
Cuba	1969	1989	476.000	448.000	6
Bangladesh	1963	1990	685.000	587.000	14
Tailandia	1961	1993	300.000	219.200	27
Vietnam	1969	1990	425.000	286.400	33
Estados Unidos	1958	1983	260.000	175.000	33
Indonesia	1969	1986	4.220.000	2.176.000	48
Filipinas	1968	1995	448.000	140.000	69
Puerto Rico	1930	1985	26.300	3.000	89
Kerala (India)	1911	1989	70.000	250	96

Fuente: Lighthouse Foundation, 2006

## 2.4 Problemática del manglar en el mundo y en México

Tradicionalmente, los manglares eran considerados lugares insalubres, donde habitaban un sinnúmero de mosquitos y otras alimañas, nocivos a la salud humana. Por esta razón en muchas regiones del planeta este tipo de ecosistema fue reducido considerablemente, y sustituido por actividades que aparentemente eran más productivas.

A nivel mundial los manglares han sido destruidos o degradados por diversos factores, como lo señalan Kovacs *et al.* (2001) por: huracanes, sequías, pero los más devastadores son de origen humano, por ejemplo: inundaciones artificiales y construcción de diques. Clough (1982) menciona que una de la

causas del dicho deterioro se debe a la presión humana, resultado de la conversión a tierras agrícolas, a granjas camaronícolas, a la contaminación urbana e industrial. En cambio, Villalba (2002) dice que es por la explotación y producción de petróleo, la conversión de tierras para la ganadería y la industria salinera. Además del desarrollo costero de puertos, industrias, áreas urbanas, aeropuertos y centrales eléctricas.

De acuerdo a Mannassrisuksi *et al.* (2001) las causas de la degradación del manglar se deben al crecimiento de la población, al cambio del uso de suelo y a la sobreexplotación de los recursos naturales, que propician el agotamiento de dicho ecosistema. Consecuentemente, la degradación y reducción tajante de esta vegetación, disminuye de una manera determinante el hábitat de la vida silvestre y acuática, pero lo más importante aún, es el equilibrio de los bosques costeros, que proporcionan protección a las tierras agrícolas y a las poblaciones, y que a falta de esta protección llegarían a ser seriamente impactadas.

Los factores que causan el deterioro o la destrucción total del manglar se muestra en estudios de Ewel *et al.* (1998), la pérdida de manglar, debido a la construcción de estanques de camarón, fue en 1990, del 50% en Tailandia y del 21% en Ecuador.

Otro caso ocurrió en el estado de Ceará en Brasil, el río Jaguaribe fue represado por lo que el flujo de agua no fue igual. En consecuencia la población de manglar ha visto un cambio en su área, su distribución y la dinámica de la población de las especies locales (Lacerda and Marins, 2002). Además han disminuido significativamente la entrada de nutrientes al océano, con un potencial impacto en la pesca. Por otro lado, los cangrejos (*Ucides cordatus*) presentan una alta mortalidad en la época de lluvias debido a los altos niveles de salinidad del agua dentro del ecosistema.

México al contar con manglares, también le afectan los problemas que giran alrededor de los mismos, como la conversión de tierras agrícolas o ganaderas, tala inmoderada de árboles, taninos, instalación de industria camaronera,

construcción de caminos de terracería y carreteras, además de asentamientos humanos y desarrollos turísticos, infraestructura petrolera e instalación de líneas de energía eléctrica (López Portillo y Ezcurra, 2002).

#### **2.4.1 Conversión a tierras de cultivo o ganaderas**

De acuerdo a Suman (1994) "En México la conversión de manglar ha sido para pastizales para la ganadería". Esto ha ocasionado un daño irreversible al ecosistema, lo que ha perjudicado de forma directa e indirecta a los otros organismos que encuentran refugio en el manglar. También puede ocurrir que los cultivos se vean afectados debido a los suelos salinos, y algunos de estos cultivos no son tolerantes a la sal, teniendo como resultado una baja productividad.

Según Moreno *et al.* (2002) el *Conocarpus erectus* (botoncillo) es la especie más afectadas a los cambios de uso de suelo ya que se encuentra colindante a las zonas agropecuarias donde la salinidad y la inundación tienen menor impacto, por lo que es la primera en verse afectada por la expansión de las tierras agrícolas.

#### **2.4.2 Tala de árboles**

La madera del manglar es muy resistente a los insectos y su uso es muy popular para la construcción de viviendas (Suman, 1994). También la madera de estos árboles es utilizada como postes, cimbra para construcción, carbón, leña, tapos para pesca y construcción de galerías, para el secado de tabaco, (López Porillo y Ezcurra, 2002).

#### **2.4.3 Taninos**

La explotación irracional de la corteza del manglar para la producción de taninos, utilizado para curtir pieles, es otro uso tradicional de los lugareños, pero al no coordinar estas actividades se desperdician grandes cantidades de este árbol. (Suman, 2002).

#### 2.4.4 Instalación de industria camaronera

De acuerdo a estudios realizados por la Secretaría de Ecología de Campeche (2006), en los últimos años la industria camaronera se ha desarrollado provocando con ello un impacto en el ecosistema. Ya desde la primera fase de construcción el deterioro de los manglares es significativo a tal grado que se altera el ciclo hidrodinámico local. Esto, puede producir una baja productividad de los ecosistemas afectando en esta forma su resistencia a la presencia de plagas o fenómenos meteorológicos.

Los estanques de acuicultura intensiva, donde se crían los camarones, se fertilizan artificialmente para estimular la producción. En ocasiones la sobrealimentación a esta especie, provoca que no lo consuman por completo, degradándose a tal punto que causa una baja concentración de oxígeno disuelto en los estanques, llamado eutroficación.

Dentro del proceso productivo del camarón, por mantenimiento, se tiene que desaguar y lavar los estanques, para desechar el agua rica en materia orgánica y fertilizantes, que a su vez contaminarán los cuerpos de agua cercanos, causando eutroficación de las áreas adyacentes.

Por ejemplo, en Boca Cegada, Nayarit, en 1995 la construcción de estanques provocó la deforestación de 42 ha de manglar en el canal de marea Vena la Culebra. Para 1998 se afectaron 58.6 ha en la misma región así como otros canales tributarios. El efecto conjunto dio como resultado la pérdida de 100.6 ha de manglar entre 1995 a 1998 (Agraz-Hernández *et al.*, 2003).

En la tabla 7 se muestra los impactos ocasionados por la construcción y operación de las granjas de camarón.

Tabla 7. Impactos causados por la construcción de granjas camaronícolas

Actividad	Impacto potencial	Resultado potencial
Construcción de estanques, canales y accesos. Dragado	Destrucción o degradación de ecosistemas costeros acuáticos	Pérdida de hábitats y reducción de la productividad y



Actividad	Impacto potencial	Resultado potencial
y disposición de material dragado	<p>(humedales, marismas, manglares y planicies lodosas).</p> <p>Alteración del flujo estuarino y de la hidrodinámica local.</p>	<p>resistencia de los ecosistemas</p> <p>Pérdida de bancos naturales de camarón y de organismos que dependen del estuario</p> <p>Pérdida del reciclaje de nutrientes</p> <p>Alteración del microclima</p> <p>Incremento en la sedimentación y en la erosión de suelos</p> <p>Incremento en la erosión de playas</p> <p>Incremento de los riesgos naturales (inundaciones, erosión)</p> <p>Salinización del manto freático por intrusión y percolación</p>
Extracción de aguas subterráneas	Intrusión de agua salada y salinización de acuíferos de agua dulce	<p>Degradación de fuentes de agua potable y de uso agrícola</p> <p>Hundimientos de suelos</p>
Extracción de agua de estuarios	Remoción de larvas y juveniles de peces y moluscos	<p>Disminución de las capturas de peces en las pesquerías de subsistencia y pescadores</p> <p>Pérdida de bancos de semillas de granjas camaronícolas</p> <p>Reducción de los bancos de peces</p>
Descargas de los estanques	<p>Eutroficación de las aguas adyacentes producida por la materia orgánica y los fertilizantes usados en las pozas</p> <p>Contaminación química de las aguas costeras debida al uso de medicinas y antibióticos para el control de plagas, crecimiento y desinfección</p>	<p>Mortandad de organismos en sistemas acuáticos adyacentes</p> <p>Cambios en la biota béntica y en la diversidad de especies</p> <p>Reducción de la productividad de los estanques cercanos a las aguas contaminadas</p>

Actividad	Impacto potencial	Resultado potencial
		Efectos en la salud humana Proliferación de agentes patógenos resistentes a los medicamentos
Sobrepesca de poslarvas y de hembras grávidas	Disminución de las poblaciones de camarón silvestre a lo largo de la costa	Disminución de las capturas de peces en las pesquerías de subsistencia y pescadores Pérdida de bancos de semillas de granjas camaronícolas Reducción de los bancos de peces
Introducción de especies exóticas	Proliferación de agentes patógenos, depredadores y parásitos acompañantes de la fauna no nativa	Pérdida de la productividad de la camaronicultura Pérdida de vida acuática o cambios en la composición y diversidad de especies
Expansión de enfermedades virales y bacterianas a través del movimiento de poslarvas	Introducción de enfermedades a las granjas existentes y a los ecosistemas locales  Pérdida en la producción camaronícola	Pérdida de vida acuática o cambios en la composición y diversidad de especies

Tomado de Secretaría de Ecología de Campeche, 2006 (modificado de Tobey *et al*, 1998)

#### 2.4.5 Caminos de terracería y carreteras

Otra de las causas de la alteración del flujo de agua salina y dulce, se debe a la construcción de carreteras y caminos en las zonas costeras de nuestro país, la que provoca la mortalidad de grandes extensiones de manglares, como sucede en Quintana Roo y Yucatán, (López Portillo y Ezcurra, 2002, *op cit* Trejo *et al.*, 1993).

#### 2.4.6 Asentamientos humanos y desarrollos turísticos

Los megaproyectos turísticos y la urbanización en las zonas de manglares, dan origen a la tala de los mismos y al relleno de las áreas donde estaban, lo que

propicia que la pérdida de este ecosistema sea irreversible, en la misma proporción se interrumpen los flujos de cambio de agua. Un claro ejemplo lo encontramos en la Riviera Maya, también conocido como Corredor Cancún-Tulum y en algunos destinos turísticos de la Península de Baja California (López Portillo y Ezcurra, 2002).

#### **2.4.7 Infraestructura petrolera**

Las obras que se llevan a cabo para la explotación y transportación del petróleo y sus derivados, han provocado impactos perjudiciales en las áreas de manglar en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche. Los derrames de petróleo que ocurren ocasionalmente causan que el manglar muera por falta de oxígeno, que le llega a través de sus raíces (López Portillo y Ezcurra, 2002; Secretaría de Ecología de Campeche, 2006).

#### **2.4.8 Instalación de líneas de energía eléctrica**

La instalación de las líneas de energía eléctrica en la zona de manglares, provoca el desmonte de estos árboles, esa misma afectación se da cuando se realizan actividades de mantenimiento.

Hablar de que muchos de los efectos negativos en los manglares se deberán también a lo que sucede con las fuentes de agua dulce cuenca arriba, es decir, de los sistemas hídricos que son la fuente de agua dulce de muchos de estos manglares.

### **2.5 Restauración del manglar**

El primer indicio de restauración del manglar conocido, se llevo a cabo en China a finales de la década de los 80's (Reyes y Tovilla, 2002). Por medio de esta técnica se puede llegar a recuperar sitios alterados, incluso algunas funciones del ecosistema, aún cuando algunos parámetros se hayan modificado, como el suelo, las condiciones ambientales, flora y fauna, etc.

Para que se obtenga éxito en la restauración es necesario eliminar todas las posibles fuentes de tensión en el área, elegir las especies adecuadas de acuerdo a las condiciones del medio (inundación, salinidad, etc.) y optar por la técnica de siembra adecuada (vivero y siembra directa) (Tovilla *et al.*, 2004) para tener con ello, un mejor resultado.

En México y en otros países se han preocupado por regenerar de nuevo el manglar en áreas alteradas o degradadas donde antes existía este ecosistema, por lo que han hecho esfuerzos, junto con las comunidades aledañas, para realizar tales actividades de restauración.

Por ejemplo un estudio realizado por Reyes y Tovilla (2002) en Laguna Cabildo y Laguna de Pozuelos en el municipio de Tapachula, Chiapas, comprobaron que las plantas de *Rhizophora mangle* desarrolladas en viveros presentaban una baja mortalidad (1%) y una mayor altura (71.4 cm) que aquellas desarrolladas en el campo e incluso ramificaban más rápido. Esto se debe a las condiciones adecuadas de humedad, sombra y ausencia de competencia por sustrato y nutrientes e inclusive de plagas.

Este mismo autor junto con otros investigadores menciona que las plantas germinadas en viveros son mayores que en campo porque éstas pueden ser atacadas por plagas y por la falta de agua durante la época de secas (Tovilla *et al.* 2004).

Un proyecto realizado en Colombia por *INDERENA* (Instituto Nacional de Recursos Renovables y del Ambiente) demuestra que *Rhizophora mangle* es la mejor especie para reforestar debido a sus capacidades adaptativas como resistencia a las condiciones extremas, supervivencia en vivero y disponibilidad; en las que le siguen de importancia son *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (Álvarez-León, 2003).

A su vez, Selvam *et al.* (2003) llevo a cabo la restauración del manglar degradado en Pichavaram, India donde el ciclo hidrodinámico había sido alterado, efectuando la construcción de un canal artificial, de esta manera se

permitió el libre flujo de agua por lo que el suelo de nuevo tuvo nuevamente humedad para el crecimiento del manglar. Como resultado, las especies de manglar plantadas en el sitio demostraron una sobrevivencia del 80%, un crecimiento comparable a semillas plantadas en áreas no degradadas.

Aún donde el disturbio es reducido, las condiciones del suelo se alteran y el medio natural de dispersión puede verse limitado, siendo que la recuperación natural puede llegar a ser muy lenta. El propósito general al efectuar una restauración es recuperar las características originales del ecosistema degradado, incluyendo la restauración de la gama completa de la diversidad biológica y de todos los procesos ecológicos esenciales.

En los proyectos de restauración se debería desarrollar programas de monitoreo para medir las etapas de la restauración. Idealmente, el bosque restaurado se debe comparar a los bosques que no han tenido ninguna intervención en su regeneración (WIOMSA, 2004).

También es importante tomar en cuenta al realizar una restauración involucrar a la población local desde el inicio, así como a los responsables políticos y planeadores regionales, del desarrollo sustentable, por ejemplo, se pueden desarrollar programas de educación ambiental y de información (Lighthouse Foundation, 2007).

En el futuro, la restauración del manglar y su uso sustentable deberá ser a través de un manejo integrado de importancia particular.

La recuperación natural de los manglares puede ser baja incluso donde se permite proceder, debido a las condiciones de alteración del suelo, permanentes cambios en el nivel de la marea y patrones de drenaje, la interrupción de los procesos que suplen a los propágulos de manglar, las larvas de invertebrados marinos y peces (Kaly y Jones, 1998).

Kaly y Jones (1998) realizando una revisión en la literatura, proponen tres pasos que hay que llevar cabo para la restauración: 1) se debe describir y

definir el estado “natural” del ecosistema, *a priori*, al resultado deseado de una restauración, incluyendo fijar los criterios para el éxito. Para lo cual es importante incluir los siguientes factores: la pendiente y altura del sustrato fangoso, la distribución de entrada de agua dulce, la composición de especies, abundancia y la estructura de tamaño del manglar, la densidad de invertebrados detritívoros y principalmente, los flujos de energía y otras interacciones dentro y fuera del ecosistema, 2) se debe investigar si la restauración del manglar necesita el desarrollo de biotecnologías. En esta fase se deben de plantear las siguientes preguntas: ¿Se requiere un trabajo físico en el área (terraplenes), tratamiento químico de suelos con sulfato ácido?, ¿Qué especies serán reintroducidas en el área, y cuales serán las apropiadas? ¿Cómo se va lograr restaurar las especies y las características del hábitat (sincronizar con la época del año, etapa de desarrollo, cultivar, etc.)?, 3) por último, se debe examinar el manglar restaurado y evaluar el éxito de la restauración, que puede ser juzgado en términos de costo y velocidad de la recuperación, o incluso de la facilidad del manglar en regenerarse así mismo.

Asimismo, es común encontrar suelos sulfato ácidos en áreas de manglar en zonas tropicales, lo que presenta un problema complejo para la restauración. Los suelos con ácido sulfato pueden desarrollar un pH por debajo de 2, pero los efectos no se han comprobado en el crecimiento de los árboles de manglar replantados (*idem*).

Béland (2006) apoyándose en imágenes de satélite en los años de 1986, 1992 y 2001, en el distrito de Xuan Thuy, Tailandia, descubrió que entre 1986 y 1992 se perdieron 440 ha de manglares; mientras que de 1992 a 2001 se restauraron 441 ha; esto gracias a los proyectos de restauración realizados por Red Cross y los trabajos de conservación de la Reserva Nacional de Xuan Thuy.

Más trabajos de restauración se han enfocado sólo a las técnicas para el crecimiento de los árboles de manglar, prestando poca atención a la estructura de la comunidad a largo plazo o los vínculos que hay con otros ecosistemas (Kaly y Jones, 1998).

La finalidad de un ecosistema restaurado es que debe ser capaz de responder al estrés y a los cambios ambientales a lo largo del tiempo en una manera similar al sistema natural.

## **2.6 Distribución geográfica del manglar en México y su tendencia actual**

En lo que respecta a la distribución geográfica del manglar en nuestro país por la parte de la costa del Pacífico, los manglares se encuentran en esteros y lagunas costeras distribuidas más irregularmente que en el Golfo, desde Baja California y Sonora, hasta Chiapas y la frontera con Guatemala (López Portillo y Ezcurra, 2002). *Rhizophora* alcanza aproximadamente el paralelo 27° en el litoral occidental de Baja California, mientras que *Avicennia* se detiene antes de llegar a 25°; del lado del Mar de Cortés, en cambio *Rhizophora* alcanza el paralelo 29° y *Avicennia* se encuentra aun cerca de 31° en el litoral de Sonora (Rzedowski, 1988).

En la costa del Atlántico *Avicennia* se extiende hasta el sur de Texas, aunque *Rhizophora* sólo parece alcanzar en su distribución el sur de Tamaulipas ( $\pm 23^\circ$  de latitud norte) (Rzedowski, 1988). Los manglares son extensos en las costas del Caribe en los estados de Yucatán y Quintana Roo (López Portillo y Ezcurra, 2002).

En la costa del Pacífico el manglar se distribuye a lo largo de la línea de costa; en Chiapas en la desembocadura del Suchiate, en la zona conocida como Las Pampas de la Caribeña y del Maragato, además en los esteros de La Carreta y Palo Blanco, en las lagunas El Mosquito, Encrucijada y La Joya; en Oaxaca estos ecosistemas se desarrollan pequeñas zonas entre la Laguna Inferior y el Mar Muerto además en las lagunas Chacahua y Corralero; en Guerrero crecen en varias lagunas como las Tres Palos y la Coyuca; en Michoacán de Ocampo se localizan pequeñas áreas en la desembocadura de los arroyos La Maromita y El Limoncito; en Colima, Jalisco y Nayarit, donde se desarrollan bosques de significativa importancia en las lagunas de Agua Brava y Teacapan; en las

costas de Sinaloa los manglares crecen en esteros, bahías y ensenadas, desde Mazatlán hasta Los Mochis; en Sonora y Baja California se encuentran muy localizados y prácticamente sólo en forma de arbustos (FAO, 2005).

En México el manglar puede llegar a formar bosques muy densos y desarrollados, especialmente en los humedales costeros de los deltas del Grijalva y el Usumacinta en Campeche y en las lagunas costeras de Chiapas, donde los árboles alcanzan los 30 m de altura y las comunidades de manglares se extienden al interior de la ribera de los ríos varios kilómetros (*idem*).

En nuestro país la sucesión más común de las especies de manglar es *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (Contreras, 1993). Y el mejor desarrollo se encuentra en la desembocadura de ríos y canales deltáicos donde la disponibilidad de nutrientes es constante y la salinidad apta.

Actualmente la superficie de manglar en México es de 915 020 hectáreas, de las cuales, corresponden al Pacífico 334 611 hectáreas y al Golfo de México 580 408 hectáreas (INE, 2005). En un estudio reciente de la FAO sobre evaluación de los recursos forestales mundiales (2005) realizó un compendio de información para valorar la superficie de manglar y cuál es la más reciente con que cuenta nuestro país (Tabla 8).

Tabla 8. Extensión del manglar en México a través del tiempo

**Sumario de la situación de la extensión del área de manglares en el tiempo**

	Estimación del área de manglares más reciente y confiable		Estimación del área de manglares 1980	Estimación del área de manglares 1990	Estimación del área de manglares 2000	Estimación del área de manglares 2005
	ha	año	ha	ha	ha	ha
México	882 032	2002	1 124 000	985 600	885 000	820 000

Fuente: FAO, 2005

En otro estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología (INE) en septiembre del 2005 se obtuvo una superficie de manglar en 1976 (en base a la Serie 1 de INEGI, 1976) de 1,041,267 ha con 69% en el Atlántico y 31% en el



Pacífico, y para el año 2000 (Inventario Nacional Forestal) de 880,000 ha aproximadamente con 62% en el Atlántico y 38% en el Pacífico.

En el período de 1976 al 2000 la tasa de pérdida anual a nivel nacional fue de 2.5%, para el lado del Golfo de México fue de 2.8% y para el Pacífico fue de 2.0%. En la tabla 9 se muestra las tasas de pérdida por estado (INE, 2005).

Tabla 9. Tasa de pérdida anual (%) por estado

<i>Estado</i>	<i>Tasa de pérdida anual (%)</i>
Campeche	3.16
Campeche-Tabasco	-0.02
Quintana Roo	2.52
Tabasco	3.21
Tamaulipas	0.87
Veracruz	2.28
Yucatán	1.84
<b>Total del Golfo de México</b>	<b>2.8</b>
BCS	0.71
Chiapas	3.56
Colima	2.05
Colima-Jalisco	0.60
Guerrero	1.70
Jalisco	2.23
Michoacán	-0.08
Nayarit	2.46
Oaxaca	2.38
Sinaloa	2.23
Sinaloa-Nayarit	1.36
Sonora	2.11
<b>Total en el Pacífico</b>	<b>2.0</b>

Fuente: INE, 2005

## 2.7 Métodos para el mapeo del manglar

### 2.7.1 Percepción remota y el mapeo del manglar

Debido a que el objetivo principal de este trabajo es analizar la dinámica espacio-temporal del manglar empleando imágenes de satélite, es importante realizar una revisión de la literatura sobre los métodos y técnicas de mapeo de este ecosistema siendo que los mapas son herramientas imprescindibles para poder conocer la distribución geográfica de este ecosistema así como su dinámica en el tiempo. Además de cómo la percepción remota puede ser utilizada para realizar dichos mapas.

En los últimos años la percepción remota (PR) ha sido una eficaz herramienta metodológica y tecnológica en una gran variedad de estudios de la superficie terrestre y muy importante desde la década de los cincuentas para la cartografía de vegetación. Esta técnica ha servido para conocer, identificar y clasificar los diferentes tipos de vegetación, en particular, a los manglares (Ratanasermpong *et al.*, 2000), ya que estos por lo general se desarrollan en zonas de difícil acceso para los especialistas que realizan trabajos de investigación *in situ* mediante métodos convencionales (Alvarez e Interián, 2005); también presenta una visión sinóptica de la superficie terrestre que no se podría tener sin un trabajo de campo exhaustivo (Kannan *et al.*, 1998).

Por otro lado, la creciente necesidad de monitorear y evaluar la estructura de los manglares y su dinámica, nos permiten ganar una mejor comprensión de su biología básica y ayudar a guiar los esfuerzos de conservación y restauración (Wang *et al.*, 2004; Hussin *et al.*, 1999). La PR es importante porque a través de esta herramienta se puede identificar e inventariar a los humedales en una zona; así como llevar acabo una planificación y gestión para una conservación adecuada de los mismos (Vega, 2006). En lo que respecta al manglar, es la única técnica que puede ser usada para evaluar los cambios sobre grandes áreas y que puede proporcionar una visión periódica de este proceso (Nayak, 2004; Pellerin *et al.*, 2004 *op cit* Costa, 1992); además, complementa el trabajo

en campo que en ocasiones es difíciles de realizar, especialmente en los manglares (Satyanarayana *et al.*, 2001).

Una gestión adecuada de estas zonas implica la evaluación tanto de carácter social, cultural y ecológico de los humedales como del valor económico del mismo para una distribución eficaz de los recursos entre los diferentes usuarios. Asimismo tomar en cuenta las escalas en tiempo y espacio de las zonas en donde se encuentre este recurso.

Por ejemplo, el mapeo del manglar a nivel de especie se puede realizar con fotografías aéreas de alta resolución, mientras que el mapeo de los indicadores ambientales a nivel de paisaje de un área costera se puede efectuar generalmente usando imágenes basadas en los sensores como Landsat TM, Spot HRV o IRS LISS (Nayak, 2004; Ramachandran *et al.*, 1998; Satyanarayana *et al.*, 2001, *op cit* Klemas, 2001).

La PR ha sido usada exitosamente para cuantificar la pérdida de este tipo de ecosistema, por ejemplo, India (Satyanarayana *et al.*, 2001; Murali *et al.*, 2006; Cho *et al.*, 2004), Tailandia (Ratanasermping *et al.*, 2000), Sri Lanka (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2002), Kenia (Kairo *et al.*, 2002) Vietnam (Béland *et al.*, 2006), Ghana (Coleman *et al.* 2003), México (Archer *et al.* 2003; Hernández-Trejo *et al.* 2006), Qatar (Syed y Saqid, 2002), Tailandia (Wang *et al.* 2003) e Indonesia (Hussin *et al.* 1999). El uso de fotografías aéreas y de otras tecnologías de percepción remota en combinación con Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrece una útil herramienta para su monitoreo (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2002).

Satyanarayana *et al.* (2001) en su investigación, cartografiaron el manglar y sus alrededores usando una imagen IRS-1C LISS 3 de 1999 de Coringa en la costa este de India. Su estudio se basó en una clasificación supervisada corroborada con una interpretación visual de la imagen y con visitas a campo. Su resultado fue que se clasificó bien el manglar de las otras coberturas.

Murali *et al.* (2006) evaluó los cambios en el estuario de Mandovi-Zuari, Goa, India con datos del SPOT-1 (noviembre 1990), de IRS-1C (enero 2001) y IRS-1D (enero 2003), empleando una clasificación supervisada, donde se caracterizaron los rasgos del área de estudio con ayuda de un compuesto de falso color para identificar los sitios de entrenamiento. La exactitud que tuvo como resultado para 1990, fue de 90.93%, 2001 de 88.03% y para 2003 de 88.69%. En el periodo de 1999-2003 el manglar disminuyó de 4.12 al 3.08% debido a la urbanización.

Cho *et al.* (2004) evaluaron la pérdida del manglar en Pichavaram, India utilizando datos obtenidos en 1970, de una imagen Landsat de 1987 y una imagen IRS1C LISS –III de 1998. El método empleado para mapear el manglar y otras coberturas fue con una clasificación supervisada. Su estudio dio como resultado que el área de manglar en el año 1970 era de 4.62 km<sup>2</sup> y se redujo a 4.2 km<sup>2</sup> en 1987 y para 1998 solo era 3.70 km<sup>2</sup>.

Ratanasermping *et al.* (2000) efectuó una valoración del uso del bosque en Ao Sawi –Thung Kha, Chumphon, Tailandia, haciendo una interpretación visual en tres imágenes (1987, 1993 y 1998) a una escala de 1:50000. Los resultados encontrados fue que hubo disminución del área del manglar de 1 267, 1 140 y 1091 ha en 1987, 1993 y 1998 respectivamente.

Dahdouh-Guebas *et al.* (2002) cuantificaron la extensión de manglar en el Lago de Pambala-Chilaw en la costa oeste de Sri Lanka usando fotografías aéreas a escala 1: 20000 del periodo de 1994 a 1999. El método empleado fue una interpretación visual sobre pantalla e identificaron los diferentes patrones de uso y cobertura en el área de estudio. El resultado que obtuvo en este trabajo, es que la superficie de manglar de 209.29 ha en 1994 disminuyó a 196.53 ha en 1999; una posible causa es el desplazamiento de las granjas camaronícolas y las plantaciones de cocos ante el manglar.

Kairo *et al.* (2002) realizó un inventario de manglar en Kiunga Marine National Reserves, Kenia, utilizando fotografías aéreas en blanco y negro a escala 1:25 000, en el que llevaron a cabo una interpretación visual preliminar que fue

llevada a campo, para correlacionar las características de las fotos, y los rasgos de campo. Posteriormente digitalizaron los polígonos resultantes de la interpretación en el sistema de información geográfica. Se comparó los polígonos digitalizados con la verdad de campo donde coincidían el 95%. Parte de sus resultados indican que las especies más amenazadas son la *Rhizophora mucronata* y la *Ceriops tagal*.

Béland *et al.* (2006) realizó una evaluación de los cambios en el manglar relacionados con el desarrollo de granjas camaronícolas en el Distrito de Giao Thuy, Vietnam. Para ello, utilizó imágenes de Landsat TM y ETM+ de las fechas de 1986, 1992 y 2001, el método empleado para todas las imágenes fue una clasificación no supervisada, siendo los resultados para el período de 1986 al 2001, el 63% de áreas de manglar identificadas en la imagen de 1986 han sido parcialmente o completamente reemplazadas por estanques de camarón en el 2001.

Coleman *et al.* (2003) demostró el deterioro de los manglares en la costa oeste de Ghana empleando imágenes de Landsat TM y ETM+ del 1990 y 2000 respectivamente. El método de clasificación que empleó fue el no supervisado, obteniendo una exactitud de 80% para la imagen de 1990 y 85% para el 2000 comparando con los datos de verdad de campo. Los resultados obtenidos de este estudio fue que la superficie de manglar de 2 605 hectáreas (ha) en 1990 a 1 905 ha para el 2000, a causa de la mancha urbana y las actividades agrícolas.

En un estudio para la conservación Laguna de La Mancha, Veracruz, México realizado por Hernández-Trejo *et al.* (2006) llevaron a cabo una interpretación de fotografías aéreas de 1988 a escala 1:20000, y de 1995 a 1:37500. También requirieron un mapa de paisaje de toda la cuenca a escala 1:65000 para tener una visión completa del área de estudio. Los resultados que obtuvieron es que los manglares llegan a ser más altos y diversos cuando hay un aumento en la periodicidad de inundación.

Archer *et al.* (2003) evaluó el estatus histórico y actual del bosque de manglar, examinando imágenes de 1986, 1993, 1999 y 2001 (Landsat TM y ETM+) del sistema de estuario de Teacapán del Pacífico Mexicano. Empleó una clasificación no supervisada y tomó como base la imagen de 1986. Sus resultados sugieren que hubo un pequeño cambio en la superficie de manglar degradado entre 1986 y 1993, y entre 1999 y 2001. Sin embargo, entre 1986-2001 la superficie de manglar disminuyó de 1769 ha a 530 ha.

Syed y Saqid (2002) su estudio se enfocó en estimar la vegetación de desierto (incluyendo manglar) en Qatar. La metodología se basó en una interpretación visual de una imagen Landsat TM (abril 2000). Con los datos obtenidos de trabajos de campo, realizaron sitios de entrenamiento para una clasificación supervisada empleando el algoritmo de máxima probabilidad, el resultado que se obtuvo fue de tan sólo un 69.39% de exactitud para el manglar, por lo tanto, los autores recomiendan utilizar otros sensores que brinden una mejor resolución espectral y espacial.

Wang *et al.* (2003) este estudio se basa en conocer los cambios en la distribución y la cuantificación del área total de manglar a lo largo de la costa de Tanzania con imágenes de Landsat TM adquiridas entre 1988 y 1990 e imágenes ETM+ del 2000, a las cuales se les realizó una interpretación visual sobre pantalla. El resultado fue que, para 1990, la superficie de manglar era 109 593 ha y para el 2000, 108 138 ha. La exactitud que se obtuvo de la delimitación fue de 98.53 % para 1990 y de 97.53% para el 2000.

Hussin *et al.* (1999) compararon la capacidad de tres diferentes imágenes de radar con tres de satélite para detectar la deforestación del manglar en el delta del río Mahakam, Indonesia. Examinando imágenes de Landsat MSS (1983), Spot-XS (1987), Landsat TM (1994), JERS-1 (septiembre 1996), ERS-1 (mayo 1996) y Radasat-1 (1997). A todas las imágenes se les realizó una clasificación supervisada. En donde la pérdida del manglar fue de 96 228 ha en 1982 a 78 799 ha para 1996.

Si los datos obtenidos a través de la PR tienen una buena resolución espacial y espectral son considerablemente útiles para el mapeo de uso de suelo y coberturas del terreno (Murali *et al.*, 2006 *op cit* Dimiyati *et al.*, 1996).

Para los estudios del manglar, la información básica que se requiere para el manejo de los manglares debe ser principalmente la distribución y la extensión del área del manglar, composición del bosque, sitios de degradación, red de drenaje, extensión de las ciudades costeras, otros usos de suelo dentro y fuera del ecosistema, y esencialmente el uso de imágenes de satélite de alta resolución para realizar mapas temáticos de gran escala de la cobertura vegetal (Kannan *et al.*, 1998).

También, puede ser necesario contar con cartografía detallada y confiable para el manglar ya que es una necesidad importante de los tomadores de decisiones, no sólo para garantizar su protección sino también en el diseño de planes de restauración, ordenamiento ecológico y el manejo de cuencas hidrográficas (Hernández-Trejo *et al.*, 2006).

La capacidad de la PR está particularmente en función de la resolución del sensor, y especialmente en función del método del procesamiento de imágenes, problemas de georreferenciación o el procedimiento de clasificación adoptado (Green *et al.*, 1998).

De igual forma, el manejo de la zona costera requiere de información sobre la estructura y función de los ecosistemas que la integran, así como evaluaciones del impacto ambiental que las actividades antropogénicas generan en esa zona. Dada su extensión y características, dichas evaluaciones han sido limitadas y escasas. Sin embargo, el uso de técnicas alternativas como la PR posibilita la obtención y análisis de información sobre cobertura y usos del suelo en distintas escalas espaciales y temporales (Santos *et al.*, 2002).

## **2.8 Problemas durante el mapeo del manglar utilizando imágenes de satélite**

La interpretación de las imágenes de satélite ya sea visual o digital, en ambientes tropicales no es fácil, ya que se presentan numerosas dificultades relacionadas con la interacción entre las diferentes superficies existentes y la gran variabilidad de las condiciones atmosféricas presentes a la hora de la adquisición de la imagen. A esto hay que añadirle la gran diversidad y la complejidad que presentan las superficies de agua, suelo, vegetación lo que complica más aún la adecuada manipulación de la imagen (Gónima y Durango, 2005).

Estimar la cobertura del manglar es subjetivo por varias fuentes de inexactitud y confusión. Si el dosel de manglar es denso, oscurece los parches sin árboles y los canales de modo que la cubierta total de manglar es subestimada si existe en pequeños parches o en baja densidad. Esto es porque los parches pequeños de manglar pueden estar más allá de la resolución espacial del satélite (Kannan *et al.*, 1998).

Las clases espectrales del manglar en imágenes Landsat TM por ejemplo, no son suficientes para realizar la discriminación de las especies con las que cuenta y pueden ser confundidas con otros tipos de vegetación presentes en el ecosistema (Camargo *et al.*, 2006).

En un estudio realizado por Guerra-Martínez y Ochoa-Gaona (2005) encontraron que los patrones de reflectividad eran semejantes entre la selva mediana de "puckté" y el manglar; por lo que, espectralmente no se pueden diferenciar y de hecho en campo se encuentran mezcladas, presentando éstas clases los porcentajes de fiabilidad más bajos, así como los niveles de imprecisión mas altos con respecto a las otras clases que hallaron en los Pantanos de Centla, Campeche, México.

Los mapas detallados por comunidad o a nivel de especie del manglar, no son fácil de producir, principalmente porque los bosques de manglar son de muy



difícil acceso (Vaiphasa, 2006), contando con esta fuente de información podemos estudiar el ecosistema manglar y su diversidad.

El uso de datos auxiliares ha sido exitosamente empleado para el mapeo de otros tipos de vegetación pero nunca ha sido probado sobre el manglar. Asimismo, con el apoyo de estos datos proporcionarían una calidad del mapa final mucho mejor.

Aun cuando la PR multiespectral se utiliza en el nivel operacional para el mapeo del manglar, la información proporcionada por los sensores multiespectrales no es suficiente para estudiar el ecosistema y su diversidad debido a la carencia de detalle espacial y espectral.

En otro estudio de caso por ejemplo, Mannassrisuksi *et al.* (2001) al momento de clasificar las coberturas del área de interés excluyeron a los cuerpos de agua debido a que presentaban los mismos valores de reflectividad que las granjas camaronícolas.

Una de las desventajas al interpretar visualmente, es que se pueden confundir áreas degradadas con plantaciones de manglar joven, ya que se ven semejantes en una imagen (Selvam *et al.*, 2003).

Hay entonces que tomar en cuenta que en imágenes de satélite de baja resolución espacial, las distintas clases de cobertura del terreno pueden producir una respuesta espectral similar, lo que dificulta la discriminación (Mota *et al.*, 2004).

Por otro lado, las condiciones atmosféricas y climáticas, presentan un problema en la calibración del sensor, el nivel de humedad del suelo, etc., produciendo diferentes respuestas espectrales de las mismas clases de uso de suelo/cobertura en las imágenes de las mismas regiones, pero adquirida en diferente época del año (Mota *et al.*, 2004) lo que puede originar que un mismo objeto tenga diferentes respuestas espectrales causando confusión.

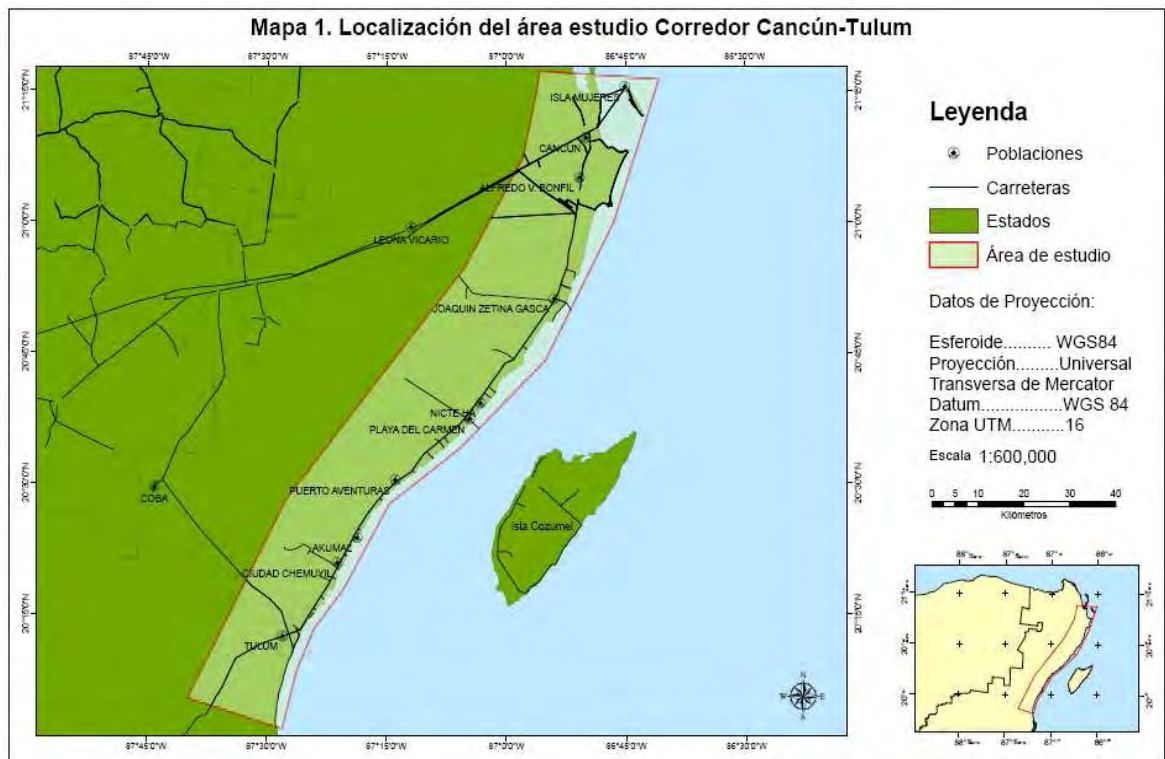
Wang *et al.* (2004 en Kay *et al.*, 1991) indican que en previas experiencias es difícil de distinguir selva con manglar costero de franja usando Landsat MSS y fotografías aéreas.

El uso de imágenes de satélite para el mapeo del manglar no ha sido extensamente utilizado debido a la resolución espectral y espacial que es una limitante con imágenes convencionales. Dado al pequeño tamaño de los parches de manglar, la resolución espacial juega un papel más importante que la resolución espectral en la discriminación de diferentes especies de manglar (Wang *et al.* 2004).

# Capítulo 3. Área de estudio

## 3.1 Localización y vías de acceso

A la zona de estudio se le conoce como el “Corredor Cancún-Tulum” (mapa 1) y se ubica en la costa noroeste del Estado de Quintana Roo, al sureste del país, con una superficie aproximada de 18.2 km<sup>2</sup> que comprende a los municipios de Benito Juárez, Cozumel y Solidaridad. Sus coordenadas extremas son 20°07' y 21°04' de latitud norte y 86° 46' y 87°38' de longitud oeste (Diario Oficial de la Federación, 2001). Aunque para esta tesis se amplió el área de estudio hacia la parte norte abarcando la ciudad de Cancún hasta Punta Sam debido a que se observó que esta área ha presentado cambios de uso de suelo muy importantes en poco tiempo.



Las vías de acceso son por la carretera federal 180 y la que se encuentra a lo largo del corredor es la carretera federal 307. También cuenta con dos

aeropuertos internacionales, el de Cancún y de Cozumel, y pistas de uso local o municipal. En lo que respecta al transporte marítimo tiene los siguientes puertos: Puerto Juárez, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Punta Venado.

### **3.2 Clima**

El clima es tropical con lluvias en verano registrándose temperaturas medias mensuales entre 23° a 27 °C durante el año y temperatura máxima de 33 °C y mínimas de 17 °C. La precipitación media anual es de alrededor de 1300 mm aunque puede variar por la presencia de huracanes y tormentas tropicales (Semarnat-Conap, 2005).

Los fenómenos meteorológicos que afectan a la zona costera son los huracanes, tormentas tropicales y nortes. La temporada de huracanes abarca desde junio a noviembre, siendo el mes de septiembre el más crítico.

El 46% de los huracanes que tocaron costas mexicanas en un período de 50 años pasaron por este estado (Programa Director de Desarrollo Urbano del Centro de Población Tulum, en adelante PDDUT, 2006). Un ejemplo es el caso del Huracán Gilberto (1988), uno de los fenómenos más extremos y violentos de los que se tenga registro, en los que se registraron vientos de 320 km/h causando grandes daños en la zona costera.

Por otro lado, los nortes se presentan en la época invernal pero principalmente de noviembre a febrero prolongándose hasta marzo (PDDUT, 2006).

Asimismo, los vientos dominantes (alisios) que se presentan provienen del sureste con velocidades de 10 km/h aproximadamente (*idem*).

### **3.3 Geología**

Quintana Roo está formado por rocas sedimentarias originadas en los periodos Terciario y Cuaternario(<http://www.semarnat.gob.mx/qroo/dgats1/anexo2.shtml>)

en los últimos 66 millones de años (PDDUT, 2006) y por levantamientos epirogénicos que se iniciaron en el Cenozoico superior formándose una losa (Instituto de Geografía-UNAM, en adelante IG-UNAM, 1980), la cual ha sufrido hundimientos y elevaciones.

La estructura geológica de la superficie y subsuelo, demuestra que la plataforma de la Península actual inició su emersión sobre el nivel del mar durante el Oligoceno y Mioceno (38-23 millones de años) en la porción meridional, el resto se levantó gradualmente a partir del Plioceno, y finalmente en el Cuaternario el ascenso continuó al norte y hacia la periferia (<http://www.semarnat.gob.mx/qroo/dgats1/anexo2.shtml>).

Las rocas que constituyen el Estado de Quintana Roo pertenecen al Cretácico encontrándose cubiertas por una capa de material sedimentario, lo que explica que los suelos sean jóvenes (IG-UNAM, 1980).

Las rocas más antiguas que se encuentran son calizas dolomitizadas, silicificadas y recristalizadas de color claro y con delgadas intercalaciones de marga y yeso (PDDUT, 2006).

### **3.4 Fisiografía**

La Península de Yucatán está conformada por una red de cuevas subterráneas por donde escurre el agua hacia el norte, es de destacar también la abundancia de cenotes (dolinas) y uvalas que constituyen la red de drenaje subterráneo (González Medrano, 2003).

Las “aguadas” son propias de la Península de Yucatán, éstas son lagunas someras de pequeño tamaño que antiguamente fueron cenotes que por procesos de erosión pierden la verticalidad de sus paredes y el fondo se va rellenando por arcillas poco permeables provocando que se eleven quedando por arriba del nivel del agua subterránea. Por otro lado, el hundimiento de la bóveda de las cavernas forman cenotes en cuyo fondo hay suelo rojizo (*idem*).

Por otra parte, Quintana Roo forma parte de la Península de Yucatán presentando un relieve sensiblemente plano, de poca pendiente, de dirección sur-norte (IG-UNAM, 1980) y con escasas elevaciones de poca magnitud, reconociéndose cuatro regiones fisiográficas: Planicie Cárstica del Norte, Sierrita de Tícul, Lomeríos Cársticos del Suroeste y Zonas de fallas del Oriente (Semarnat-Conap, 2005).

En el norte del estado, las planicies de acumulación marina y en el litoral dominan los manantiales y las resurgencias en general pequeñas; estos representan el proceso de descarga del agua subterránea hacia el mar (<http://www.semarnat.gob.mx/qroo/dgats1/anexo2.shtml>).

En la planicie suroriental (centro-sur de Q. Roo), el relieve cárstico tiene un desarrollo amplio, representado sobre todo por cenotes, hoyas y aguadas.

### **3.5 Geomorfología**

En la península de Yucatán (Quintana Roo) se distinguen tres unidades geomorfológicas (IG-UNAM, 1980):

- 1) Meseta baja de Zhlaguna es una zona elevada que se encuentra en la parte central de la península, que alcanza una altitud de 300 m formando un horst. En el extremo suroeste de Quintana Roo se presenta esta estructura, separada de las planicies del Caribe por escalones bruscos que pertenecen a líneas de fallas.
- 2) Planicies del Caribe casi todo el estado corresponde a las planicies. Al norte están conformadas por rocas calizas del Oligoceno, Plioceno al sur y del postPlioceno. Las estructuras de bajos o ak'alché se encuentran en estas rocas, formando áreas planas delimitadas por porciones más elevadas, donde el agua no se filtra debido a la impermeabilidad del suelo. Los bajos que estaban cubiertos por lagos someros, actualmente forman lagunas o aguadas poco extensas o son zonas que se inundan permanentemente. La génesis de los bajos es a causa de una ampliación de cenotes o dolinas, o también a un rellenado de cuencas

de sedimentación que se originaron por plegamientos de las calizas. Las lagunas que se encuentran al este del estado siguen las líneas de falla de dirección noreste-suroeste como es el caso de Bacalar, Chichankanab, Chuyaxché, Guerrero, Milagros, Ocom, San Felipe y Xulha.

- 3) Litoral coralífera del noreste se presentan calizas fosilizadas del postPlioceno, principalmente corales, cerca a la costa, lo que le da el aspecto blanquecino a la arena del litoral. Esta estructura es reducida y comprende el extremo noreste de Quintana Roo. Las costas son bajas y rectas, su estratificación principalmente horizontal de sus rocas y no muestran grandes perturbaciones tectónicas. Por último, los cordones litorales y penilagunares son pocos y angostos principalmente se presentan hacia bahías de Espíritu Santo y de Ascensión.

### **3.6 Hidrología**

La península carece de corrientes superficiales, principalmente en la porción norte; hacia el sur sólo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficiales. Así que, gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos en las calizas (<http://www.semarnat.gob.mx/qroo/dgats1/anexo2.shtml>).

Por lo que, el área de estudio comprende las regiones hidrológicas RH32 "Yucatán Norte" y RH33 "Yucatán Este", esta última ocupa el 28.6% de la superficie estatal (Semarnat-Conap, 2005; PDDUT, 2006) . El sistema hídrico de la península forma una "Y" invertida fluyendo hacia el norte y centro-este del estado (Semarnat-Conap, 2005).

#### Hidrología subterránea

En la franja costera del estado, los flujos de agua son principalmente subterráneos, debido a la presencia del material altamente permeable.

Partiendo de la porción sur-occidental donde se origina el flujo, el agua circula hacia el noreste y hacia el este buscando su salida. A su paso por la llanura, parte importante del agua es extraída por la vegetación, el resto sigue su curso hasta la costa y aflora en lagunas y áreas de inundación o escapa subterráneamente al mar (*idem*)

El acuífero de la península de Yucatán es vulnerable a la contaminación a causa de la gran cantidad de fisuras, grietas y conductos de disolución que se encuentran en el subsuelo y permiten la infiltración de todo tipo de aguas con mucha facilidad (Alvarado, 2003).

Las lagunas costeras en áreas tropicales donde los sedimentos son calcáreos existe una combinación de coral erosionado, retrabajado y otros tipos de caliza. Los sedimentos de estas lagunas tienen un origen de hace unos 6000 y 7000 años. En la parte profunda llegan a tener cieno, arena a lo largo de las márgenes y cerca de la entrante fango arcilloso (Contreras, 1993).

La Laguna Nichupté y Bojórquez que encuentran en las coordenadas 86°44' de longitud oeste y 21°31' de latitud norte aproximadamente. Existen otras dos pequeñas Somosaya y Río Inglés que se caracterizan por sus cenotes sumergidos, mismos que aportan agua dulce al sistema. Su profundidad promedio es de 1.5-2m.

El sistema lagunar presenta una fuerte presión por el crecimiento del complejo turístico de Cancún teniendo cambios ecológicos importantes (Contreras, 1993 citado en Gallegos *et al.*, 1990).

### **3.7 Suelos**

De acuerdo a la modificación del sistema de la FAO-UNESCO realizada por INEGI en 1985 (Semarnat-Conap, 2005), los suelos que se encuentran en el estado de Quintana Roo son poco profundos y en asociaciones de dos a más tipos, donde predominan litosoles y las rendzinas. El estado prevalecen los



suelos someros y pedregosos, de colores que van del rojo al negro, pasando por las tonalidades de café (PDDUT, 2006).

Los litosoles se caracterizan por ser suelos sin horizontes de diagnóstico, limitado por un estrato duro, continuo y coherente de poco espesor (<http://www.semarnat.gob.mx/qroo/dgats1/anexo2.shtml>). Las redzinas son suelos muy someros con espesores menores de 30 cm, reposando sobre material calcáreo, con más de 40% de carbonato de calcio y con un contenido de materia orgánica entre 6-15% (ídem).

### **3.8 Vegetación**

En Quintana Roo se observan playas arenosas rodeadas de matorrales y zonas pioneras que se caracterizan por ser halófilas, de hojas carnosas, hierba rastrera y arbustos muy ramificados de poca altura. La altura de estas especies rara vez sobrepasan los 50 cm, donde podemos encontrar: el frijol de playa (*Canavalia rosea*), pasto halófilo (*Distichlis spicata*), la riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), la margarita de playa (*Ambrosia hispida*), el tronador (*Crotalaria pumila*), el caldillo (*Cenchrus incertus*) y la golondrina (*Chamaesyce densifolia*) (Alvarado, 2003 citado en Flores y Espejel, 1994).

Según Rzedowski (1988), en Quintana Roo están los siguientes tipos de vegetación: bosque tropical perennifolio, bosque tropical subcaducifolio, bosque espinoso y vegetación acuática y subacuática.

El bosque tropical perennifolio, a causa de su heterogeneidad vegetal se ha subdividido en selva alta perennifolia, selva alta o mediana subperennifolia y bosque tropical lluvioso. Este tipo de vegetación cubre la mayor parte de Quintana Roo. Además, en terrenos planos se desarrollan mejor, así como en suelos aluviales profundos, bien drenados, ligados a rocas calizas; los suelos con gran cantidad de materia orgánica tienen un mayor crecimiento. Las especies predominantes son: ramón (*Brosimum alicastrum*), zapote (*Manilkara zapota*), caoba (*Swietenia macrophylla*) y cedro rojo (*Cedrela mexicana*).

El bosque tropical subcaducifolio se encuentra en Isla Cozumel y en Kantunilkín (norte, este y sur). Las especies predominantes son: ya'axnik' (*Vitex gaumen*), ramón (*Brosimum alicastrum*), palo tinte (*Hematoxylon campechianum*), chechén blanco (*Sebastiania longicuspis*) y negro (*Metopium brownei*), palmares, entre otros.

En el bosque espinoso, Rzedowski agrupa varias comunidades vegetales heterogéneas que se caracterizan por ser bosques bajos con espinas.

Rzedowski, menciona que en la parte de los bajos, se presenta selva baja caducifolia, selva baja subperennifolia y mezquital extra-desértico. Este tipo de vegetación se encuentra en el centro- sur de Quintana Roo y alrededores de Bahía Espíritu Santo. La vegetación característica es el tintal; las especies predominantes son: palo tinte (*Hematoxylon campechianum*), Boob (*Coccoloba cozumelensis*), *Camerana latifolia* y chechén negro (*Metopium brownei*).

La vegetación acuática y subacuática se encuentra en la parte norte del estado. En varias lagunas alargadas del litoral oriental se presentan plantas halófitas, siendo que el agua de estas lagunas es salobre, la vegetación predominante es manglar.

### **3.9 Fauna**

Quintana Roo ocupa el 19° lugar en el país en cuanto a diversidad de vertebrados endémicos en Mesoamérica y endémicos del estado (PDDUT, 2006).

En Quintana Roo las especies que se pueden encontrar son: venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), temazate (*Mazama gouazoubira*), jabalí o puerco de monte (*Tayassu tajacu*), tepescuintle (*Cuniculus paca*), armadillo (*Dasypus novemcintus*), perdiz (*Crypturellus soui*), patos, hocofaisán (*Crax rubra*), chachalaca (*Ortalis vetula*), pavo de monte (*Agriocharis ocellata*), palomas, flamenco (*Phoenicopterus ruber*), (*Pantera onca*), ocelote (*Felis*

*pardalis*), tigrillo (*Felis wiedii*), mono araña (*Ateles geoffroyi*), cocodrilo Moreleti (*Crocodylus moreleti*) víbora de cascabel (*Crotalus spp.*) y tejón (*Nasua narica*), tuza (*Heterogeomys hispidus*) (IG-UNAM, 1980).

De acuerdo a Conabio (2006) en el corredor, también podemos encontrar pavo ocelado (*Agriocharis ocellata*), loro yucateco (*Amazona xantholora*), manatí (*Trichechus manatus*), tortuga caguama (*Caretta caretta*), tortuga blanca (*Chelonia mydas*), tortuga laúd (*Dermochelis coriacea*), merostomado (*Limulus polyphemus*), boa (*Boa constrictor*), huico rayado (*Cnemidophorus cozumela*), garrobo (*Ctenosaura similis*), iguana verde (*Iguana iguana*), casquito (*Kinosternon scorpioides*), mojina (*Rhinoclemmys areolata*), jicotea (*Trachemys scripta*), garceta de alas azules (*Anas discors*), carao (*Aramos guarauna*), aguililla cangrejera (*Buteogallus anthracinus*), trepatroncos alileonado (*Dendrocincla anabatina*), garzita alazana (*Egretta rufescens*), halcón palomero (*Falco columbarius*), gavilán zancudo (*Geranospiza caerulescens*), bolsero yucateco (*Icterus auratus*), bolsero cuculado (*Icterus cucullatus*), zopilote rey (*Sarcoramphus papa*), golondrina marina (*Sterna antillarum*), mono aullador (*Alouatta pigra*), grisón (*Galictis vittata*) y oso hormiguero (*Tamandua mexicana*).

### **3.10 Características generales de la población**

En la década de los 60's, en el Corredor Cancún-Tulum, la población era de pescadores con una baja densidad. Posteriormente, el impulso de la actividad turística en la zona provocó que poco a poco se fuera poblando por la gente que migraba en busca de mejores condiciones de vida.

En el caso de Cancún específicamente, para el año de 1970 contaba con una población de 441 habitantes (hab.), en 1990 con 167 073 hab., siendo que para este período concentra el 95% de la población total del municipio de Benito Juárez y su tasa de crecimiento de 17.58% superando a todo el estado de Quintana Roo, de 8.19%. Para 1995 contaba con 297 183 hab. (Pérez y

Carrascal, 2000) y en el 2000 con 397 191 hab.; y finalmente en el 2005 reporta 526 701 hab. (INEGI, 2006).

En 1995, el municipio de Solidaridad tenía una población total de 28 747 hab. a causa del surgimiento de nuevos fraccionamientos de segunda residencia que atrajeron a la población migrante, de tal forma, que Playa del Carmen tenía una población de 17 621 hab., lo que representa el 61.3% del total del municipio. Considerando que para 1970 tenía 232 hab., que representaba el 1.83% de la población total. En el 2000 contaba con 43 613 hab. y para el 2005, 100 383 hab. (INEGI, 2006).

Para los 90's hubo una gran expansión hotelera. Para este período Cancún ya abarcaba 18 km del litoral; esta expansión continúa creciendo en lo que respecta a hoteles y residencias alcanzando más de 130 km llegando hasta Tulum (Córdoba y García de Fuentes, 2003).

Por otro lado, el modelo de Cancún, playas privatizadas, es un caso parecido al de Miami donde el turista accede por vía aérea a la ciudad no teniendo contacto con la población residente, es decir, la zona hotelera esta "controlada", pero bajo un esquema clasista que exige que abandonen el lugar los vendedores ambulantes y trabajadores que no porten un *look* apropiado (*idem*).

En la mayoría de los asentamientos humanos del corredor predomina una marcada segregación social y funcional como ocurre en Cancún. La segregación ocurre a ambos lados de la carretera Cancún-Chetumal que discurre a 4 km de la costa: la franja entre la carretera y la línea de costa la ocupan los grandes hoteles y complejos residenciales, es decir, está privatizada, mientras que la población que trabaja en esos lugares vive del otro lado de la carretera formando lo que llaman "ciudades gemelas", por ejemplo, la Colonia J. Zetina Gasca es el *apartheid* de Puerto Morelos, Pueblo Aventuras el de Puerto Aventuras, Ciudad Akumal el de Akumal, Ciudad Chemuyil el de Chemuyil y Tulum ya ha caracterizado su población interior de

la zona hotelera que se establece en la costa (Córdoba y García de Fuentes, 2003).

### **3.11 Principales problemas ambientales**

El crecimiento acelerado del turismo en el Corredor Cancún-Tulum ha generado un desequilibrio ambiental, provocado por la creación de hoteles e infraestructura, desde la década de los 70s, lo cual ha propiciado los siguientes problemas:

- La tala de selvas y manglares, propicia la fragmentación de los ecosistemas y la disminución de poblaciones, es decir, un empobrecimiento genético (López-Portillo, 1999).
- Relleno de áreas de manglar, selvas y popal-tular para construcción
- Creación de canales
- Contaminación del agua
- Introducción de flora exótica
- El blanqueamiento de los arrecifes por contaminación provenientes de aguas negras y combustibles de embarcaciones marítimas
- Corrupción de las autoridades de la SEMARNAT

Por una parte, la falta de una planeación y de un ordenamiento adecuado, generará que en un futuro se agudicen los problemas ambientales y la pérdida de flora y fauna que se encuentra en algún estatus de protección por la NOM-059-SEMARNAT-2001.

Por otro lado, el constante desarrollo turístico que vive el estado, ha generado una serie de cambios, que muchas veces son irreversibles para los ecosistemas, por ejemplo, los manglares. En particular la falta de información y conocimiento sobre el manejo y aprovechamiento de las costas arenosas ocasiona que cuando se quiere ganar un gran espacio de playa se elimina la vegetación de la duna y con ello únicamente se está acelerando el proceso de erosión de las playas.

La zona litoral de Cancún ha sufrido transformaciones debido al establecimiento de infraestructura turística (hoteles, club de playa, golf, puertos, entre otros) lo que ha afectado a los arrecifes de coral, lagunas, sitios de refugio y desove de especies de interés comercial y el hábitat de fauna endémica o migratoria (Pérez y Carrascal, 2000 citado Carrascal, 1984:126).

Por otra parte, el sistema lagunar también se ha visto afectado por los trabajos de dragado y relleno para la ampliación de sitios de mayor valor. Por ejemplo, la laguna de Bojórquez tiene poca profundidad debido al relleno, la basura y las descargas de aguas residuales, lo que ocasiona que haya escasa comunicación interlagunar reduciendo el intercambio de flujos de agua (Pérez y Carrascal, 2000 citado Cabanilla, 1996:4).

## Capítulo 4. Materiales y métodos

### 4.1 Materiales

Los materiales utilizados para la realización de esta tesis fueron: seis imágenes del satélite Landsat MSS, tres de Landsat TM y cinco imágenes de Spot 4 y 5. La cartografía que se utilizó fue a una escala 1: 50 000 y 1: 250 000, además de fotografías aéreas de varias escalas.

#### 4.1.1 Imágenes de satélite

Imágenes de satélite	Fecha de adquisición	Formato de los datos	Fuente
Landsat 5 MSS	26/Dic/72	Raster	Conabio
Landsat 5 MSS	26/Sep/72	Raster	Conabio
Landsat 2 MSS	12/Feb/76	Raster	Conabio
Landsat 5 TM	28/Mzo/85	Raster	Nasa
Landsat 4TM	13/Abr/88	Raster	Nasa
Landsat 4 TM	16/Dic/88	Raster	Nasa
Landsat 5 MSS	17/Agos/90	Raster	Conabio
Landsat 5 MSS	17/Agos/90	Raster	Conabio
Landsat 4 MSS	1/May/92	Raster	Conabio
Spot 4	29/Jul/06	Raster	INE-Secretaría de Marina (Estación ERMEXS)
Spot 5	17/Ene/06	Raster	INE-Secretaría de Marina (Estación ERMEXS)
Spot 4	27/Dic/06	Raster	INE-Secretaría de Marina (Estación ERMEXS)
Spot 5	11/Mzo/05	Raster	INE-Secretaría de Marina (Estación ERMEXS)

<b>Imágenes de satélite</b>	<b>Fecha de adquisición</b>	<b>Formato de los datos</b>	<b>Fuente</b>
Spot 5	11/Mzo/05	Raster	INE-Secretaría de Marina (Estación ERMEXS)

La verificación de las imágenes en cuanto a su georeferencia se realizó comparándolas con los datos auxiliares (límite estatal, carreteras, etc.) con los que se contaba.

#### 4.1.2 Fotografías aéreas

<b>Fotografías aéreas</b>	<b>Fecha de adquisición</b>	<b>Escala</b>	<b>Formato de los datos</b>	<b>Fuente</b>
L. 422/89 -I	1989	1: 20 000 aprox.	Impreso	INEGI
L. A4	21/Oct/80	1: 80 000	Impreso	INEGI
L. 275	Marzo 1991	1: 75 000	Impreso	INEGI
Xel- Ha	-	1:8000	Digital	-

Las fotografías empleadas sólo tienen un cubrimiento de la ciudad de Cancún y alrededores y del parque Xel-Ha.

#### 4.1.3 Cartografía

<b>Tema</b>	<b>Fecha de publicación</b>	<b>Escala/Resolución</b>	<b>Formato de los datos</b>	<b>Fuente</b>
MDT	Variable	30 m	Raster	INEGI
Carta de uso de suelo y vegetación (Serie I)	1976	1: 250 000	Vector	INEGI
Carta de uso de suelo y	1994	1: 250 000	Vector	INEGI



<b>Tema</b>	<b>Fecha de publicación</b>	<b>Escala/Resolución</b>	<b>Formato de los datos</b>	<b>Fuente</b>
vegetación (Serie 2)				
Inventario Forestal Nacional	2000	1: 250 000	Vector	IG (UNAM)-INE
Carta de uso de suelo y vegetación (Serie 3)	2003-2004	1: 250 000	Vector	INEGI
Carta Edafológica	Variable	1: 250 000	Vector	INEGI
Carta Geológica	Variable	1: 250 000	Vector	INEGI
Carta Topográfica	Variable	1: 250 000	Vector	INEGI
Carta de hidrología, agua superficial	Variable	1: 250 000	Vector	INEGI
ITER (Integración Territorial)	2000	—	Vector	INEGI
Sistema de Información Biótica	2004	Variable	Vector	Conabio
Carta geomorfológica	2003	1: 250 000	Vector	Instituto de Geografía (UNAM)

## 4.2 Método supervisado

A continuación se enlistan las fases metodológicas y técnicas que ayudaron a cumplir con los objetivos de este trabajo.

#### **4.2.1 Clasificación Digital**

Para conocer los tipos de cobertura vegetal, en especial el manglar en el Corredor Turístico Cancún-Tulum se realizó una interpretación digital por medio del método supervisado, que proporciona una mayor precisión, menor confusión y así como una mejor separación entre las clases de interés. Asimismo, el conocimiento del área de estudio y los materiales auxiliares permitieron generar los productos de este trabajo.

Se realizó por separado la clasificación supervisada de cada una de las imágenes, para evitar introducir más error a causa de la presencia de nubes en la mayoría de las imágenes y así no alterar sus niveles digitales en las imágenes.

La fecha uno corresponde al año 1972 (70's) y se realizó con las imágenes Landsat MSS (Fig. 12); la fecha dos corresponde al año 1988 (80's) realizándose con Landsat TM (Fig. 13); la fecha tres corresponde al año 1990 (90's) y se realizó con imágenes Landsat MSS (Fig.14), y la fecha cuatro corresponde al año 2006 y se empleó imágenes Spot 4 y 5 (Fig.15).

## Cubrimiento de imágenes de satélite para la fecha 1

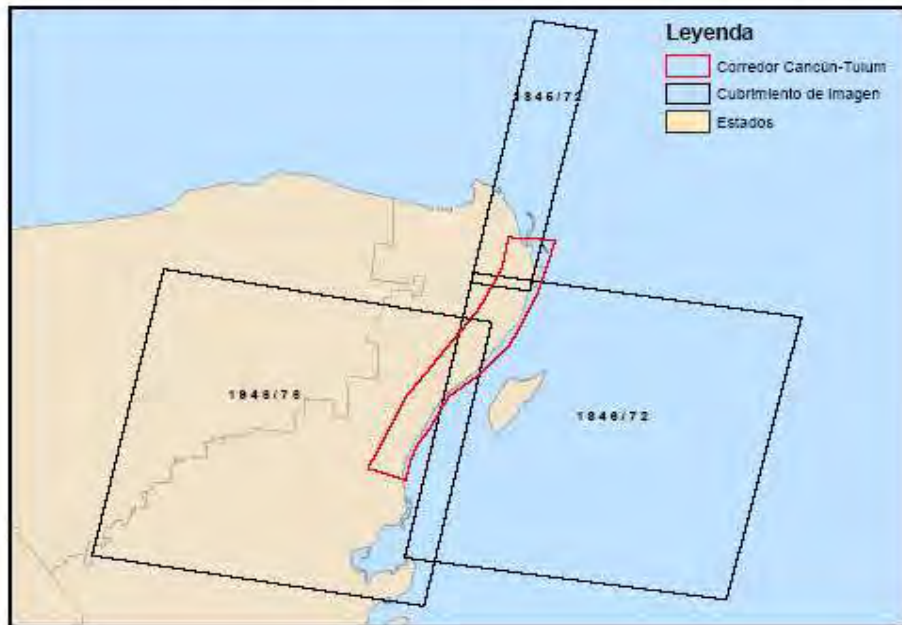


Figura 12. Cubrimiento de imágenes Landsat MSS para el Corredor Cancún-Tulum

## Cubrimiento de imágenes de satélite para la fecha 2

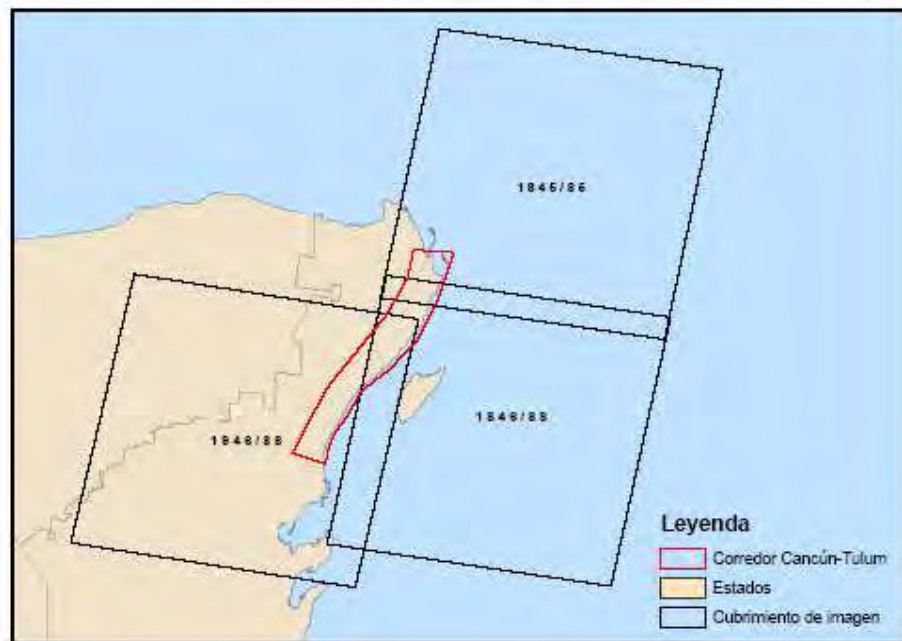


Figura 13. Cubrimiento de imágenes Landsat TM para el Corredor Cancún-Tulum

### Cubrimiento de imágenes de satélite para la fecha 3

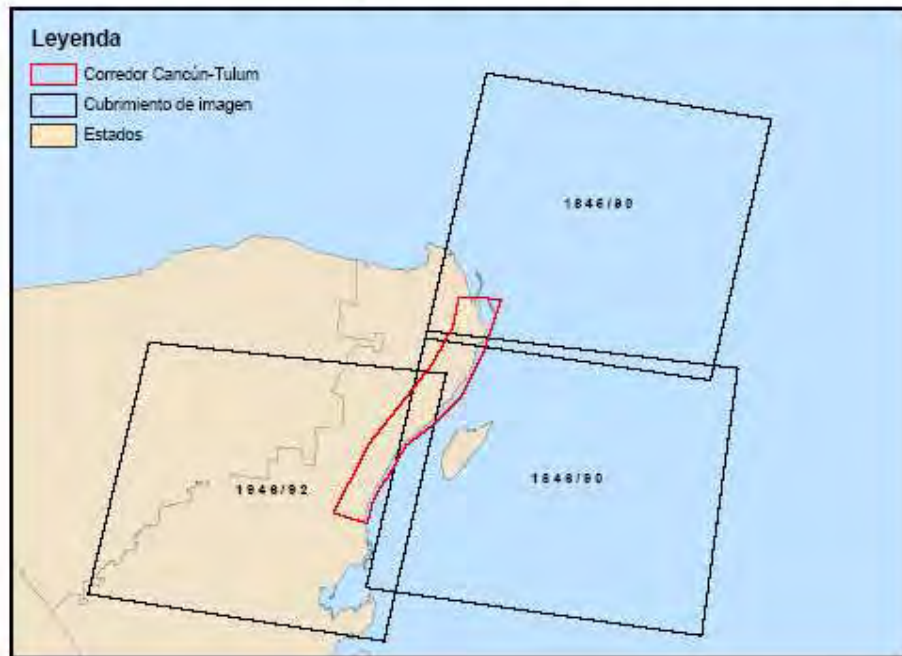


Figura 14. Cubrimiento de imágenes Landsat MSS para el Corredor Cancún-Tulum

### Cubrimiento de imágenes de satélite para la fecha 4

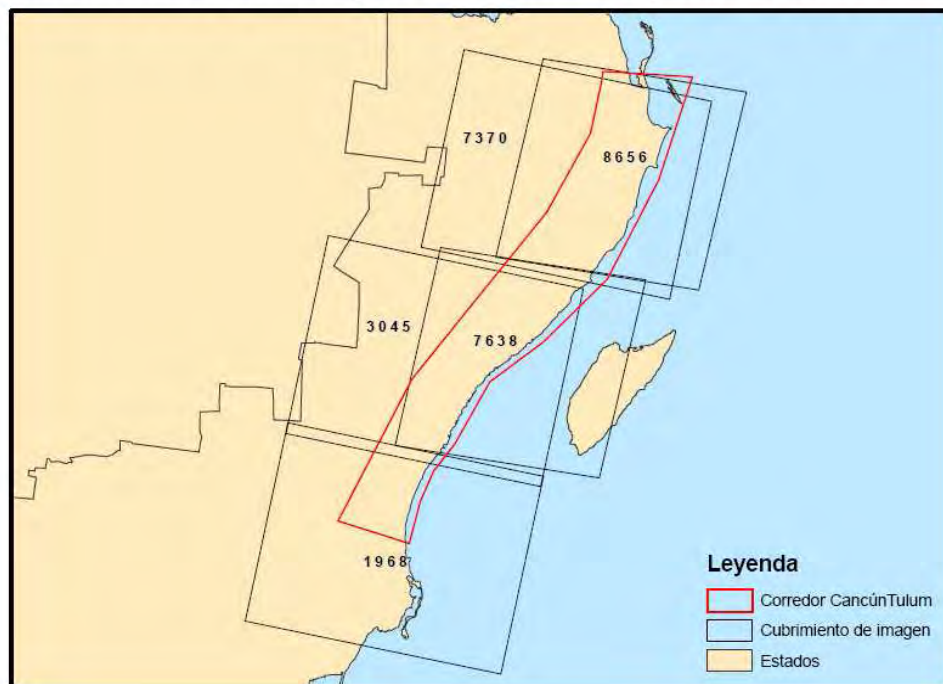


Figura 15. Cubrimiento de imágenes Spot para el Corredor Cancún-Tulum

1. Se estableció la leyenda para los mapas temáticos y la clasificación de los tipos de vegetación de interés, retomando el sistema de clasificación de INEGI que a su vez, se basa en la categorización de la vegetación de Miranda y Hernández X. y de Rzedowski.

1. (a) Asimismo, con un mosaico de imágenes Landsat, se digitalizó el polígono del Corredor Turístico Cancún-Tulum. Aunque se amplió hacia la parte norte abarcando la ciudad de Cancún hasta Punta Sam debido a que se observó que esta área ha presentado cambios de uso de suelo muy importantes en poco tiempo.

1. (b) Se llevó a cabo una selección de imágenes de satélite en las cuatro fechas que se iban a ocupar para el análisis, esto dependió de la cobertura de la imagen, la fecha y sobre todo el porcentaje de la cobertura de nubes en el área de estudio (ver las figuras anteriores).

2. Se georreferenciaron tres imágenes satelitales debido a que mostraban un desplazamiento con respecto a las demás imágenes empleadas. Asimismo, se le introdujeron 40 puntos de control a las imágenes, y posteriormente se remuestrearon para que tuviera una correcta posición usando el algoritmo del vecino más cercano.

3. Se generaron y seleccionaron compuestos de falso color para emplearlos durante la fase de entrenamiento, visualización, recorridos de campo, etc.

4. Una vez seleccionados los compuestos a utilizar, se establecieron sitios de entrenamiento empleando el programa ERDAS Imagine versión 8.9. Estos sitios de entrenamiento se realizaron para cada una de las clases encontradas en el área de estudio usando como referencia la cartografía de la Serie I, 2 y 3 de INEGI, los mapas de edafología, geología y fotografías aéreas. Cada insumo se empleó como “verdad de campo” para realizar las clasificaciones de las imágenes correspondientes, en mayor o menor medida, a las fechas de publicación de dichos insumos. Los sitios se generaron con ayuda de un método semi-automático llamado “píxel semilla”; este método toma los píxeles vecinos de características espectrales similares al del píxel semilla para evitar

introducir error en el sitio de entrenamiento y tener una muestra más pura. La tolerancia del píxel semilla que se utilizó estuvo en función de que visualmente, no se expandiera fuera de los límites del área del tipo de vegetación bajo muestra.

5. Se emplearon como complemento para incrementar la certidumbre de los sitios de entrenamiento y reconocimiento del manglar, las fotografías aéreas correspondientes a las fechas reportadas en el apartado de materiales. A partir de su foto-interpretación se pudieron identificar con mayor detalles áreas que en los compuestos utilizados no eran tan claras (el cubrimiento de dichas fotografías sólo abarcó una parte del área de estudio).

6. Al finalizar la obtención de los sitios de entrenamiento se generaron las clases espectrales de cada uno de los sitios. Con ayuda del diagrama de respuesta espectral y el histograma de frecuencia se identificaron las bandas en las que se encontraban reflejando más los tipos de vegetación y así identificar cuáles eran las clases donde había problemas de separabilidad.

7. Una vez realizado lo anterior, se clasificaron las imágenes (sólo el área dentro del polígono de la zona de estudio) empleando el algoritmo de máxima probabilidad.

8. Al tener las imágenes clasificadas, se compararon con las imágenes originales y se notó que había confusión entre clases, así que se eliminaron las clases donde se presentaba confusión, lo que orilló a realizar nuevos sitios de entrenamiento para registrar la mayor variabilidad espectral posible de las clases confusas; una vez incrementado el número de muestras, se corrió nuevamente la clasificación.

9. Después de tener todas las imágenes clasificadas de las cuatro fechas se reclasificaron (agrupamiento de clases) algunas clases, aplicándoseles también un filtro de mayoría, con una matriz de 5x5, para "limpiar" la clasificación y eliminar píxeles que se encontraban aislados; esto también con la finalidad de disminuir la fragmentación y atomización al visualizar a las clasificaciones y

también con fines “cosméticos” para la salida final de cada producto cartográfico.

10. Debido a que se clasificaron las diferentes escenas de manera individual, el paso previo antes de la evaluación de su certidumbre se elaboraron 4 diferentes mosaicos.

11. Teniendo los mosaicos ya terminados se importan de un formato raster (Grid) a un formato .img para posteriormente realizar los análisis de cambios del área de estudio con los programas Ilwis e Idrisi Andes.

### **4.3 Evaluación de la exactitud de las clasificaciones**

Para verificar la exactitud de las imágenes clasificadas se empleó la matriz de confusión, para ello se realizó una rejilla cada 7000 m cubriendo el polígono del área de estudio y como resultado se obtuvieron 70 puntos de verificación para cada una de las cuatro fechas, posteriormente se etiquetaron esos puntos con base a la Serie 1, Serie 2, Serie 3 de INEGI y trabajo de campo.

#### **4.3.1 Verificación para la fecha 1**

Teniendo la rejilla se verificó el mapa temático con cada uno de los puntos de la Serie 1 de INEGI, al mismo tiempo que se construía la matriz de confusión y así conocer la exactitud de la fecha uno.

#### **4.3.2 Verificación para la fecha 2**

La fecha 2 se comparó con la Serie 1 de INEGI con cada uno de los puntos obtenidos de la rejilla, al mismo tiempo que se construía la matriz de confusión y así conocer la exactitud de la fecha dos.

### **4.3.3 Verificación para la fecha 3**

La fecha 3 se verificó con la Serie 2 de INEGI con cada uno de los puntos obtenidos de la rejilla, al mismo tiempo que se construía la matriz de confusión y así conocer la exactitud de la fecha tres.

Asimismo, para esta fecha se realizó una fotointerpretación de las fotografías aéreas que se menciona en el apartado de materiales, de la cual se obtuvieron 34 puntos de verificación para el manglar específicamente.

### **4.3.4 Verificación para la fecha 4**

La verificación de la última fecha del análisis se llevó a cabo con trabajo de campo del 12 al 18, 19 y 24 de noviembre del 2007 además se verificó con la Serie 3 de INEGI. Los sitios de verificación se eligieron principalmente en áreas con manglar, sin quitarles importancia a los demás tipos de vegetación. Además se visitaron las áreas de confusión así como las zonas donde se había cartografiado como clase desconocida.

El trabajo en campo consistió en tomar la posición con ayuda de un geoposicionador (GPS Garmin Plus III), una *Pocket PC Navman*, la toma de fotografías y con una descripción sobre el tipo de vegetación de cada sitio. En total se obtuvieron 205 puntos de verificación de las coberturas presentes en el área de estudio.

Una vez obtenidos los puntos, se transfirieron a la PC para visualizarlos en el SIG, posteriormente se calculó la matriz de confusión.

Al ser evaluados los mapas temáticos y conseguir y aceptar el nivel de exactitud, se pasó al siguiente paso.

## **4.4 Análisis de cambios de uso de suelo y vegetación**



Para llevar a cabo el análisis de cambios, en el período de 1972-2006, se utilizó el procedimiento propuesto por Bocco *et al.* (2001), que consiste en tres pasos principales: 1) interpretación y detección digital de los cambios, 2) análisis de los patrones de cambio de cobertura y uso de suelo y 3) análisis de la causalidad del cambio de uso.

1) Para cubrir esta parte del análisis se requiere que todos los mosaicos tengan el mismo sistema de coordenadas, la misma área de cubrimiento y la misma resolución espacial.

Debido a que se trabajó con diferentes sensores y resoluciones (diferentes imágenes) se tuvieron que homogeneizar sus propiedades geométricas, en especial, la resolución espacial, por lo que se remuestrearon a una misma resolución para las cuatro fechas. Al tener las cuatro fechas en una misma resolución se valoraron cualitativamente y cuantitativamente cada uno de los tipos de vegetación presentes en el área de estudio.

Puesto que en la primera fecha no se contó con el cubrimiento total de las imágenes de satélite de todo el Corredor Turístico Cancún-Tulum, como consecuencia, las otras tres fechas se cortaron en base a la primera para contar con superficies iguales y así evaluar los cambios.

Debido a la confusión espectral detectada, se decidió realizar una interpretación visual para minimizar el error en las clasificaciones realizando máscaras de los asentamientos humanos, nubes y mina, a fin de contrarrestar el error que existe en la fecha 2 donde hay una confusión espectral de asentamientos con la vegetación de dunas y en 2006 la mina se confunde con asentamientos humanos. Teniendo esto, se efectuó una limpieza del mosaico de los 80's y 2006 con respecto a los asentamientos humanos y mina empleando un SIG, para así, a través de comandos que operan bajo lógica booleana, identificar las áreas más dinámicas.

Finalizado el proceso anterior, se realizaron los cruces de las 4 fechas diferentes, se comparó la fecha de los 70's con 80's, 80's con 90's, 90's con

2006 y 70's con 2006, generando una tabla de pérdida (km<sup>2</sup>) para cada uno de los cruces y clases.

2) Después se realizó una matriz de cambios con las tablas generadas. Asimismo, se generó una tabla de transición o tendencias, suponiéndose que la probabilidad de transición (P<sub>ij</sub>) de cada clase de la matriz es proporcional a la superficie remanente de la misma clase entre los años de análisis.

Su ecuación es:

$$P_{ij} = S_{ij}(t_2)/S_j(t_1)$$

donde:

S<sub>ij</sub> es la superficie del elemento

ij de la matriz de transición de uso de suelo en el t<sub>2</sub>

S<sub>j</sub> la superficie de la clase de cobertura/uso del suelo "j" en el t<sub>1</sub>

3) Para conocer las causas del cambio de uso de suelo en el área de estudio se utilizó la cartografía auxiliar, bibliografía y el trabajo de campo.

#### 4.5 Estimación de la tasa de pérdida del manglar

Para obtener la tasa de pérdida del manglar en el Corredor Cancún-Tulum, se calculó en base a los totales de superficie (Km<sup>2</sup>) de la siguiente manera:

$$\delta_n = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

donde  $\delta$  es la tasa de cambio (para expresar en % hay que multiplicar por 100)

S<sub>1</sub> superficie en la fecha 1

S<sub>2</sub> superficie en la fecha 2

n es el número de años entre las dos fechas (Velázquez *et al.*, 2002)

1) Se restó la superficie de F<sub>1</sub> con F<sub>2</sub>, F<sub>2</sub> con F<sub>3</sub> y F<sub>3</sub> con F<sub>4</sub>.

Donde:

F<sub>1</sub> = Fecha uno 1972

$F_2$  = Fecha dos, 1988

$F_3$  = Fecha tres, 1990

$F_4$  = Fecha cuatro, 2006

2) Los resultados obtenidos se dividieron entre el número de años, así teniendo la tasa de pérdida por década.

3) Teniendo las tasas se sacó el promedio de las tasas anuales obteniendo la tasa de pérdida para el período global de años de análisis.

# Capítulo 5. Resultados y discusión

## 5.1 Método supervisado y validación de la exactitud

Como resultado se obtuvieron las siguientes clases: cuerpos de agua (Agua), asentamientos humanos (AsenHum), vegetación de dunas costeras (Dunas), manglar, pastizal cultivado, popal-tular (Popal), selva baja, selva mediana, sin vegetación aparente (Sinveg) y mina. Para todas las fechas las nubes y las sombras se agruparon en una sola clase llamándose sin información.

### 5.1.1 Fecha uno (1972)

Al llevarse a cabo la clasificación supervisada en las imágenes de la fecha uno, al igual que las otras fechas, se encontraron varios problemas en la discriminación del manglar con aquellas coberturas donde se proyectaba la sombra de las nubes, sobretodo en el área del borde de éstas; de esta manera, al “correr” la clasificación, muchas de estas áreas al borde de las sombras se clasificaron como manglares, sobreestimando así la superficie real presente en el área de estudio.

La forma de compensar este problema fue seleccionando (e incrementando) más sitios de entrenamiento tanto de manglar como de las sombras para “limpiar” la clasificación, aunque persistió el problema.

El resultado de la clasificación supervisada se muestra en el mapa 2 donde se puede apreciar los tipos de vegetación y uso de suelo existentes en los años 70's en el Corredor Cancún-Tulum.

Para esta fecha en la zona de estudio la superficie de cuerpos de agua (incluyen cuerpos de agua continentales y el mar) fue de 509 km<sup>2</sup>, la de asentamientos humanos fue de 7 km<sup>2</sup>, la cobertura de vegetación de dunas costeras de 7 km<sup>2</sup>, para manglar de 165 km<sup>2</sup>, de pastizal cultivado se reportó 161 km<sup>2</sup>, de popal-tular fue de 111 km<sup>2</sup>, de

selva baja 128 km<sup>2</sup>, selva mediana 1936 km<sup>2</sup>, las superficies “sin vegetación aparente” y “mina” no se reportaron para esta fecha (Fig. 16).

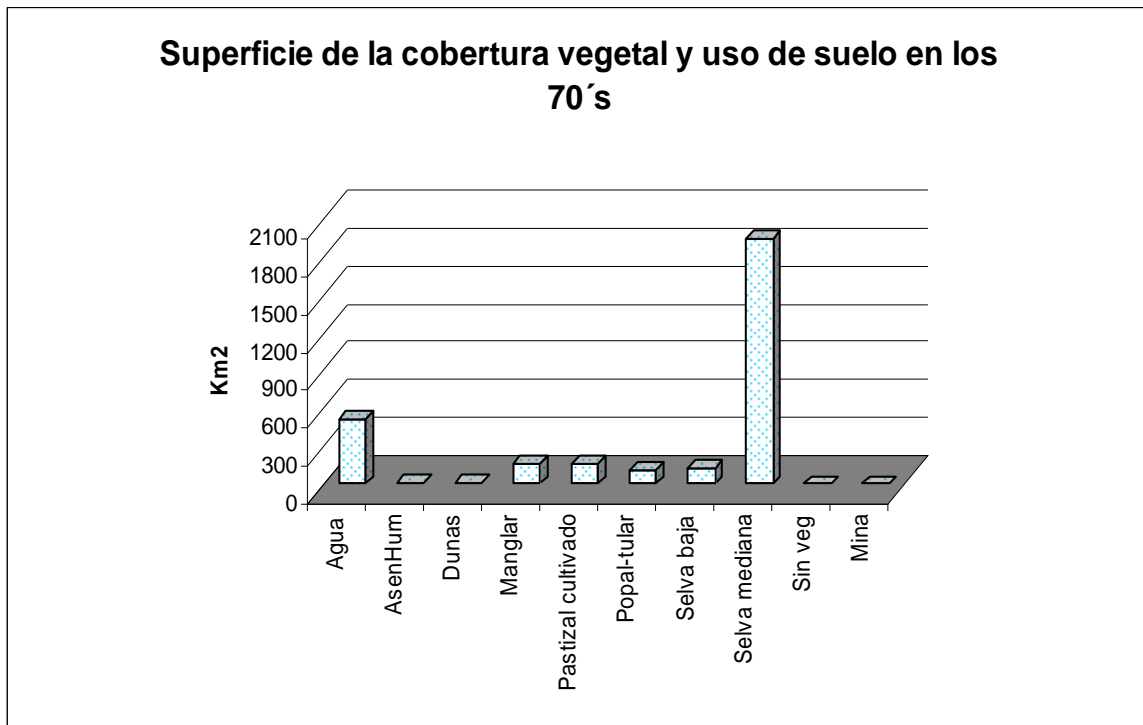


Figura 16. Superficie de la cobertura vegetal y uso de suelo en los años 70's en el área de estudio

Al tener el mapa temático se evaluó su exactitud a través de una matriz de confusión y se tomó como verdad de campo la Serie 1 generada por INEGI, resultando una exactitud total de 76 % (tabla 9).

Mapa 2. Cobertura vegetal y uso de suelo en los años 70's en el Corredor Cancún-Tulum

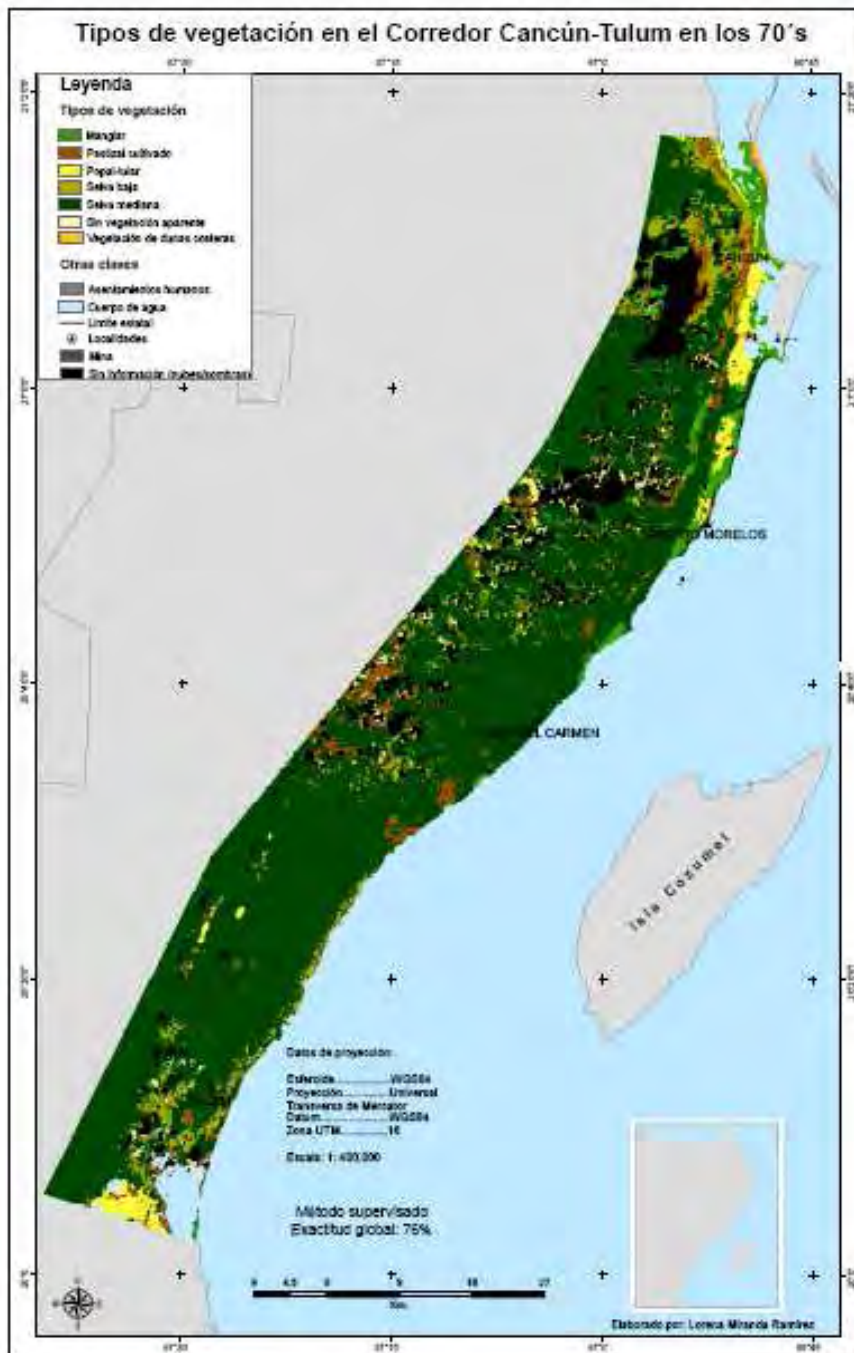


Tabla 9. Matriz de confusión de los 70's

				C	L	A	S	E	S								
		AsenHum	Agua	Manglar	Nubes	Pastizal	Popal	Selva mediana	Selva baja	Sombras	Dunas	Total	Error de omisión	Exactitud del producto			
R	AsenHum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	Agua	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	100		
F	Manglar	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	5	40	60			
E	Nubes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
E	Pastizal	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	100			
N	Popal	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	100			
C	Selva mediana	0	0	2	1	0	4	36	4	1	0	48	25	75			
I	Selva baja	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	100			
A	Sombras	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Dunas	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100	0			
	<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>36</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>68</b>	<b>SUMA TOTAL</b>				
	<b>Error de comisión</b>	100	15	40	100	0	80	0	80	100	0	68	total columnas				
	<b>Exactitud del usuario</b>	0	85	60	0	100	20	100	80	0	0	68	total renglones				
												76	<b>Exactitud total</b>				

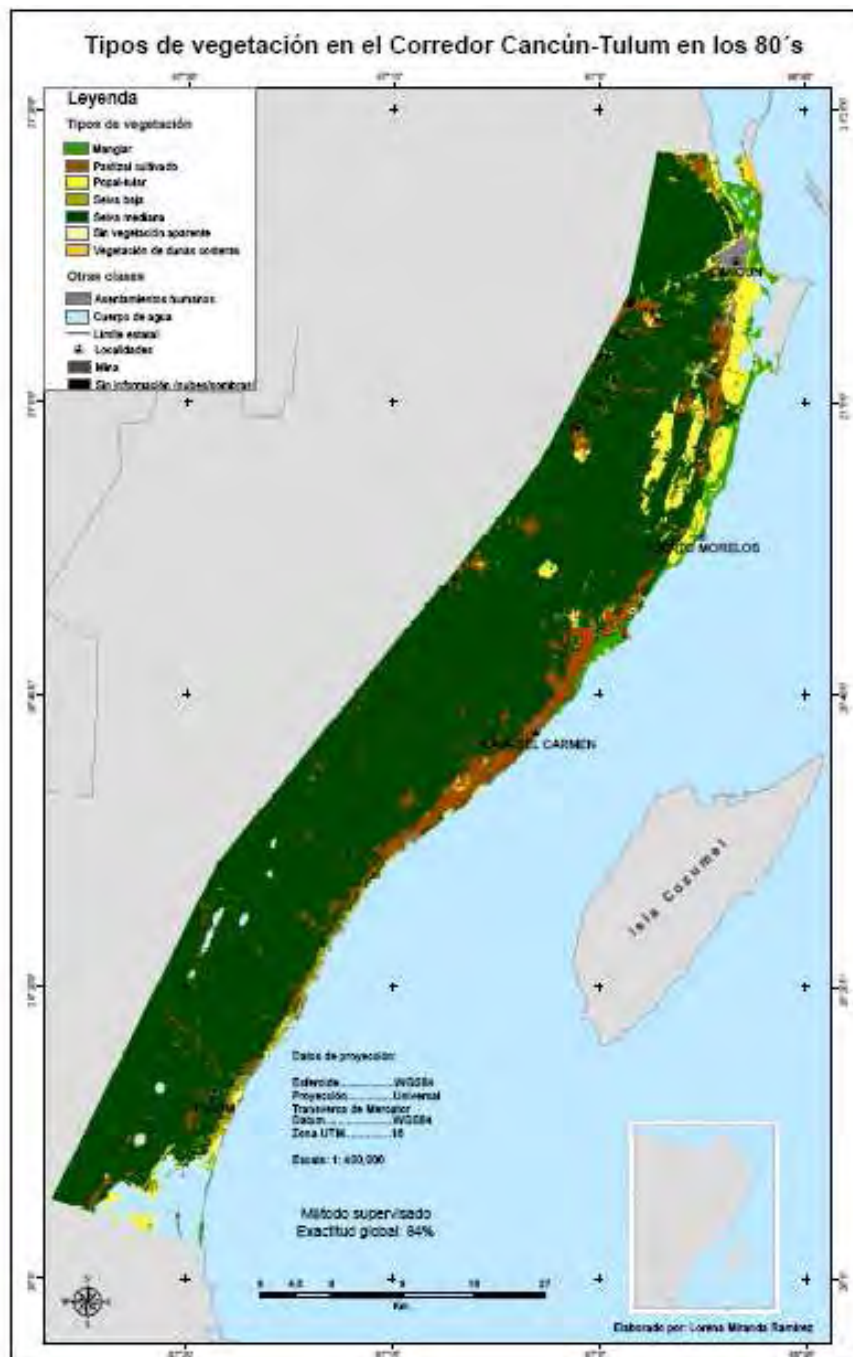
### 5.1.2 Fecha dos (1988)

Para esta fecha, se presentó una confusión espectral entre las nubes y el manglar debido a que las primeras eran muy delgadas y no proyectaban mucha sombra (oscurecimiento total de la superficie), por lo que la reflectividad de esa área se alteraba, causando que el algoritmo lo clasificara como manglar. Estas áreas con sombras correspondían en su mayoría a la vegetación de selva mediana.

El resultado de la clasificación supervisada se muestra en el mapa 3 donde se puede apreciar los tipos de vegetación y uso de suelo existentes en los años 80's (1988) en el Corredor Cancún-Tulum.

Para los años 80's en el Corredor Cancún-Tulum la superficie de cuerpos de agua (se cuantificaron los cuerpos de agua continentales y el mar) fue de 549 km<sup>2</sup>, de asentamientos humanos de 32 km<sup>2</sup>, de vegetación de dunas costeras de 11 km<sup>2</sup> para manglar de 79 km<sup>2</sup>, de pastizal cultivado se reportó 211 km<sup>2</sup>, de popal-tular fue de 164 km<sup>2</sup>, de selva baja 33 km<sup>2</sup>, selva mediana 2256 km<sup>2</sup>, la superficie "sin vegetación aparente" 6 km<sup>2</sup> y "mina" con 1 km<sup>2</sup> (Fig. 17).

Mapa 3. Cobertura vegetal y uso de suelo en los años 80's en el Corredor Cancún-Tulum





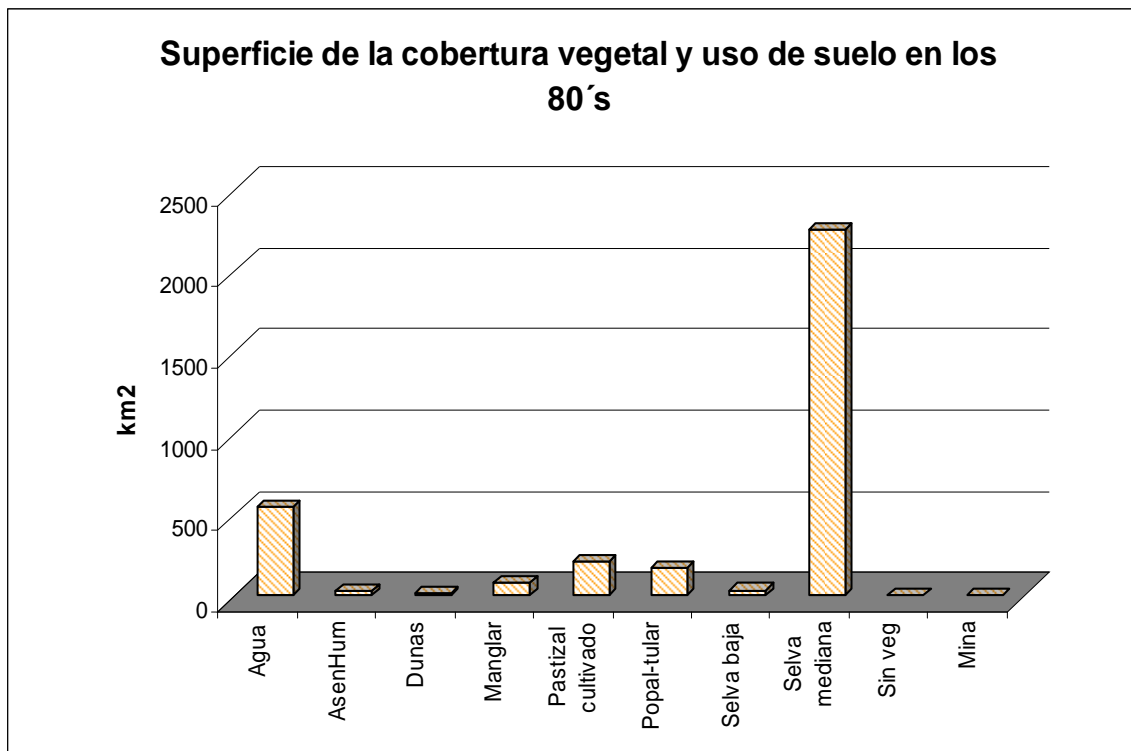


Figura 17. Superficie de la cobertura vegetal y uso de suelo en los años 80's en el área de estudio

Al tener el mapa temático se evaluó su exactitud a través de una matriz de confusión y se tomó como verdad de campo la Serie 1 generada por INEGI, resultando una exactitud total de 84 % (tabla10).

Tabla 10. Matriz de confusión de los 80's

		C	L	A	S	E	S											Exactitud del producto
		AsenHum	Agua	Manglar	Nube	Pastizal	Popal	Selva mediana	Selva baja	Sin vegetación	Sombra	Dunas	Total	Error de omisión				
<b>R</b>																		
<b>E</b>	AsenHum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>F</b>	Agua	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	100
<b>E</b>	Manglar	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	60	40		
<b>E</b>	Nube	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>N</b>	Pastizal	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	100		
<b>C</b>	Popal	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	100		
<b>I</b>	Selva mediana	1	0	0	0	2	2	43	0	0	0	0	0	48	10	90		
<b>A</b>	Selva baja	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	100		
	Sin vegetación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sombra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dunas	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100	0		
	<b>Total</b>	1	14	3	0	3	3	44	0	0	0	0	68					<b>SUMA TOTAL</b>
	<b>Error de comisión</b>	100	21	33	0	67	67	2	0	0	0	0	68					total columnas
	<b>Exactitud del usuario</b>	0	79	67	100	33	33	98	100	100	100	100	68					total renglones
																		<b>85 Exactitud total</b>

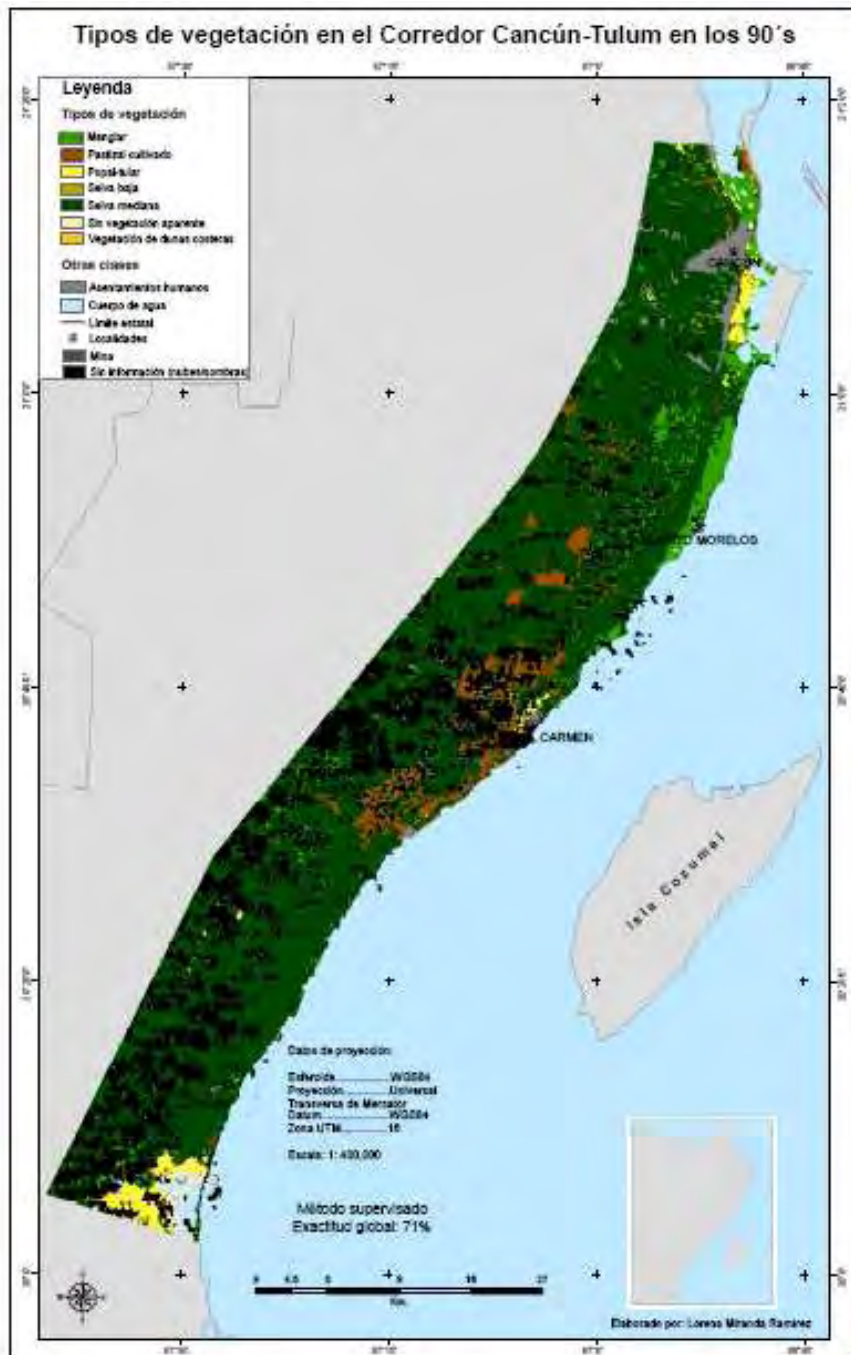
### **5.1.3 Fecha tres (1990)**

Debido a que las imágenes son de diferente sensor y fecha, algunas de ellas tenían errores de origen tales como el bandeo; por esto, algunas clases no fueron bien clasificadas, como el caso de la selva baja y la selva mediana.

Por otro lado, en algunas imágenes ya no se apreciaba vegetación o las áreas de muestra eran muy pequeñas para obtener sitios de entrenamiento representativos; esto a causa de las condiciones meteorológicas (huracán “Gilberto”) que existieron antes de la adquisición de la imagen o por causas antropogénicas (degradación inducida de este tipo de vegetación).

El resultado de la clasificación supervisada se muestra en el mapa 4 donde se puede apreciar los tipos de vegetación y uso de suelo existentes en los años 90’s (1990) en el Corredor Cancún-Tulum.

Mapa 4. Cobertura vegetal y uso de suelo en los años 90's en el Corredor Cancún-Tulum



Para los años 90's en el Corredor Cancún-Tulum la superficie de cuerpos de agua (se cuantificaron los cuerpos de agua continentales y el mar) fue de 452 km<sup>2</sup>, de asentamientos humanos de 79 km<sup>2</sup>, de vegetación de dunas costeras de 2 km<sup>2</sup>, para manglar de 158 km<sup>2</sup>, de pastizal cultivado se reportó 132 km<sup>2</sup>, de popal-tular fue de 63 km<sup>2</sup>, de selva baja no se reportó para esta fecha; la selva mediana 1713 km<sup>2</sup>, la superficie "sin vegetación aparente" 12 km<sup>2</sup> y la clase mina mantuvo su superficie de 1 km<sup>2</sup> (Fig. 18).

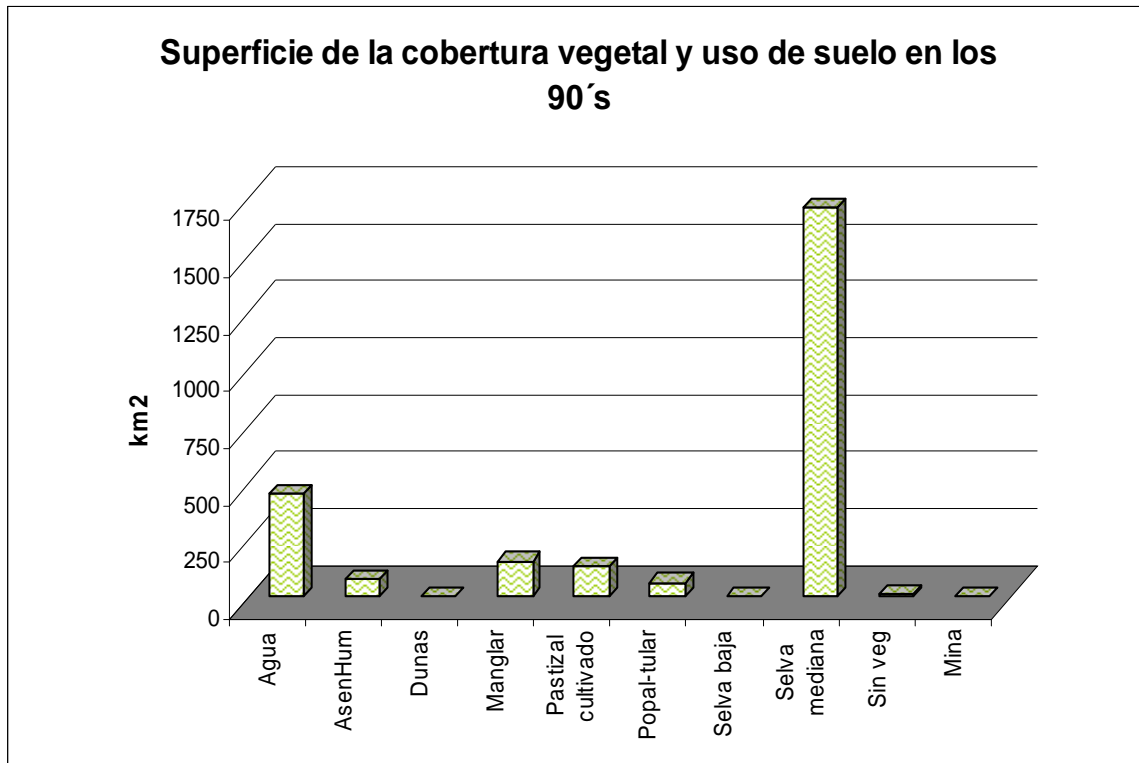


Figura 18. Superficie de la cobertura vegetal y uso de suelo en los años 90's en el área de estudio

Al tener el mapa temático se evaluó su exactitud a través de una matriz de confusión y se tomó como verdad de campo de acuerdo al método (única fuente de información disponible) la Serie 2 generada por INEGI (1994), resultando una exactitud total de 71 % (tabla 11).

Tabla 11. Matriz de confusión de los 90's

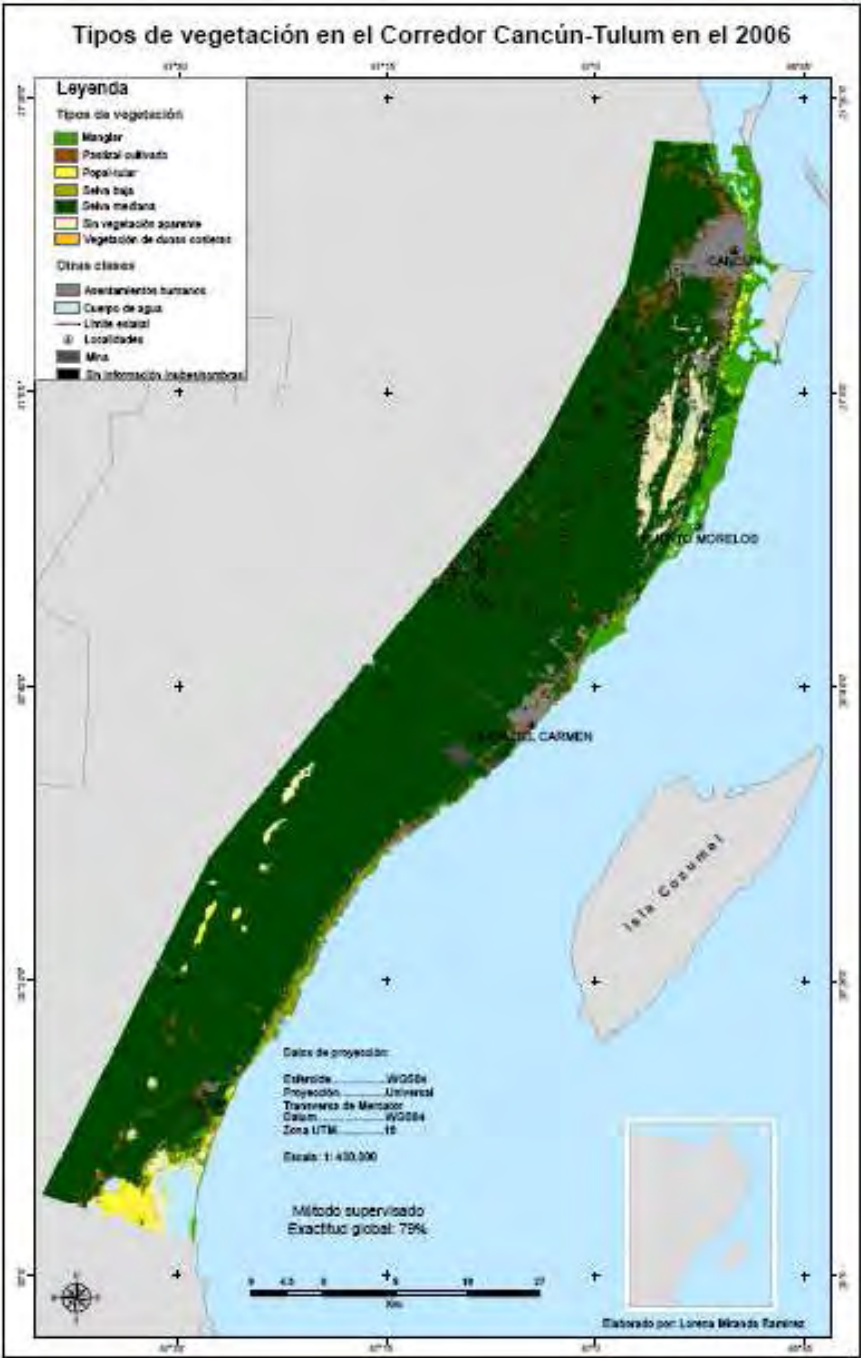
				C	L	A	S	E	S						
		AsenHum	Agua	Manglar	Nube	Pastizal	Popal	Selva mediana	Sin vegetación	Sombra	Dunas	Total	Error de omisión	Exactitud del producto	
R															
E	AsenHum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F	Agua	0	12	0	1	0	0	0	0	0	0	13	8	92	
E	Manglar	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	100	
R	Nube	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
E	Nastizal	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	100	
N	Popal	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	100	
C	Selva mediana	0	0	0	9	3	1	34	0	4	0	51	33	67	
I	Sin vegetación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
A	Sombra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Dunas	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	100	
	<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>68</b>	<b>SUMA TOTAL</b>		
	<b>Error de omisión</b>	0	0	0	100	100	50	3	0	100	0	68	total columnas		
	<b>Exactitud del producto</b>	0	100	100	0	0	50	97	0	0	0	68	total renglones		
												71	<b>Exactitud total</b>		

#### 5.1.4 Fecha cuatro (2006)

Para esta fecha, también hubo problemas de confusión espectral entre las clases de asentamientos humanos y de la vegetación de dunas costeras, ya que las construcciones están elaboradas con el mismo material que se encuentra *in situ* por lo que se llegan a confundir en cuanto a su respuesta espectral. Asimismo, en algunas imágenes, los asentamientos se confundían con las nubes.

El resultado de la clasificación supervisada se muestra en el mapa 5 donde se puede apreciar los tipos de vegetación y uso de suelo existentes en el año 2006 en el Corredor Cancún-Tulum. Además en el mapa anexo se puede ver la distribución actual del manglar en el área de estudio.

Mapa 5. Cobertura vegetal y uso de suelo en el año 2006 en el Corredor Cancún-Tulum



Para el año 2006 en el Corredor Cancún-Tulum la superficie de cuerpos de agua (se cuantificaron los cuerpos de agua continentales y el mar) fue de 512 km<sup>2</sup>, de asentamientos humanos de 145 km<sup>2</sup>, de vegetación de dunas costeras de 11 km<sup>2</sup>, para manglar de 140 km<sup>2</sup>, de pastizal cultivado se reportó 82 km<sup>2</sup>, de popal-tular fue de 66 km<sup>2</sup>, de selva baja de 32 km<sup>2</sup>, selva mediana 2221 km<sup>2</sup>, la superficie “sin vegetación aparente” 80 km<sup>2</sup> y la clase mina con 7 km<sup>2</sup> (Fig. 19).

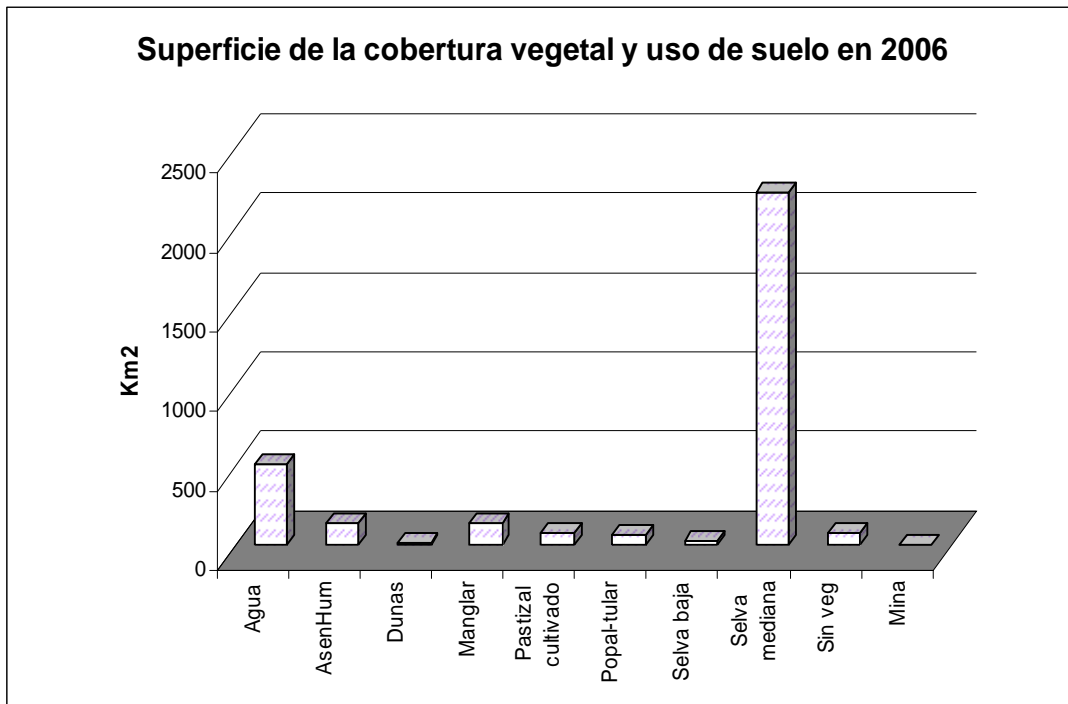


Figura 19. Superficie de la cobertura vegetal y uso de suelo en el año 2006 en el área de estudio

Para esta fecha (2006) se realizó dos validaciones, una con la Serie 3 (INEGI, 2004) en la cual se obtuvo un 90% y la otra con el trabajo de campo con un 79% (tabla 12). Posteriormente, se calculó el error de exactitud de cada una de las clases para las fechas bajo análisis.

Tabla 12. Matriz de confusión del 2006

		C	L	A	S	E	S								Exactitud del producto	
		AsenHum	Agua	Manglar	Mina	Nube	Pastizal	Popal	Selva baja	Selva mediana	Sin vegetación	Sombra	Dunas	Total	Error de omisión	
<b>R</b>																
<b>E</b>	AsenHum	16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	17	6	94
<b>F</b>	Agua	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	100
<b>E</b>	Manglar	7	0	65	0	0	0	0	1	5	0	0	4	82	12	79
<b>R</b>	Mina	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	40	60
<b>E</b>	Nube	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
<b>N</b>	Pastizal	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	0	6	17	83
<b>C</b>	Popal	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	100	0
<b>I</b>	Selva baja	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	100
<b>A</b>	Selva mediana	2	0	0	0	0	10	0	1	27	0	0	0	40	33	68
	Sin vegetación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sombra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dunas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	100	0
	<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>15</b>	<b>65</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>33</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>171</b>	<b>SUMA TOTAL</b>	
	<b>Error de omisión</b>	43	0	0	0	0	67	0	75	18	100	0	57	171	total columnas	
	<b>Exactitud del producto</b>	57	100	100	100	0	33	0	25	82	0	0	43	171	total renglones	
														<b>79</b>	<b>Exactitud total</b>	

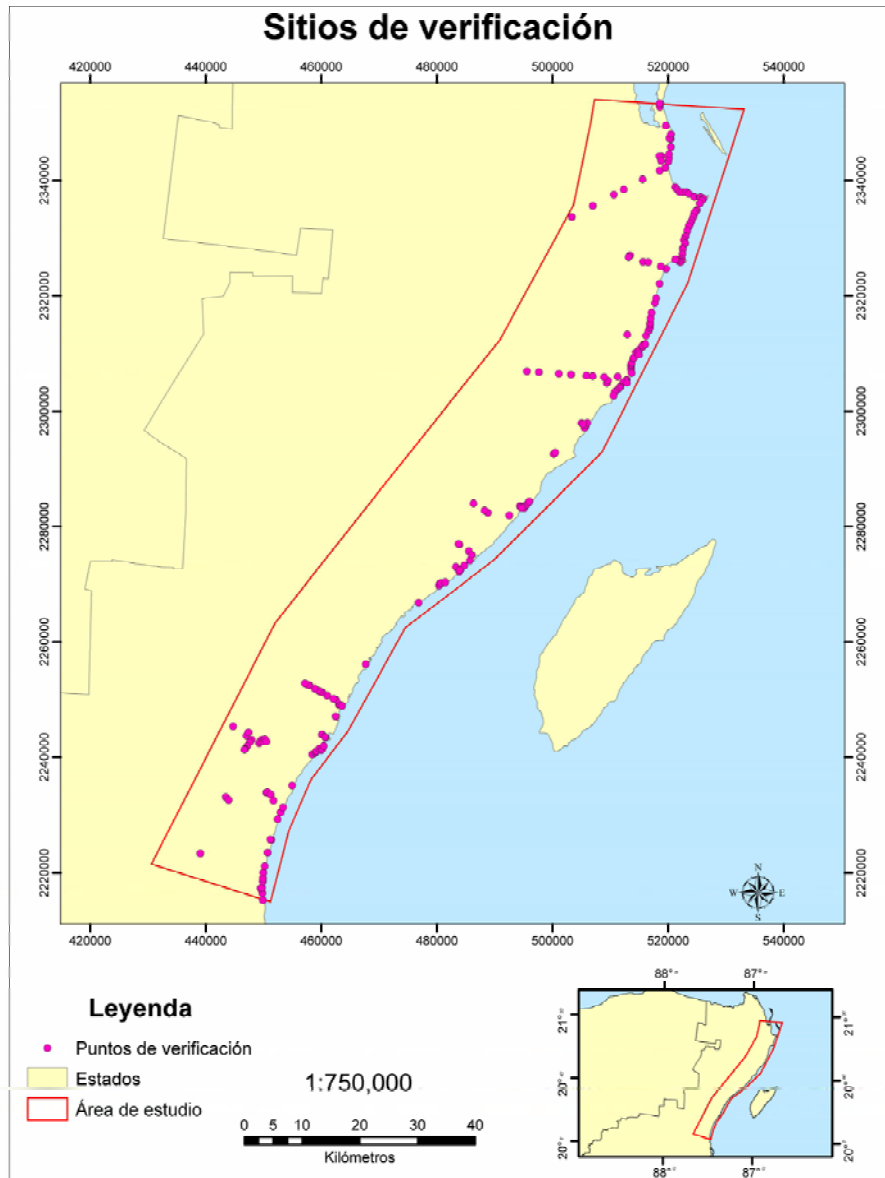
## 5.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo para los siguientes fines: 1) la validación del último mapa interpretado, 2) tener un conocimiento de las clases que se clasificaron como desconocidas y asignarles un nombre y 3) mayor conocimiento del área de estudio (mapa 6).

El total de sitios de verificación levantados en campo fueron 205 puntos. Pero en el trabajo se tuvieron algunas limitantes en cuanto a la accesibilidad, tales como el personal que permitía el acceso, ya no había camino; y el tiempo. Además se realizaron observaciones del grado de degradación que existía en la zona. También se llevó cabo un recorrido en lancha con autoridades de CONANP (Puerto Morelos) de los sitios de manglar a los que no se podía llegar por tierra.



Mapa 6. Sitios de verificación del Corredor Cancún-Tulum



### 5.3 Análisis espacio-temporal en el SIG

Cuando se trata de realizar un análisis espacio-temporal de la cobertura vegetal y uso de suelo, no solamente basta con medir dónde y cuándo ocurren los cambios, si no que es necesario entender los elementos detrás de estos cambios (García *et al.*, 2005 tomado Lambin y Erlich, 1997) y sobre todo el contexto social en donde se llevan a cabo (García *et al.*, 2005 tomado Ojima *et*

al., 1994), por lo tanto, para este trabajo se tomó en cuenta que los cambios que se presentan en el área de estudio en su mayoría se deben a cuestiones antropogénicas, por lo que, es importante conocer las causas detrás de éstos.

Como se indica en el apartado metodológico, en este análisis se tomaron cuatro fechas 70's, 80's, 90's y 2006, para conocer qué tanto se había transformado las coberturas (selva mediana, selva baja, popal-tular, vegetación de dunas costeras, sin vegetación aparente, pastizal cultivado) de vegetación, en especial el manglar, al igual que los usos/coberturas del terreno en este período de 36 años.

### 5.3.1 Cambios de los 70's a 80's

Los cambios en el área de estudio partiendo de la fecha de los 70's a los 80's se presentan algunas clases más "limpias", es decir, existe una mayor superficie que no está cubierta por la presencia de nubes y sombras. De manera general, la dinámica de todas las transiciones para cada clase se muestra resumida en la matriz de transición (tabla 13). En la matriz de transición las columnas representan la superficie de las clases en los 70's, mientras los renglones los 80's, por ejemplo, la superficie de cuerpo de agua para los 70's fue de 509 km<sup>2</sup>, para los 80's fue de 549 km<sup>2</sup>, incrementándose en 40 km<sup>2</sup>, mientras la superficie que se mantuvo (especialmente integra) para este período fue de 432 km<sup>2</sup>. En este sentido se lee el resto de la tabla.

Tabla 13. Matriz de transición de los 70's a 80's en km<sup>2</sup>

		70'S											Total	
		ND	Agua	AsenHum	Dunas	Manglar	Nubes	Pastizal	Popal	Selva baja	Selva mediana	Sombras		
80'S	ND	10817	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10818
	Agua	0	482	0	0	7	2	11	23	2	20	1	549	
	AsenHum	0	1	1	1	2	0	7	1	8	10	1	32	
	Dunas	0	1	1	4	1	0	1	0	1	2	0	11	
	Manglar	0	4	1	0	40	1	4	4	1	22	1	79	
	Nubes	0	1	0	0	1	1	1	0	0	8	1	13	
	Pastizal	0	0	1	0	7	5	27	2	7	157	6	211	
	Popal	0	3	2	0	32	6	15	46	8	45	6	164	
	Selva baja	0	0	0	0	1	1	3	0	14	12	0	33	
	Selva mediana	0	16	1	1	75	173	92	34	84	1651	130	2256	
	Sin vegetacion	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	6	
	Sombras	0	0	0	0	0	1	0	0	0	7	0	9	
	Mina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
	Total	10817	509	7	7	165	191	161	111	128	1936	148	14181	

Los cambios de los cuerpos de agua presentan un incremento del 40 km<sup>2</sup> en la superficie para este período, lo que puede deberse a que algunos tipos de vegetación fueron removidos ganando de esta forma superficie; también puede deberse a la presencia de ciertas condiciones meteorológicas presentes al momento de la adquisición de las imágenes de satélite tales como una gran cantidad de lluvia que colmató los espacios de los reservorios continentales.

Los asentamientos humanos han aumentado 25 km<sup>2</sup> sobre todo en algunos puntos turísticos como Cancún, Playa del Carmen y alrededores ocasionando la pérdida total de la vegetación. El incremento puede deberse a la atracción por la gran oferta de empleos que existe en la zona debido al turismo creciente hasta la fecha.

En la vegetación de dunas costeras hay un ligero incremento de 4 km<sup>2</sup>, esto quizá se explique por las condiciones de las imágenes de satélite (resolución espacial y espectral) empleadas en el análisis.

En el pastizal cultivado existe un aumento de 50 km<sup>2</sup> por las actividades agropecuarias llevadas a cabo en esas fechas (Villafuerte y García, 1997) así como por la "limpieza" de nubes y sombras lo que ocasionó un incremento, es decir, una mejor clasificación y cuantificación.

En el popal y tular para este período existe un incremento de 53 km<sup>2</sup> a causa de que el método de clasificación utilizado agregó la superficie del manglar a este tipo de vegetación, es decir, hubo confusión espectral entre estas dos clases. Por otro lado, pudo deberse también a las condiciones de las imágenes de satélite (presencia de nubes y sombras).

La selva baja presenta una disminución de 95 km<sup>2</sup> considerable en su superficie, posiblemente a causa de confusiones espectrales, es decir, se confundió la selva baja con la selva mediana principalmente.

La selva mediana presenta un incremento de 320 km<sup>2</sup> debido a la "limpieza" de nubes y sombras para este período, o sea, la cobertura de nubes y sombras

fue menor que la fecha de los 70's lo cual permitió cuantificar mejor a esta cobertura.

La clase "sin vegetación aparente" (6 km<sup>2</sup>) no se había detectado en la primera fecha y en la segunda puede deberse a condiciones meteorológicas (huracanes) o que en realidad se trata de vegetación muy dispersa, por lo que el método o la resolución espacial no es capaz de detectar la vegetación sino a la superficie de suelos adyacente.

Como el caso anterior, el área de la mina de caliza, para los 70's no se detectó, pero en los 80's apenas cubría una pequeña superficie de 1 km<sup>2</sup>, es decir, para la fecha de la imagen de los 70's el área de la mina no existía aún.

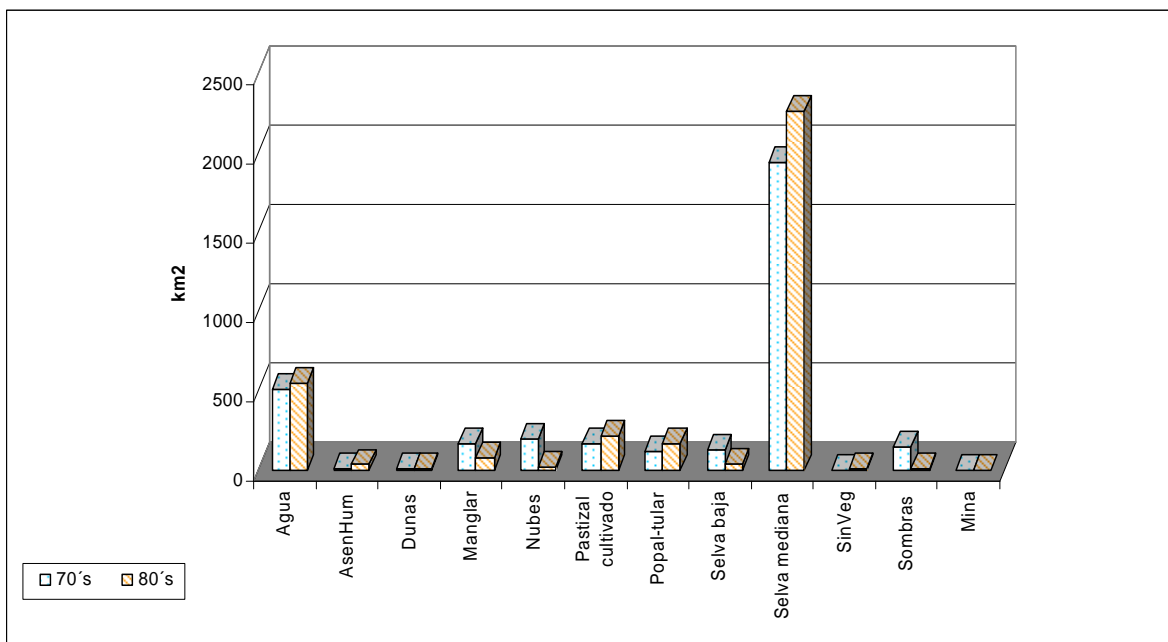


Figura 20. Cambios de uso de suelo de los 70's a los 80's

En la figura 20 se puede observar que la clase con mayor cambio en el Corredor Cancún-Tulum es la selva mediana, como ya se había mencionado debido a la "limpieza" de la cobertura de nubes y sombras; otro cambio se presentó en los cuerpos de agua, lo que se le puede atribuir al paso del huracán Gilberto (1988) y por último, el manglar presenta una disminución a causa de la fenología de la planta.

### 5.3.2 Cambios de los 80's a los 90's

Para el período de los 80's a 90's se presentó una mayor cobertura de nubes y sombras, por lo que, algunos tipos de vegetación se vieron afectados en su superficie. De manera general, la dinámica de todas las transiciones para cada clase se presenta resumida en la matriz de transición (tabla 14). Las columnas representan la superficie de las clases en los 80's, mientras los renglones los 90's.

Tabla 14. Matriz de transición de los 80's a 90's en km<sup>2</sup>

		80's													Total
90's	ND	Agua	AserHum	Dunas	Manglar	Nubes	Pastizal	Popal	SelvaBaja	SelvaMediana	Sinvegetacion	Sombras	Mra		
ND	10817	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10818	
Agua	1	443	0	1	4	0	0	2	0	0	0	0	0	452	
AserHum	0	2	19	5	2	1	8	8	3	30	1	0	0	79	
Dunas	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
Manglar	0	6	2	0	43	1	7	38	2	59	0	0	0	158	
Nubes	0	33	2	1	1	1	22	7	1	458	0	1	0	528	
Pastizal	0	2	1	1	1	0	23	7	1	95	1	0	0	132	
Popal	0	30	0	0	3	0	3	21	0	5	1	0	0	63	
SelvaMediana	0	12	8	1	23	9	138	74	25	1411	4	7	0	1713	
Sinvegetacion	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	
Sombras	0	8	0	0	1	0	11	5	0	196	0	0	0	223	
Mra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
Total	10818	549	32	11	79	13	211	164	33	2256	6	9	1	14181	

Como se aprecia en la matriz de cambio, los cuerpos de agua presentan una disminución de 97 km<sup>2</sup> que puede deberse a que algunos sitios fueron rellenados para alguna clase de construcción o vegetación.

Para este período los asentamientos humanos han aumentado a 47 km<sup>2</sup> a causa de la atracción por las fuentes de empleos que existen en la zona y el crecimiento de los asentamientos humanos propios de la actividad terciaria turística.

Mientras tanto, la vegetación de dunas costeras muestra una disminución considerable de 9 km<sup>2</sup> debido al paso de huracanes o a la baja resolución que tiene la imagen de satélite (ver la matriz de transición para mayor detalle).

En el pastizal cultivado existe una disminución de su superficie de 79 km<sup>2</sup> que puede explicarse por la gran cantidad de nubes y sombras que cubren esta

cobertura o que algunos pastizales se han transformado a otro tipo de vegetación secundaria.

El popal-tular tiene una disminución clara 101 km<sup>2</sup>, ya que la superficie que se le había agregado posiblemente correspondía al manglar, es decir, existe una confusión espectral entre esta clase y manglar (para más detalle ver la matriz de transición).

La selva baja para los 90's no se reportó por lo que no se sabe si hay una pérdida o ganancia de superficie. Esto se debe a que la información auxiliar (Serie 2 de INEGI) no obtuvo este tipo de vegetación.

La selva mediana presenta una disminución de 543 km<sup>2</sup> a causa de la gran cantidad de nubes y sombras pues se observa que las nubes ocupan una gran cantidad de esta cobertura.

La clase "sin vegetación aparente" tiene un incremento de 6 km<sup>2</sup> que se debe a las condiciones meteorológicas (paso de huracanes) o que se ha deteriorado la vegetación.

La mina se ha mantenido estable (1 km<sup>2</sup>) debido a que no se tenía contemplado la ampliación para este período (comunicación personal de las autoridades de la mina).

En la figura 21 los cambios más notables son la selva mediana que debido a la superficie de nubes presentes en el área de estudio para este período, como ya se había mencionado anteriormente la cobertura de nubes y sombras es mayor en la fecha de los 90's. Otro cambio fue el manglar que presentó un incremento y el popal-tular disminuyó.

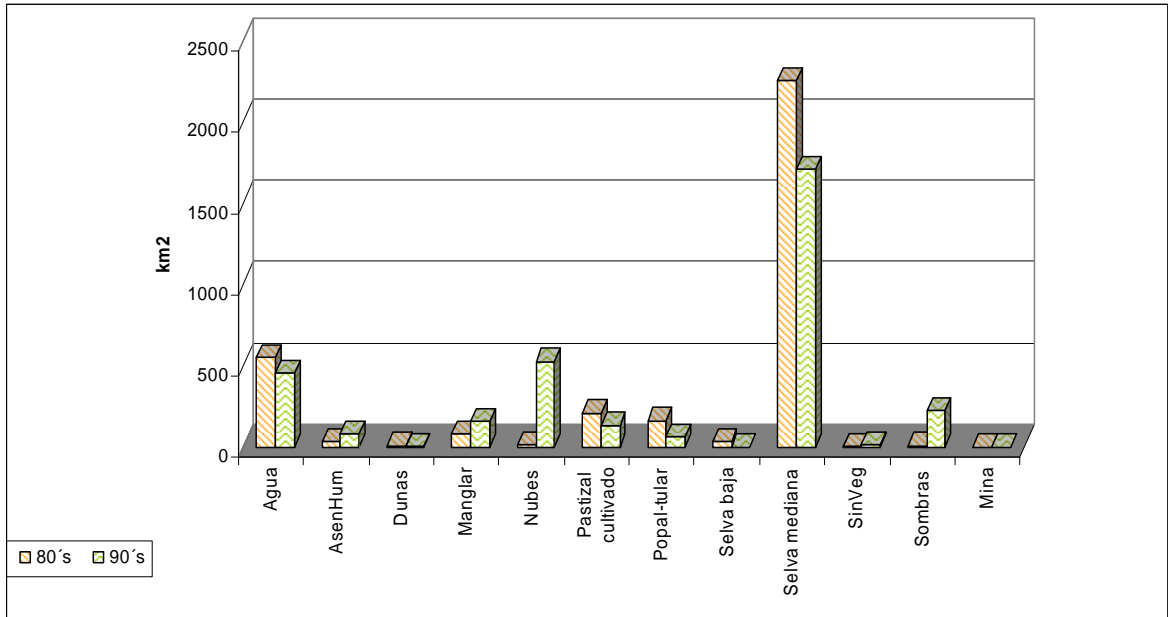


Figura 21. Cambios de uso de suelo de los 80's a los 90's

### 5.3.3 Cambios de los 90's al 2006

Para el período de los 90's al 2006 se presenta una cobertura de nubes y sombras menor por lo que algunas clases se observan más "limpias". De manera general, la dinámica de todas las transiciones para cada clase se presenta resumida en la matriz de transición (tabla 15). Las columnas representan la superficie de las clases en los 90's, mientras los renglones al 2006.

Tabla 15. Matriz de transición de los 90's al 2006 en km<sup>2</sup>

		90's												
		ND	Agua	AsenHum	Dunas	Manglar	Nubes	Pastizal	Popal	Selva mediana	Sin vegetacion	Sombras	Mina	Total
2006	ND	10817	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10817
	Agua	0	443	2	0	10	26	1	5	12	10	2	0	512
	AsenHum	0	1	37	0	8	8	8	4	73	0	4	0	145
	Dunas	0	1	1	0	3	2	0	0	5	0	0	0	11
	Manglar	0	6	6	0	59	3	4	12	48	0	2	0	140
	Nubes	0	0	1	0	1	2	1	0	27	0	2	0	35
	Pastizal	0	0	5	0	3	8	4	1	56	0	4	0	82
	Popal	0	1	1	0	5	8	2	26	15	2	5	0	66
	Selva baja	0	0	0	0	1	3	2	1	25	0	1	0	32
	Selva mediana	1	1	25	0	58	458	106	6	1373	0	193	0	2221
	Sin vegetacion	0	0	1	0	8	7	1	7	49	0	6	0	80
	Sombras	0	0	0	0	1	2	1	0	27	0	2	0	33
	Mina	0	0	0	0	0	1	1	0	3	0	1	0	7
	Total		10818	452	79	2	158	528	132	63	1713	12	223	1

Como se aprecia en la matriz de cambio, los cuerpos de agua tuvieron un aumento de 60 km<sup>2</sup> en la superficie debido al paso del huracán Wilma (octubre de 2005 y las imágenes adquiridas del 2006).

Los asentamientos humanos han tenido un incremento de 66 km<sup>2</sup> a causa de la atracción de oferta de empleo, por lo que ha generado que las principales ciudades turísticas crezcan y con ello la infraestructura turística.

La vegetación de dunas costeras para este período tuvo un incremento de 9 km<sup>2</sup> lo que se le puede atribuir a las características de las imágenes empleadas (resolución espacial) y la poca cantidad de nubes y sombras presentes en el área de estudio.

En el pastizal cultivado existe una disminución (50 km<sup>2</sup>) que se explica a que algunos pastizales se han transformado a otro tipo de vegetación o que ya son asentamientos humanos (para más detalle ver la matriz de transición).

En el popal-tular hay un aumentó de 3 km<sup>2</sup> en la superficie a causa de que otro tipo de vegetación que existía fue reemplazado por éste, sobre todo en el área de manglar.

La selva baja para los 90's no se reportó este tipo de vegetación por lo que no se conoce si hay una pérdida o ganancia en su superficie. Como se había mencionado en el apartado anterior la información auxiliar utilizada no reportó este tipo de vegetación.

La selva mediana tiene un incremento de 508 km<sup>2</sup> debido a la "limpieza" de nubes y sombras presentes en las imágenes actuales con relación a las anteriores a esta fecha.

En la clase "sin vegetación aparente" presenta un aumento (68 km<sup>2</sup>) a causa probablemente del impacto de un huracán o que la vegetación es muy dispersa por lo que el método o la resolución espacial no es capaz de detectar la vegetación.



La mina muestra un aumento de 6 km<sup>2</sup> porque en sus planes operativos se tenía contemplado el crecimiento, asimismo a la demanda de material de construcción para los nuevos desarrollos turísticos establecidos a lo largo del Corredor (comp. pers.).

Como se puede observar en la figura 22 los cambios de los cuerpos de agua tienen un ligero incremento debido al paso del huracán Wilma (2005); la selva mediana incrementó a la “limpieza” de nubes y sombras y por último la clase sin vegetación aparente incrementó debido a la resolución espacial de las imágenes o al paso del huracán.

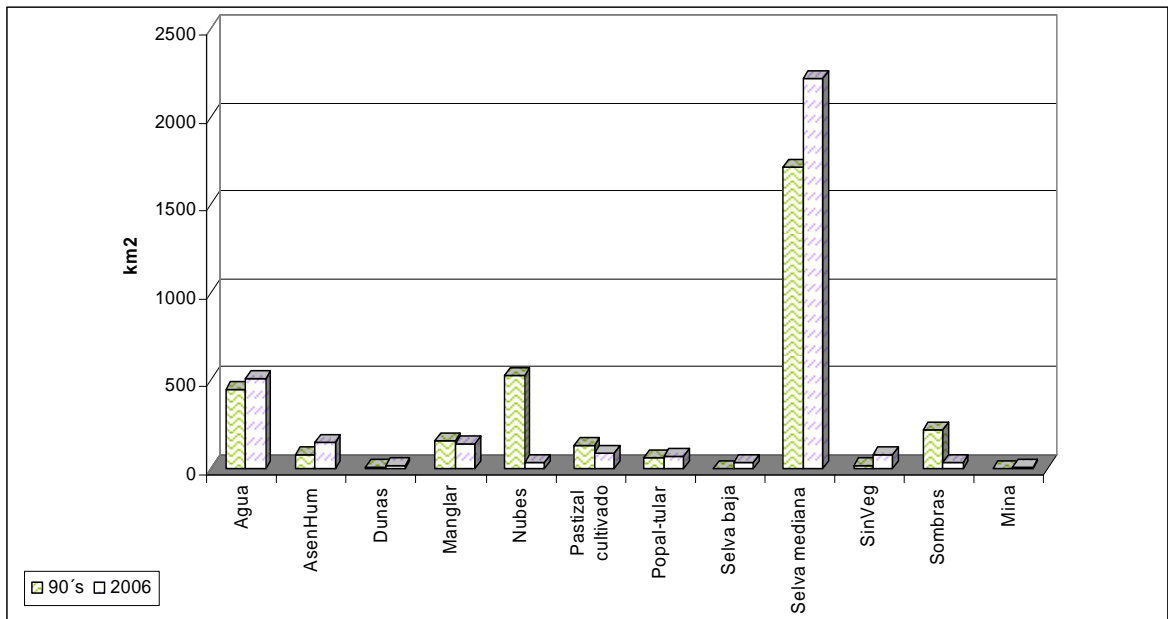


Figura 22. Cambios de uso de suelo de los 90's al 2006

### 5.3.4 Cambios 70-2006

Si analizamos de manera absoluta las fechas extremas de este estudio tendríamos que, los cambios de los cuerpos de agua en los setentas presentan una menor superficie debido posiblemente a la cubierta vegetal que existía para ese momento. En cuanto a los 80's y 90's el incremento de la superficie se debe a cuestiones meteorológicas probablemente (como por ejemplo

Huracán Gilberto) y para el 2006 lo que posiblemente sería en condiciones normales o a cuestiones antropogénicas. Obsérvese tabla 16/figura 23.

Los asentamientos humanos presentan un incremento esperado (138 km<sup>2</sup>) durante el período de análisis debido que la zona de estudio se ha vuelto un polo de atracción de personas que buscan un mejor empleo a través del turismo, por lo tanto, la demanda de viviendas ha crecido junto con la infraestructura turística.

La vegetación de dunas costeras muestra una superficie irregular debido a la limitante de las imágenes de satélites empleadas y la temporalidad, ya que influye mucho la presencia de nubes en el área, la resolución espacial de las imágenes o el efecto de un huracán. Por otro lado, la zona litoral se ha estado deteriorando por la construcción de complejos hoteleros a lo largo del corredor y los huracanes quedando sólo la roca desnuda.

El manglar, sin tomar en cuenta la fecha de los 80's, se aprecia una disminución en su superficie total (25 km<sup>2</sup>) a causa de la construcción de carreteras, viviendas, hoteles y condiciones meteorológicas. En el caso, de los 80's esa disminución puede deberse a problemas instrumentales.

El pastizal cultivado en las dos primeras fechas hay un incremento (fecha 1 de 161 km<sup>2</sup> y fecha 2 de 211 km<sup>2</sup>), esto puede deberse a las actividades agropecuarias que se llevaban a cabo. Y en las dos últimas hubo una disminución de la superficie y se debe a que se abandonaron esas tierras y de nuevo creció vegetación secundaria o se transformaron en asentamientos humanos.

El popal-tular tiene una disminución de 45 km<sup>2</sup> (sin tomar en cuenta los 80's) que se explica a que estas áreas fueron reemplazadas por infraestructura turística o asentamientos humanos. En el caso, de los 80's hay un incremento debido a que la superficie que se le agregó puede corresponder al manglar para la misma fecha, a causa de la confusión espectral.

La selva baja tiene una superficie irregular principalmente a que no fue posible diferenciar este tipo de vegetación a causa de las limitaciones de las imágenes de satélite y a las fuentes auxiliares que no reportaron este tipo de vegetación para esta zona.

La selva mediana presenta un comportamiento irregular en su superficie puesto que las imágenes de satélite presentaban una gran cantidad de nubes y sombras por lo que ocasionó diferencias en la superficie. A pesar, de esta limitante, la superficie de selva ha aumentado a 2221 km<sup>2</sup> a causa al desplazamiento de otros tipos de vegetación, aunque esta selva ya es secundaria.

La clase de “sin vegetación aparente” ha aumentado (80 km<sup>2</sup>) en el área de estudio, a causa de varios factores probables, como el paso de huracanes que arrasó con la vegetación dejando solo la roca desnuda, el abandono de tierras dedicadas a la agricultura o que exista vegetación muy dispersa pero que el sensor no es capaz de detectar.

La mina se introdujo al análisis para separarla de los asentamientos humanos y no sobreestimar la superficie a través de interpretación visual. Pero puede apreciarse que hay un incremento en la superficie de 7 km<sup>2</sup>.

Las clases de nubes y sombras no se introdujeron en el análisis pero si se contabilizan para tomar en cuenta la superficie que ocupan en cada una de las fechas.

Tabla 16. Superficie de la cobertura vegetal y uso de suelo para cada una de las fechas y el porcentaje con respecto del total

Clases	70 (Km <sup>2</sup> )	%	80 (Km <sup>2</sup> )	%	90 (Km <sup>2</sup> )	%	2006 (Km <sup>2</sup> )	%
Agua	509	15	549	16	452	13	512	15
AsenHum	7	0	32	1	79	2	145	4
Dunas	7	0	11	0	2	0	11	0
Manglar	165	5	79	2	158	5	140	4
Pastizal cultivado	161	5	211	6	132	4	82	2

Clases	70 (Km <sup>2</sup> )	%	80 (Km <sup>2</sup> )	%	90 (Km <sup>2</sup> )	%	2006 (Km <sup>2</sup> )	%
Popal-tular	111	3	164	5	63	2	66	2
Selva baja	128	4	33	1	0	0	32	1
Selva mediana	1936	58	2256	67	1713	51	2221	66
SinVeg	0	0	6	0	12	0	80	2
Mina	0	0	1	0	1	0	7	0
Total	3364	100	3363	100	3363	100	3364	100

Agua = Cuerpo de agua AsenHum = Asentamientos humanos Dunas = Vegetación de dunas costeras  
SinVeg = Sin vegetación aparente

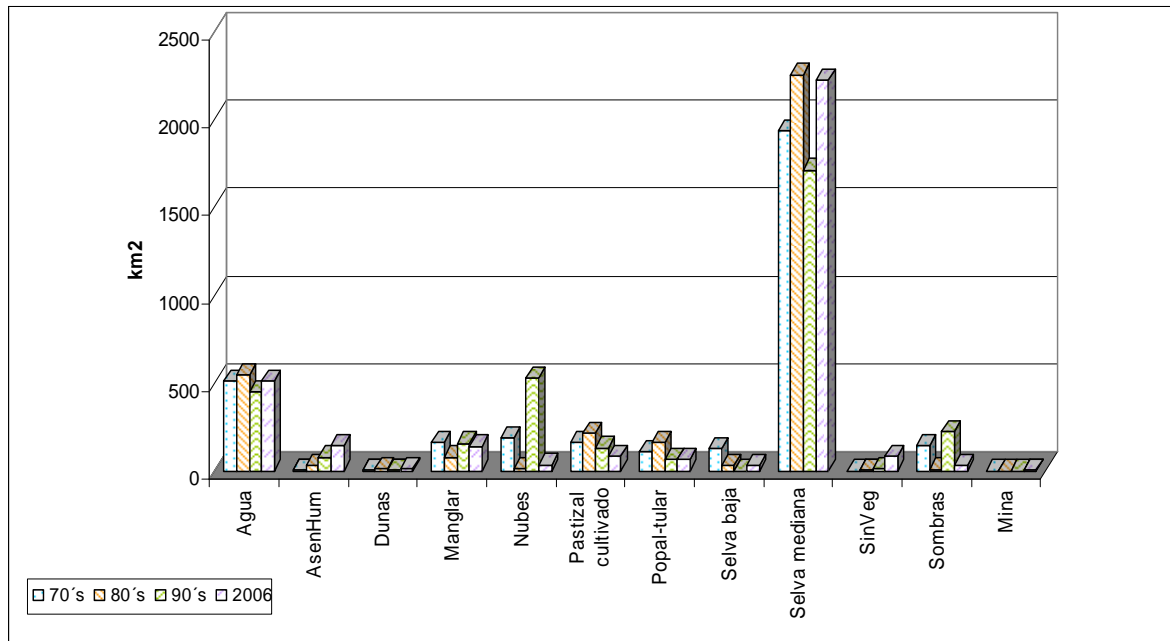


Figura 23. Cambios de uso de suelo de los 70's al 2006

### 5.3.5 Cambios totales en el manglar

El manglar para este período de años se ha comportado de una manera irregular debido a las condiciones de las imágenes de satélites empleadas para la realización de esta tesis así como seguramente, por la ocurrencia de un huracán (Gilberto en 1988 y Wilma en 2005).

Sin embargo, no se integró el manglar a las anteriores explicaciones porque se abordará con mayor detalle en este apartado como sus causas de pérdidas o “ganancias” para cada período. Para ubicar mejor las áreas de cambios de las que se hablará a lo largo del texto ver el croquis.



### 5.3.5.1 Dinámica del manglar de los 70's al 80's

La superficie de manglar que se encuentra de la carretera federal 307 hacia el oeste para este período, se debe al “ruido” de nubes y sombras, es decir, hubo una confusión espectral entre estas clases y el manglar, por lo tanto, dicha superficie corresponde a selva mediana (color verde oscuro) y no al mangle.

El área donde se detectó un mayor cambio para este período fue desde el sur de la ciudad de Cancún (ver Fig. 24) hasta Puerto Morelos en la zona cerca de la costa; dicho cambio se debió parcialmente a que hubo una confusión

espectral entre el popal-tular (color verde claro) y manglar, es decir, el algoritmo utilizado en la primera fecha lo clasificó como “otro tipo de vegetación”. El que se encuentra al oeste de la carretera, por lo tanto para el análisis de cambios, esta clase apareció como pérdida. Por otro lado, el que esta al este de la carretera (y que sí es manglar) posiblemente fue deforestado el manglar dando paso al avance del popal-tular. También se aprecia algunos asentamientos humanos (color gris) que obedecen al crecimiento de infraestructura turística fundamentalmente (observación de campo).



Figura 24. Cambios del manglar

En otro sitio, al sur de Puerto Morelos (Fig. 25), el cambio de manglar hacia popal-tular se debe posiblemente a que talaron el manglar y como sucesión vegetal, creció otro tipo de vegetación. También se puede apreciar que el mar (color azul) le ha ganado terreno a la tierra, es decir, presumiblemente los procesos de erosión costera son muy notables; esto puede obedecer principalmente a dos factores combinados; por un lado, la tala de manglar en la línea de costa que propicia o acelera a la erosión costera por la falta de protección (una de las principales funciones del mangle) y en segundo lugar, la alta periodicidad de eventos como huracanes, los cuales traen consigo el

incremento de la energía del oleaje. Por último la vegetación de dunas costeras también ha reemplazado al manglar en esta zona, a causa de la tala misma o relleno para ampliar la playa (color rosa) con fines turísticos.

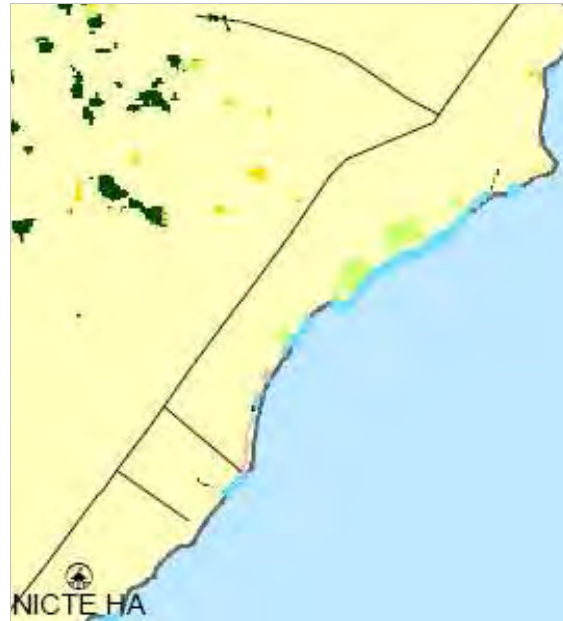


Figura 25. Cambios del manglar

En la parte sur del área de estudio (al sur de Tulum específicamente) paralelamente a la carretera, los cambios en el manglar presentes son por el crecimiento asentamientos humanos debido al desarrollo de infraestructura turística (Fig. 26).



Figura 26. Cambios del manglar

El manglar que se ha mantenido a lo largo del corredor hasta esta fecha, se debe a que en algunos lugares, como en la parte noreste del área de estudio; no se ha ejercido una presión antrópica tan fuerte como en otras zonas debido a que para este período el corredor aún no tiene un gran auge turístico (Fig. 27).



Figura 27. Manglar que se mantuvo de los 70's a 80's

#### 5.3.5.2 Dinámica del manglar de los 80's a 90's

El cambio de manglar a selva mediana, en el área de la carretera hacia el oeste se explica por el “ruido”, confusión espectral inducida por las nubes y sus sombras proyectadas en la superficie de las imágenes de satélite, o sea, existe una confusión espectral entre estas clases y el manglar, el grado de confusión depende del grosor de la nube y la sombra que proyecta.

En la parte noreste del área del estudio (al norte de Cancún) el manglar fue reemplazado por asentamientos humanos, es decir, se construyó el Puerto Juárez para fines turísticos, y los que se encuentran hacia el sur son los hoteles que se han construido como inicio del auge que ha tenido Cancún como destino turístico. El cambio hacia la selva mediana puede deberse a los



trabajos de relleno de alrededores del puerto provocando la muerte del manglar, propiciando así las condiciones para que se estableciera una selva secundaria alrededor de la construcción del puerto. En la línea de costa el proceso de erosión se ve más intensificado debido a que no hay ya manglar. El cambio del mangle hacia el popal-tular se debe a la deforestación del primero y, por un proceso de sucesión comienza a crecer el popal en el área antes desprovista de vegetación (Fig.28).



Figura 28. Cambios del manglar

Cerca de Punta Maroma hasta Punta Bete existe un cambio hacia selva mediana, probablemente sea a causa, probablemente, de las condiciones de la imagen de satélite (resolución espectral y espacial). Además de una confusión espectral entre estas dos clases (Fig. 29).



Figura 29. Cambios del manglar

El área que mantuvo el ecosistema manglar, “intacto” o sin grandes modificaciones sigue siendo la parte noreste del corredor, ya que no presenta presión antropogénica, pues no hay evidencia de alguna vía de comunicación aparente hacia ese lugar (Fig. 30), es decir, el aislamiento geográfico ha sido un factor determinante para su conservación para esta fecha.

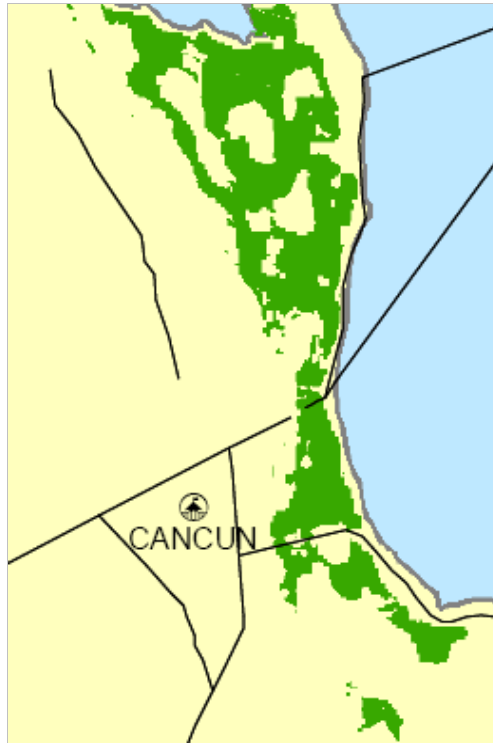


Figura 30. Manglar que se mantuvo de los 80's a 90's en la zona norte del área de estudio

#### 5.3.5.3 Dinámica del manglar de los 90's al 2006

Al igual que los anteriores períodos el “ruido” de nubes y sombras se hace presente, a través de la confusión espectral entre éstas y el manglar que en realidad, se compone de selva mediana (color verde oscuro).

En las cercanías de la ciudad de Cancún (Fig. 31) los cambios del manglar que han ocurrido en este período, fueron evidentemente hacia asentamientos humanos (color gris), ocasionado esto, al desarrollo urbano e impulso de la infraestructura turística que existe en esta área. Otro cambio fue hacia la vegetación de dunas costeras (color rosa) ya que se ha retirado la cubierta vegetal y solo queda suelo desnudo o arenas porque han rellenado para otros fines (observaciones de campo ver foto 1). Por último, el cambio hacia cuerpo de agua (color azul) se debe a que una vez que deforestan, sólo queda las partes inundables donde existía el manglar alterando (asociado) con algún tipo de vegetación no discernible por la imagen de satélite.



Figura 31. Cambios del manglar



Foto 1. Cambio de manglar a asentamientos humanos en la parte norte de Cancún

Otro sitio donde se observa grandes cambios es en el norte de Puerto Morelos hasta aproximadamente Punta Brava. El manglar que se localiza al oeste de la carretera federal 307 es el “ruido” de nubes y sombras. Al este de la carretera existen cambios a asentamiento humanos a causa del crecimiento urbano

(incluyendo la construcción de carreteras ver foto 2) y la construcción de infraestructura turística. El cambio hacia cuerpo de agua es debido a la tala del manglar y por paso de huracanes. Donde fue reemplazado por popal-tular puede deberse al paso de huracanes. El cambio a vegetación dunas costeras se debe a la ampliación de playa para fines turísticos (Fig. 32).



Figura 32. Cambios del manglar

Por otro lado, el manglar que se mantuvo para este período se encuentra al norte de Punta Tanchacto hasta Punta Brava debido que aún no tiene un gran auge turístico como el caso de Cancún pero no tardará en fragmentarse el ecosistema a causa de esta actividad. Además, que no existe en la parte norte perturbación por parte del hombre (Fig. 33).



Foto 2. Fragmentación del manglar por camino cerca de Puerto Morelos.



Figura 33. Manglar que se mantuvo de los 90's al 2006

#### 5.3.5.4 Dinámica del manglar de los 70's al 2006

Si se analizaran los datos espaciales de las fechas extremas y que a su vez, sintetizan el proceso de pérdida de manglar en el período analizado, se tendrían que los cambios a selva mediana de la carretera hacia el oeste es el “ruido” de las nubes y sombras, o sea, hay una confusión espectral entre estas clases. Siendo que el Corredor Turístico Cancún-Tulum es de clima húmedo la

mayor parte del año y se encuentra cubierto por nubes, lo que provoca que existan elementos en la imagen que inducen a confusiones entre clases.

El mayor cambio que sufrió el corredor se encuentra en la parte norte, es decir en las cercanías de Cancún donde el manglar ha sido reemplazado por asentamientos humanos debido al crecimiento de la ciudad y a la infraestructura turística. Los cambios a popal-tular se deben a que han desmontado el manglar y seguramente, lo primero que se desarrolla y expande es este tipo de vegetación. El cambio a agua puede explicarse a que han talado el manglar, lo que ha ocasionado que el mar le gane terreno al continente o también al paso de huracanes. El cambio a vegetación de dunas costeras es a causa del paso de huracanes (Fig. 34).



Figura 34. Cambios del manglar

Otro sitio de cambio es desde Punta Maroma hasta Punta Bete (Fig. 35) donde los asentamientos humanos han reemplazado al manglar debido a la infraestructura turística (hoteles, carreteras, etc. Ver la foto 3). El cambio a agua es porque han talado el manglar lo que ha provocado que el proceso de erosión se intensifique. Por último, el cambio a vegetación de dunas costeras se debe a que algunas áreas han sido rellenadas para ampliar la playa para fines turísticos.



Foto 3. Construcciones de complejos hoteleros en zonas de manglar.



Figura 35. Cambios del manglar



El manglar que se mantuvo para este período es en la parte noreste del área de estudio principalmente a que no existe presión antropogénica porque la mayoría se desplaza a otros sitios de interés turístico como Cancún, Puerto Morelos, Playa del Carmen, entre otros. Además, que en este sitio no existe infraestructura turística (Fig. 36).



Figura 36. Cambios del manglar

#### **5.4 Tasa de pérdida del manglar**

La tasa de pérdida del manglar en el área de estudio para la década de los 70's fue de 8.7% anual, en los 80's hubo una ganancia del 8% es decir, se presenta una tasa de recuperación de 80 km<sup>2</sup>, porque como ya se había mencionado antes se debe a la confusión espectral en la fecha de los 80's. Finalmente, para los 90's la tasa de pérdida fue de 1.9% (tabla 17).

Tabla 17. Pérdida de la superficie del manglar en el Corredor Cancún-Tulum

Fecha inicial	Superficie (km <sup>2</sup> )	Fecha final	Superficie (km <sup>2</sup> )	Diferencia (km <sup>2</sup> )	Tasa km <sup>2</sup> /año
1972	165	1988	79	86	5.3
1988	79	1990	158	-79	-39.5
1990	158	2006	140	18	1.1
Promedio con todos					-11.0
Promedio sin 1988					3.2

En el período de análisis la pérdida total de manglar fue de 26 km<sup>2</sup> con una tasa global de -11.0 km<sup>2</sup>/año, por otra parte, quitando la fecha de los 80's (es decir, un valor de "aparente ganancia") la tasa de pérdida por año se eleva a 3.2 km<sup>2</sup>.

Tomando en cuenta la tasa de pérdida de 3.2 km<sup>2</sup>/año, se concluye que en un período de 44 años se perderá totalmente la superficie de manglar en el Corredor Cancún-Tulum, es decir, que para el año 2050 no existirá este tipo de ecosistema en la zona de estudio, lo que representa una enorme amenaza a los ecosistemas asociados, costeros y marinos, y al final de cuentas, el detrimento de todos los de por sí ya modificados, servicios ambientales que le brindan a la sociedad establecida en la zona.

Hablar en términos de extinción de este ecosistema revela en sí mismo un grave impacto para la riqueza natural no sólo de la zona sino de todo el país y del mundo entero.

Aún así, el manglar que todavía co-existe bajo una enorme presión por parte de las compañías constructoras y hoteleras está considerablemente amenazado por su enorme fragmentación en la última fecha de estudio.

## Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Al realizar la clasificación supervisada, tanto en las imágenes Landsat como las Spot, se observó una confusión espectral entre las clases de selva mediana y manglar, originada por la presencia de nubes y sus sombras, así como por el tipo de coberturas que se encuentran en el área de estudio cuyas diferencias en su respuesta espectral no pudieron ser “separadas” durante la clasificación.

Landsat fue mejor para separar la clase de manglar del resto de las coberturas vegetales pero, debido a su resolución espacial y al patrón tan estrecho de distribución del mangle, gran extensión no pudo ser detectada. Sin embargo, el manglar es fácilmente identificable (de manera visual) empleando las imágenes Spot, pero al momento de separarlo durante la clasificación no es un proceso sencillo. Siendo esto inviable, un cubrimiento *aerofotográfico* de escala detallada y temporalmente compatible, sería lo más idóneo para afinar las clasificaciones.

Además, para mejorar la exactitud del mapa es preciso llevar a cabo más trabajo de campo, es decir, realizar sitios de verificación tanto del manglar que es el que interesa en esta tesis, como de los demás tipos de vegetación sin quitarles importancia. Asimismo, es primordial que esos sitios tengan más información, tal como estado de conservación, identificar las especies de mangle, así como la vegetación asociada a este ecosistema, el sistema hidrodinámico, el efecto de construcciones hoteleras y caminos a estos tipos de vegetación.

Como resultado del análisis espacial de las clasificaciones supervisadas de los años 70's, 80's, 90's, y 2006 se obtuvieron los mapas de cambios y las matrices de transición del Corredor Cancún-Tulum con un buen y aceptable grado de exactitud global (70% en promedio). Este dato es de suma importancia para la utilización de todos los productos derivados de esta tesis, pues de manera tradicional, no es común observar el reporte de exactitud (o

índices de confiabilidad globales) en los productos cartográficos sobre cobertura y uso del suelo, ni en México y ni en el mundo en general.

A pesar, de que se contó con cuatro fechas para el análisis de cambios no se obtuvo una tasa de pérdida de manglar esperada, provocado esto por las diferentes resoluciones espaciales y espectrales de las imágenes de satélite empleadas, además del error introducido por la confusión espectral.

Entonces si se contara con la resolución espacial de Spot y la resolución espectral de Landsat para todas las fechas, se podría diferenciar con mayor precisión el manglar y obtener una tasa de pérdida aceptable, así como distinguir los otros tipos de vegetación para las otras tres fechas.

Dentro de las transiciones más importantes encontradas, destacan el deterioro de la selva mediana ante el crecimiento urbano desmedido, así como la pérdida de cobertura vegetal en la parte sur del área de estudio por el mismo proceso.

Por otra parte, la pérdida del manglar a lo largo del corredor debido a los asentamientos humanos o la construcción de complejos hoteleros, ha repercutido tanto a la fauna que vive en este ecosistema como al hombre mismo, evidencia de eso son los desastres provocados por el paso de huracanes, como el caso de Cancún, Puerto Morelos, Nicté Ha, entre otros, los cuales han ocasionando baja influencia de visitantes a la zona, cuando ocurren estos fenómenos.

La pérdida del manglar en el área, así como su fragmentación actual representa una enorme amenaza para el equilibrio ambiental de la zona, si tomáramos en cuenta una tasa de pérdida de manglar de  $3.2 \text{ km}^2/\text{año}$ , se puede concluir que en un período de 44 años se perderá totalmente la superficie de manglar en el Corredor Cancún-Tulum, es decir, que para el año 2050 no existirá este tipo de ecosistema en la zona de estudio. Esto conlleva a pensar en que debemos comprender la relación entre el manglar y los demás ecosistemas, así como los servicios ambientales que nos brindan, para de este

modo, tomar decisiones más acertadas durante el proceso de planeación de los nuevos complejos turísticos.

El manglar que todavía co-existe, bajo una enorme presión por parte de las compañías constructoras y hoteleras, está enormemente deteriorado y fragmentado. Actualmente, su desaparición también se debe a su *muerte inducida* por las ambiciosas compañías promotoras del desarrollo turístico de la zona; esto debido a 1) la falta de conocimiento de los servicios ambientales que proporciona el mangle por parte del sector turístico como las propias autoridades, y 2) la falta de programas, estudios y proyectos sobre este ecosistema actualizados.

De acuerdo con referencias teóricas y de campo, el área de estudio ha mostrado cambios políticos, sociales, económicos y culturales, es decir, pasó de ser un área de baja densidad poblacional a un polo de atracción socioeconómica a partir de la década de los setentas, con el *boom* de Cancún como destino turístico. Actualmente en el corredor se puede apreciar las grandes construcciones de los complejos hoteleros desde Cancún a Tulum.

Por lo tanto, es importante llevar a cabo un seguimiento de los cambios que ha sufrido el manglar en el corredor e inclusive extenderlo a todo el Estado para conocer en que estado de conservación se encuentra este ecosistema. Además, realizar un monitoreo del manglar en el corredor o en las zonas críticas que servirá como una herramienta para la toma de decisiones y políticas con respecto a este ecosistema, por tanto, se recomienda la utilización de la metodología desarrollada en esta tesis porque toma en cuenta los elementos que juegan un papel importante en el dinamismo del manglar a lo largo del área de estudio. Dicha metodología permite generar una primera, y muy precisa aproximación, a la distribución del manglar así como a las causas que han provocado su deterioro.

Por último, con el trabajo de campo se observa que el manglar se encuentra en su mayoría en propiedad privada, por lo que modificar su estado de protección legal actual<sup>1</sup> implicaría un riesgo muy alto para su permanencia.

---

<sup>1</sup> Ley General de Vida Silvestre. Artículo 60 TER.- Queda prohibida la remoción, relleno, transplante, poda, o cualquier obra o actividad que afecte la integralidad del flujo hidrológico del manglar; del ecosistema y su zona de influencia; de su productividad natural; de la capacidad de carga natural del ecosistema para los proyectos turísticos; de las zonas de anidación, reproducción, refugio, alimentación y alevinaje; o bien de las interacciones entre el manglar, los ríos, la duna, la zona marítima adyacente y los corales, o que provoque cambios en las características y servicios ecológicos. Se exceptuaran de la prohibición a que se refiere el párrafo anterior las obras o actividades que tengan por objeto proteger, restaurar, investigar o conservar las áreas de manglar.

# Bibliografía

AAA. 1995. Proc. Human Population and Water, Fisheries, and Coastal Areas: Science and Policy Issues Symposium. American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C.

Aburto-Oropeza, O., E. Ezcurra, G. Danemann, V. Valdez, J. Murray y E. Sala. 2008. Mangroves in the Gulf of California increase fishery yields. PNAS. 105(30):10456-10459.

Aguilar, C., E. Martínez y L. Arriaga. 2000. Deforestación y fragmentación de ecosistemas: ¿Qué tan grave es el problema en México?. BioDiversitas. (30):7-11.

Agraz-Hernández, C. M., J. A. Benítez-Torres y F. J. Flores-Verdugo. 2003. Impacto y deterioro de los ecosistemas de manglar: Estudios de casos. Jaina en línea. 14(1):10-12.

Aizpuru, M., F. Achard and F. Blasco. 2000. Global assessment of Cover Change of the Mangrove forest using Satellite imagery at medium to high resolution. In *EEC research project n°15017-1999-05 FIED ISP FR*, Joint Research Center, Ispra.

Alvarado, P. J. C. 2003. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar: Playa Tortuguera X'cacel – X'cacelito. Ramsar. pp. 13.

Álvarez-León, R. 2003. Los manglares de Colombia y la recuperación de sus áreas degradadas: revisión bibliográfica y nuevas experiencias. Madera y Bosques 9 (1):3-25. [Fecha de consulta 17 de noviembre del 2006]. Disponible en:

<http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/resumenes/9.1/pdf/Avarez%202003.PDF>

Alvarez, P.R. y S. Interián P. 2005. Cartografía temática de la cobertura de manglares mediante imágenes satelitales Landsat -7 y ENVI 3.5. Mapping Interactivo. Revista

Internacional de Ciencias de la Tierra. [Fecha de consulta 10 de julio de 2006]

Disponible en:

[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=860](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=860)

Archer, T. A., J. M. Kovacs and L. P. Aspden. 2003. Monitoring the decline of a tropical forested wetland of the Teacapan estuarine system, Mexico. Proc. 25th Canadian Symposium Remote Sensing, Canadian Aeronautics and Space Institute. [Fecha de consulta 17 de Julio del 2006]. Disponible en: <http://www.casi.ca/papers/1-02.pdf>

Bakker, W. H. 2001. Multispectral scanners. In Lucas L. F. Janssen and Gerrit C. Huurneman (eds). Principles of remote sensing. ITC. The Netherlands. pp.168-171.

Barbier, E.B. 1994. The environmental effects of trade in the forestry sector. En: OECD. The environmental effects of trade. París, OCDE.

Béland M., K. Goïta, F. Bonn and T. T. Pham. 2006. Assessment of land-cover changes related to shrimp aquaculture using remote sensing data: a case study in the Giao Thuy District, Vietnam. International Journal of Remote Sensing. 27(8):1491-1510.

Benítez P. D., F. Flores V. y J. I. Valdez H. 2002. Reproducción vegetativa de dos especies arbóreas en un manglar de la costa norte del Pacífico Mexicano. Madera y Bosques 8(2):57-71.

Bios Iguana A. C. 2006. Disponible en: <http://www.bios-iguana.com/manglares/1-los-manglares.php>

Blasco, F., Carayon, J.L. and Aizpuru, M. 2001. World mangrove resources. GLOMIS Electronic Journal. 1(2):1-3.

Bocco, G., M. Mendoza y O. R. Maser. 2001. La dinámica del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. (44):18-38.



Bragachini, M., A. von Martini, A. Bianchini, E. Martelloto y A. Méndez. 2006. Percepción Remota. Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi. pp. 1-20.

Butler, M. J. A.; Mouchot, M.C.; Barale, V.; LeBlanc C. 1990. Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio. FAO Documento Técnico de Pesca. No. 295. Roma, FAO. pp. 212.

Casacchia, R., R. Salvatori, A. Grignetti, S. Mandrone, A. Capraro and M. P. Bogliolo. 2002. Land use changes in southern Lazio, Italy, by satellite data multitemporal analysis. In Lorenzo Bruzzone and Paul Smits (ed). Analysis multi-temporal remote sensing images. World Scientific Publishing. Singapore. pp. 423-430.

Camargo, L., J. Pellerin and C. M. N. Panitz. 2004. Derivation and application of algorithm of 5 meters (image mask) for mangrove classification. *Gayana (Concept.)*. Vol. 68, no.2, supl. [Fecha de consulta 18 de Julio de 2006] Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-65382004000200015&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-65382004000200015&script=sci_arttext)

CCRS. 2007. Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing [en línea]. Canada Centre for Remote Sensing. [Fecha de consulta 20 de abril del 2007]. Disponible en: [http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/index\\_e.php#tutor](http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/index_e.php#tutor)

Cho, H.Y., C. Lakshumanan and U. Natesan. 2004. Coastal wetland and shoreline change mapping of Pichavarm, south east coast of India using satellite data. Gis Development. Application. Natural Resources Management. Coastal Zone Management. Management & Monitoring. [Fecha de consulta 13 de octubre del 2006] Disponible en: <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/coastal/mnm/ma04081pf.htm>

Choudhury, K. J. 1997. La ordenación sostenible de los manglares costeros, desarrollo y necesidades sociales. En: Manglares y otros bosques costeros. XI Congreso Forestal Mundial 13 a 22 de octubre de 1997, Natalia Turquía. FAO 6(38.6):273-296.

Chuvieco, S. E. 2002. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel. España. pp. 586.

Clinton J. Dawes. 1986. Botánica Marina. Universidad del Sur de Florida, Ed. Limusa, México. pp. 553- 579.

Clough, B. F. 1982. Mangrove ecosystem in Australia: structure, function and management. AIMS/ANU Press, Canberra.

Coleman, L. T., A. Manu and Y. A. Twumasi. 2003. Application of Landsat to the study of mangrove ecologies along the Coast of Ghana. 30th International Symposium for Remote Sensing of Environment, Honolulu, HI, Nov. 10-14, 2003. [Fecha de consulta 17 de Julio del 2006]. Disponible en:

<http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/323.pdf>

Conabio. 2004. Sistema de Información Biótica. Versión 4.1. Derechos Reservados ©. Fideicomiso Fondo para la Biodiversidad. Dirección General de Bioinformática. Subdirección de Desarrollo, Conabio.

Conabio. 2006. Corredor Cancún – Tulum. Disponible en:

[http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp\\_105.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_105.html)

Contreras, E. F. 1993. Ecosistemas costeros mexicanos. Conabio-Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. pp 415.

Coppin, P., E. Lambin, I. Jonckheere and B. Muys. 2001. Digital change detection methods in natural ecosystem monitoring: a review. In Lorenzo Bruzzone and Paul Smits (ed). Analysis multi-temporal remote sensing images. World Scientific Publishing. Singapore. pp. 3-36.

Cordero, P. P. y Franklin Solano C. 2000. El manglar más grande de Costa Rica: experiencias de la UICN en el Proyecto DANINA-MANGLES de Terraba Sierpe. 1a. Ed. San José, C. R. UICN. pp. 40.

Córdoba, O. J. y A. García de Fuentes. 2003. Turismo, Globalización y Medio ambiente en el Caribe Mexicano. Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía, UNAM (052):117-136.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannnon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton & M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.

Dahdouh-Guebas, F., T. Zetterström, P. Rönnbäck, M. Troell, A. Wickramasinha and N. Koedam. 2002. Recent changes in land-use in the Pambala-Chilaw lagoon complex (Sri Lanka) investigated using remote sensing and GIS: conservation of mangroves vs. development of shrimp farming. *Environmental, Development and Sustainability* 4:185-200.

Dahdouh-Guebas, F., L. P. Jayatissa, D. Di Nitto, J. O. Bosire, D. Lo Seen and N. Koedam. 2005. How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami?. *Current Biology* 15(12): 443-447.

Del Amo R., S. 1979. Plantas medicinales del estado de Veracruz. INIREB, Xalapa, Ver.

Diario Oficial de la Federación. 2001. Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región denominada Corredor Cancún-Tulum. Chetumal, Quintana Roo. pp. 8.

Duke N.C., M. C. Ball & J. C. Ellison, 1998. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves. *Global Ecological Biogeography Letters* 7:27-47.

Dupuy, R. J. M., J. A. González I., S. Iriarte V., L. M. Calvo I., C. Espadas M., F. Tun A. y A. Dorantes E. 2007. Cambios de cobertura y uso de suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas, Boletín de Geografía, UNAM* (62): 104-124.

Ewel, C. Katherine, Robert R. Twilley and Jin Eong Ong. 1998. Different kinds of mangrove forests provide different good and services. *Global Ecology and Biogeography Letters. Biodiversity and Function of Mangrove Ecosystems* 7(1):83-94.

FAO. 1993. Forest Resource Assessment. Disponible en:

[http://www.customw.com/ecoweb/notas/notas/970829\\_2.html](http://www.customw.com/ecoweb/notas/notas/970829_2.html)

FAO/Montes. 1994. Directrices para la Ordenación de los Manglares. FAO. Santiago, Chile. pp. 325.

FAO. 2003. Status and trends in mangrove area extent worldwide. By Wilkie, M.L. and Fortuna, S. Forest Resources Assessment Working Paper No. 63. Forest Resources Division. FAO, Rome. (Unpublished). Disponible en:

<http://www.fao.org/docrep/007/j1533e/J1533E00.htm#TopOfPage>

FAO. 2005. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Estudio temático sobre los manglares. Servicio de Desarrollo de Recursos Forestales. Departamento de Montes Dirección de Recursos Forestales FAO, Roma, Italia.

Farid, Melgani and S. B. Serpico. 2002. Proposal of different approaches to spatio-temporal contextual classification of remote-sensing images. In Lorenzo Bruzzone and Paul Smits (ed). *Analysis multi-temporal remote sensing images*. World Scientific Publishing. Singapore pp. 91-99.

Fernández-Coppel, I. A. y E, Herrero L. 2001. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Universidad de Valladolid. pp. 1-37.

Fernández-Prieto, D. 2002. An application-oriented change-detection technique. In Lorenzo Bruzzone and Paul Smits (ed). *Analysis multi-temporal remote sensing images*. World Scientific Publishing. Singapore pp. 116-123.

Field, B. C., Julie G. Osborn, Laura L. Hoffman, Johanna F. Polsenberg, David D. Ackerly, Josep A. Berry, Olle Bjorkman, Alex Held, Pamela A. Matson and Harold A.

- Mooney. 1998. Mangrove biodiversity and ecosystem function. *Global Ecology and Biogeography Letters* 7(1): 3-14.
- Flores, M. G., J. Jiménez L., X. Madrigal S., F. Moncayo R. y F. Takaki T. 1971. Memoria del mapa: Tipos de vegetación de la República Mexicana. SRH. Subsecretaría de Planeación Dirección General de Estudios, Dirección de Agrología. México. pp.57.
- García, R. G., B. Schomook e I. Espejel C. 2005. Dinámica en el uso de suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (58):122-139.
- Garzón-Ferreira J., Alberto Rodríguez-Ramírez, Sonia Bejarano-Chavarro, Raúl Navas-Camacho y Catalina Reyes-Nivia. 2001. Caracterización de los Ambientes Marinos y Costeros de Colombia: Formaciones Colarinas. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia -INVEMAR. Colombia. Año 2001. pp 19-20 [fecha de consulta 17 de noviembre del 2006]. Disponible en: [http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/EAMC\\_2001/IEAMCC011AFC.pdf](http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/EAMC_2001/IEAMCC011AFC.pdf).
- Gómez, L. J. M del C. y R. Flores R. 2003. El fascinante mundo del manglar. Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Quintana Roo, Programa de Manejo Integrado de Recursos Costeros; Secretaría de Marina Armada de México, IV Sector Naval Militar de Chetumal Chetumal, Q. Roo. pp. 40.
- Gómina, Leonardo y Jairo Durango Vertel.2005. Aplicaciones ambientales de imágenes digitales de satélite. *GeoTropico*, vol.3 (1), 21-30. [Fecha de consulta 17 de junio del 2006]. Disponible en: [http://www.geotropico.org/3\\_1\\_Gomina.pdf](http://www.geotropico.org/3_1_Gomina.pdf)
- González Medrano F. 2003. Las comunidades vegetales de México. INE-Semarnat. México. pp. 77.
- Green, E. P. C. D. Clark, P. J. Mumby, A. J. Edwards and A. C. Ellis. 1998. Remote sensing techniques for mangrove mapping. *International Journal Remote Sensing* 19(5):935-956.

Guerra-Martínez V. y S. Ochoa-Gaona. 2005. Identificación y variación de la vegetación y uso de suelo en la Reserva Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000) mediante sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Ra Ximhai*. 1(2):325-346. [Fecha de consulta 17 de julio del 2006]. Disponible en: <http://www.uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-02articulosPDF/18.pdf>

Hernández-Trejo, H., A. G. Priego-Santander, J. López-Portillo y E. Isunza-Vera. 2006. Los paisajes físico-geográficos de los manglares de la Laguna de la Mancha, Veracruz, México. *INTERCIENCIA* 31(3):211-219.

Herrera, S. J. y E. C. Ceballos. 1998. Manglares: ecosistemas valiosos. *Biodiversitas-Conabio* (19):2-10.

Horning, N. 2004. Justification for using photo interpretation methods to interpret satellite imagery. Remote Sensing & Geographic Information Systems Facility. Remote Sensing Resources. Center for Biodiversity and Conservation at the American Museum of Natural History. pp. 1-5.

Horning, N. 2004. Land cover classification methods. Remote Sensing & Geographic Information Systems Facility. Remote Sensing Resources. Center for Biodiversity and Conservation at the American Museum of Natural History. pp. 1-19.

Horning, N. 2004. Land Cover Change Methods. . Remote Sensing & Geographic Information Systems Facility. Remote Sensing Resources. Center for Biodiversity and Conservation at the American Museum of Natural History. pp. 1-19.

Howard, J.A. 1970a. Aerial photo-ecology. London. Faber and Faber; New York, American Elsevier. pp. 325.

Howard, J. A. 1991. Remote sensing of forest resources: theory and application. Chapman & Hall. Great Britain, University Press, Cambridge. pp. 420.

Hussin, Y. A., M. M. Zuhair and M. Weir. 1999. Monitoring mangrove forests using remote sensing and GIS. The 20<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing was held on November 22-25, 1999 in Hong Kong, China. Poster Session 5.

Instituto de Geografía. 1980. Quintana Roo: Organización especial. Instituto de Geografía, UNAM y Centro de Investigaciones de Quintana Roo, A.C. Puerto Morelos, Q.R. pp. 203.

Instituto Nacional de Ecología. 1999. Programas de manejo 3. Áreas Naturales Protegidas: Reserva de la biosfera Sian Ka'an. INE-SEMARNAP. México, D. F. pp. 73.

Instituto Nacional de Ecología. 2000. Programa de manejo del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos. INE-SEMARNAP. México, D. F. pp. 224.

Instituto Nacional de Ecología. 2005. Evaluación preliminar de las tasas de pérdida de superficie de manglar en México. INE, Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de los Ecosistemas. México, D. F.

INEGI. 2006. II Censo de población y vivienda 2005 para el Estado de Quintana Roo. México.

Janssen, F. L. L. 2001. Introduction to remote sensing. In Lucas L. F. Janssen and Gerrit C. Huurneman (eds). Principles of remote sensing. ITC. The Netherlands. pp. 30-42.

Janssen, F. L. L. 2001. Visual image interpretation. In Lucas L. F. Janssen and Gerrit C. Huurneman (eds). Principles of remote sensing. ITC. The Netherlands. pp. 307-314.

Janssen, F. L. L. and W. H. Bakker. 2001. Sensors and platforms. In Lucas L. F. Janssen and Gerrit C. Huurneman (eds). Principles of remote sensing. ITC. The Netherlands. pp. 85-100.

Janssen, F. L. L. and B.G.H. Gorte. 2001. Digital image classification. In Lucas L. F. Janssen and Gerrit C. Huurneman (eds). Principles of remote sensing. ITC. The Netherlands. pp. 342-364.

Janssen, F. L. L. and M. J. C. Weir. 2001. Geometric aspects. In Lucas L. F. Janssen and Gerrit C. Huurneman (eds). Principles of remote sensing. ITC. The Netherlands. pp. 259-264.

Japan Association of Remote Sensing: Concept of Remote Sensing. 2006. Disponible en: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/>

Jensen, J. R. 1996. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Prentice-Hall, Inc. USA. pp. 318.

Jensen, J. R. 2007. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2nd Ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. pp. 592.

Jupiter, SD, Phinn, S, Duke, NC, and Potts, DC. 2003. The buffer zone: connectivity between mangrove and coral reef ecosystems in the context of land use change, Proceedings of the 30th International Symposium for Remote Sensing of Environment, Honolulu, HI, Nov. 10-14, 2003. [Fecha de consulta 20 de Julio del 2006]. Disponible en: [http://www.es.ucsc.edu/~sjupiter/Jupiter\\_et\\_al\\_2003\\_ISRSE\\_color.pdf](http://www.es.ucsc.edu/~sjupiter/Jupiter_et_al_2003_ISRSE_color.pdf)

Kairo, G. J., B. Kiviyatu and N. Koedam. 2002. Application of remote sensing and GIS in the management of mangrove forests within and adjacent to Kiunga Marine Protected Area, Lamu, Kenya. Environment, Development and Sustainability 4:153-166.

Kaly, U. L. and G. P. Jones. 1998. Mangrove restoration: a potential tool for management in tropical developing countries. Ambio 27(8): 656-661.

Kannan, L., T. T. Ajith Kumar and A. Duraisamy. 1998. Remote sensing for mangrove forest management. GIS Development. Geospatial application papers. Environmental. Wetland management. [Fecha de consulta 18 de Julio del 2006]. Disponible en:



<http://www.gisdevelopment.net/application/environment/wetland/envwm0002.htm>

Kovacs, J. M., Wang, J. and M. Blanco. 2001. Mapping mangrove disturbances using multi-date Landsat TM imagery. *Environmental Management* 27: 763-776.

Lacerda, D., Conde, J. Bacón, P., Álvarez, R., Cruz, D. y Kjerfve, B. 1993. Ecosistemas de manglar de América Latina y el Caribe. En: Lacerda, D. (Editor). *Conservación y Aprovechamiento Sostenible de Bosques de Manglar en las Regiones de América Latina y África*. Ecosistemas de Manglares. ITTO. Yokohama, Japón. Vol 2: 1-39.

Lacerda, L. D. & R. V. Marins. 2002. River damming and changes in mangrove distribution. *ISME /Glomis Electronic Journal* 2(1):1-4. Disponible en: <http://www.glomis.com/ej/pdf/ej03>

Lighthouse Foundation. 2006. 2007. Disponible en: <http://www.lighthouse-foundation.org/index.php?id=4&L=2>

Lambin, F. E. 1999. Monitoring forest degradation in tropical regions by remote sensing: some methodological issues. *Global Ecology and Biogeography*. Tropical open woodlands special issue 8(3/4):191-198.

Lillesand, T. y R. Kiefer. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Jhon Wiley & Sons, Inc. USA. pp. 750.

Lluch y Ríos, 1984. Los manglares. Departamento de Recursos Naturales. Programa Manejo de la Zona Costanera. Recursos naturales educa. Edición: J.I Malavé. Disponible en: <http://www.ceducapr.com/manglares.htm>

Loa, E. L. 1994. Los manglares de México: sinopsis general para su manejo. In: D. O. Suman, ed. *El ecosistema de manglar en América Latina y la Cuenca del Caribe: su manejo y conservación*. Miami, Florida. pp 144-151.

López-Portillo, J. 1999. ¿Riviera Maya o Corredor Cancún Tulum? *La Jornada, Suplemento sobre Ecología*, 27 de septiembre. Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/1999/sep99/990927/eco-pag2.html>

López-Portillo, J. y E. Ezcurra. 2002. Los manglares de México: una revisión. *Madera y Bosques* Número especial: 27-51.

Lunetta, R. S. 2002. Multi-temporal remote sensing analytical approaches for characterizing landscape change. In Lorenzo Bruzzone and Paul Smits (ed). *Analysis multi-temporal remote sensing images*. World Scientific Publishing. Singapore pp. 339-346.

Maas, F. S., H. H. Regil G. C. G. Esquivel y G. Nava B. 2006. Cambio de uso de suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el período 1972-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (61):38-57.

Mangrove Environmental Protection Group. 2001. Diagnóstico Socioambiental de la Zona Estuarina y de Manglar del Municipio de San Blas, Nayarit. Mangrove Environmental Protection Group. San Blas, Nayarit, México. pp. 103.

Manassrisuksi K., Michael Weir and Yosif Ali Hussin. 2001. Assessment of mangrove rehabilitation programme using Remote Sensing and GIS: a case de study of Amphur Khlung, Chanyaburi Province, eastern Thailand. 22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing, November 5-9, 2001. Singapore. [Fecha de consulta 17 de julio del 2006]. Disponible en: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/019manas.pdf>

Martínez, Y. A. 2006. Los esteros: un importante hábitat costero. *Nuestra Tierra*. pp. 3-8.

Mas, J. F. 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection technique. *International Journal Remote Sensing* 20:139-152.

Mas, F. J., J. R. Díaz-Gallegos y A. Pérez V. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM (31): 53-72.

Masera, O. R. 1996. Deforestación y degradación forestal en México. Documentos de trabajo núm. 19. GIRA A. C., Pátzcuaro, México. (Enero).

Mausel, P. W., W. J. Kamber and J. K. Lee. 1990. Optimum band selection for supervised classification of multispectral data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 56(1):55-60.

Méndez Jazmina. 2001. El manglar. Escenarios ,,, donde Venezuela está en escena.. Ciencia y tecnología. Natura.

Mendieta, R. M. y Del Amo, R., S.1981. Plantas medicinales del Estado de Yucatán, Xalapa, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos-Compañía Editorial Continental.

MEPG. 2001. Diagnóstico socioambiental de la zona estuarina y de manglar del municipio de San Blas, Nayarit. MEPG. Pp.

Moreno C. P., J. L. Rojas G., D. Zarate L., M. A. Ortiz P., A. L. Lara D. y T. Saavedra V. 2002. Diagnóstico de los manglares de Veracruz: distribución, vínculo con los recursos pesqueros y su problemática. Madera y Bosques Número especial: 61-88.

Mota, G. L. A., Pakzad K., Muller S., Meirelles M. S. P., Feitosa, R. Q., Coutinho H. L. da C. 2004. A Framework for Automatic Low-Resolution Satellite Image Interpretation Based on Spectral, Contextual and Multitemporal Knowledge. In: ISPRS 2004, 2004, Istanbul. Proceeding of ISPRS 2004.

Murali Mani, R., P. Vethamony, A. K. Saran and S. Jayakumar. 2006. Change detection studies in coastal zone features of Goa, India by remote sensing. Current Science. 91(6): 816-820.

Nacional Aeronautics and Space Administration. 2007. Disponible en:

<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

NASA. 2007. Landsat Data Continuity Mission. Disponible en: <http://ldcm.gsfc.nasa.gov/>

NASA. 2007. NASA Selects Contractor for Landsat Data Continuity Mission Spacecraft. Disponible en:

[http://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/apr/HQ\\_C08021\\_Landsat\\_Data.html](http://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/apr/HQ_C08021_Landsat_Data.html)

Nayak, S. 2004. Role of remote sensing to integrated coastal zone management. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Natural Resources Canada 35: 1232-1243.

NOM-059-SEMARNAT-2001. Norma oficial mexicana que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestre terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y sujetas a protección especial y que establece especificaciones para su protección. Diario Oficial de la Federación, miércoles 6 de marzo de 2002, segunda sección: 1-78. [Fecha de consulta 28 de noviembre del 2006]. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/norma59a.html>

Organización Internacional de las Maderas Tropicales. Plan de trabajo de la OMIT sobre Manglares 2002-2006. Serie OIMT de políticas forestales No. 12. Yokohama, Japón. pp. 6.

PDDUT. 2006. Programa Director de Desarrollo Urbano del centro de Población Tulum. Disponible en: <http://www.solidaridad.gob.mx/PDFs/PDDUTulumfeb06.pdf>

Pellerin, J., L. P. Camargo and C. N. Panitz. 2004. Data fusion of Spot pan images and Landsat TM for mapping Rio Tavares mangrove in Santa Catarina island-Brazil. *Gayana (Concept.)*. [online] Vol. 68, no.2, supl [Fecha de consulta 21 de Julio del 2006] pp. 476-481. Disponible en:

[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-65382004000300029&lng=es&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-65382004000300029&lng=es&nrm=iso&tlng=en)

Pérez V. G. y E. Carrascal. 2000. El desarrollo turístico en Cancún, Quintana Roo y sus consecuencias sobre la cubierta vegetal. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM (043):145-166.

Pouncey, R., K. Swason and K. Hart (eds.). 1999. The ERDAS Field Guide. ERDAS, Inc. Georgia, USA. pp. 672.

Quadri De La Torre, Gabriel. 1999. Incendios forestales y deforestación en México: una perspectiva analítica. Céspedes. No. 8, septiembre-octubre 1999, México. pp. 44-56. [Fecha de consulta 3 de septiembre de 2007]. Disponible en: [http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/otras/deforestacion/cap\\_4.htm](http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/otras/deforestacion/cap_4.htm)

Ramachandran, S., S. Sundaramoorthy, R.Krishnamoorthy, J.Devasenapathy and M.Thanikachalam. 1998. Application of Remote Sensing and GIS to Coastal Wetland Ecology of Tamil Nadu and Andaman and Nicobar Islands with special reference to Mangroves. Current Science, August Special Issue, 1998, Vol.75, No.3. pp. 101 – 110.

Ramsar. 2006. Disponible en: <http://sedac.ciesin.org/ramsardg/casestudies/index.html>

Ratanasermpong, S., D. Disbunchong, T. Charupatt and S. Ongsomwang. 2000. Coastal zone environment management with emphasis on mangrove ecosystem, a case study of Ao-Sawi Thung Khla, Chumphon, Thailand. Gis Development. ACRS. Sección Coastal Zone Monitoring. [Fecha de consulta 17 de Julio del 2006]. Disponible en: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts3/cost003.asp>

Reunión Conabio-INE-Conafor-Conagua-INEGI. 2006. Aguascalientes, Aguascalientes, 14 de agosto de 2006.

Rey, R. J y R. Rutledge. 2002. Los manglares. Departamento de Entomología y Nematología, del Servicio de Extensión Cooperativo de la Florida, del Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas, Universidad de la Florida. ENY-660S.

Reyes Ch., M.A. y C. Tovilla H. 2002. Restauración de áreas alteradas de manglar con *Rhizophora mangle* en la Costa de Chiapas. Madera y Bosques Número especial 1:103-114.

Richards, John A. 1993. Remote sensing digital image analysis. Springer-Verlag. Germany. pp. 333.

Rönnbäck, P. 1999. The ecological basis for the economic value of mangrove forests in seafood production. Ecological Economics 29: 235-252.

Rosete, F y G. Bocco. 2003. Los sistemas de información geográfica y percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. Gaceta Ecológica (68)43-54.

Rzedowski J. 1988. Vegetación de México. Limusa. México.

Sánchez-Páez, H., R. Álvarez-León, O. A. Guevara-Mancera y G. A. Ulloa-Delgado. 2000. Lineamientos estratégicos para la conservación y uso sostenible de los manglares de Colombia. Proyecto PD 171/91 Rev. 2 (F) Fase II (Etapa II). Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares de Colombia. MINAMBIENTE/OMIT. Santa Fe de Bogotá D.C., Colombia. pp. 81.

Sanjurjo, R. E. 2001. Valoración económica de los servicios ambientales prestados por ecosistemas: Humedales de México. Semarnat-INE. México, D. F. pp. 46.

Santos, M. A., C. A. Berlanga-Robles, A. Ruiz-Luna, J. Acosta-Velázquez y N. Trilles-Rios. 2002. Aplicación de técnicas de Percepción Remota para evaluar los usos del suelo del entorno inmediato a los sistemas lagunares costeros de San Ignacio, Navachiste, Vinorama y Macapule, en el Noroeste de México. III Congreso Internacional

Geomática del 19-22 de febrero del 2002. [Fecha de consulta 17 de julio del 2006].

Disponible en:

<http://espejos.unesco.org.uy/simplac2002/Ponencias/Geom%E1tica%202002/GE130.doc>

Satyanarayana, B., B. Thierry, D. Lo Seen, A. V. Raman, G. Muthusankar. 2001. Remote sensing in mangrove research-relationship between vegetation indices and dendrometric parameters: a case for Coringa, east coast of India. 22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001. Singapore.

Sbardella, P. and R. Barichello. 2002. Using remote sensing to update geographic information system. In Lorenzo Bruzzone and Paul Smits (ed). Analysis multi-temporal remote sensing images. World Scientific Publishing. Singapore. pp. 431-438.

Secretaría de Ecología de Campeche. 2006. Disponible en:  
<http://www.ecologia.campeche.gob.mx/consultas/temas/manglares.htm>

Selvam V., K. K. Ravichandran, L. Gnanappazham and M. Navamuniyammal. 2003. Assessment of community-based restoration of Pichavaram mangrove wetland using remote sensing data. Current Science 85 (6):794-798. [Fecha de consulta 17 de julio del 2006]. Disponible en: <http://www.ias.ac.in/currsci/sep252003/794.pdf>

Semarnat-Conap. 2005. Estudio previo justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida: Parque Nacional Manglares de Nichupté, Quintana Roo. Semarnat-Conap. México, D. F. pp. 123.

Snedaker, S. y Getter, C. 1985. Pautas para el Manejo de los Recursos Costeros. Serie de Información sobre Recursos Renovables. Research Plannig Institute. No. 2: 33-53.

Spot Image. 2005. Centre National D'études Spatiales CNES. Disponible en:  
<http://www.spotimage.fr>

Stehman, S. V. and R. L. Czaplewski. 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing Environmental* (64): 331-344.

Suman D. 1994 Situación de los manglares en América Latina y la cuenca del Caribe. En: D. Suman, (ed.) 1994. *El ecosistema del manglar en América Latina y cuenca del Caribe: su manejo y conservación*. Universidad de Miami. pp.1-10.

Syed, M. A and A. M. Sadiq. 2002. Assessing Desert Vegetation Cover Using Remotely Sensed Data: A Case Study from the State of Qatar, *Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing 2002 (ACRS 2002)*, Nov 25-29 held in Kathmandu, Nepal.

Teillet, P. M. 1986. Image correction for radiometric effects in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 7(12):1637-1651.

Tomlinson, P.B. 1986. *The Botany of Mangroves*. Cambridge University Press, London, pp. 413.

Tovilla H. C.; A. V. Román S.; G. M. Simuta M. y R. M. Linares M. 2004. Recuperación del manglar en la Barra del Río Cahoacán, en la costa de Chiapas. *Madera y Bosques* Número especial 2:77-91 [Fecha de consulta 17 de noviembre del 2006]. Disponible en: <http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/resumenes/No.esp.2/tovilla%20et%20al%202004.pdf>

UNEP. 2006. *Marine and coastal ecosystems and human wellbeing: A synthesis report based on the findings of the Millennium Ecosystem Assessment*. UNEP. pp. 76.

USAID. 1993. *Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planeación para el desarrollo regional integrado*. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de Estados Americanos y con el apoyo de la Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero



Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Washington, D.C.  
Disponible en:

<http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/begin.htm#Contents>

Vaiphasa, C. 2006. Remote Sensing techniques for mangrove. Tesis de doctorado. Wageningen University. Enschede, The Netherlands. pp. 129.

Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Gaceta Ecológica, No. 62. INE-SEMARNAT. pp. 21-38.

Velázquez, A., J. F. Mas, R. Mayorga-Saucedo, J. R. Díaz, C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, J. L. Palacio, G. Bocco, G. Gómez-Rodríguez, L. Luna-González, I. Trejo, J. López-García, M. Palma, A. Peralta, J. Prado-Molina y F. González-Medrano. 2002. Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México. BioDiversitas (41):8-15.

Vega, M. L. 2006. La teledetección aplicada al inventario de humedales. Mapping Interactivo. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. [Fecha de consulta 10 de julio de 2006] Disponible en:

[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id\\_articulo=1194](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id_articulo=1194)

Villalba, M. J. C. 2002. Los manglares en el mundo y en Colombia -Estudio descriptivo básico-. Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas.

Villafuerte, D. y M. C. García. 1997. Ganadería y reforestación en el trópico mexicano. Ecologica-Cecodes. [Fecha de consulta 19 de agosto de 2008]. Disponible en:

<http://www.planeta.com/ecotravel/mexico/ecologica/97/1097selvas6.html>

Wang, Y., G. Bonyng, J. Nugranad, M. Traber, A. Ngusaru, J. Tobey, L. Hale, R. Browen and V. Makota. 2003. Remote sensing of mangrove change along the Tanzania Coast. Taylor & Francis 14(21):0-14.

Wang, L., W. P. Sousa and P. Gong. 2004. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing* 25(24):5655-5668. [Fecha de consulta 18 de Julio del 2006]. Disponible en: [http://uweb.txstate.edu/~lw15/pdf/LeWang\\_Sample3.pdf](http://uweb.txstate.edu/~lw15/pdf/LeWang_Sample3.pdf)

Wang, L., W. P. Sousa, P. Gong and G. S. Biging. 2004. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment* 91:432-440. [Fecha de consulta 18 de julio del 2006]. Disponible en: [http://uweb.txstate.edu/~lw15/pdf/LeWang\\_Sample1.pdf](http://uweb.txstate.edu/~lw15/pdf/LeWang_Sample1.pdf)

Western Indian Ocean Marine Science Association (WIOMSA). 2004. *Managing Marine Protected Areas: A TOOLKIT for the Western Indian Ocean. Mangrove restoration.* [Fecha de consulta 25 de junio 2007]. Disponible en: [http://www.wiomsa.org/mpatoolkit/Themesheets/H9\\_Mangrove\\_restoration.pdf](http://www.wiomsa.org/mpatoolkit/Themesheets/H9_Mangrove_restoration.pdf)

Yáñez-Arancibia, A., R. R. Twilley y A. L. Lara-Domínguez. 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y Bosques* 4(2):319.