



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA**

**ESTUDIO DEL CRECIMIENTO DE LA MANCHA URBANA
DE PLAYA DEL CARMEN EN EL PERIODO 1990-2000
POR MEDIO DE LA PERCEPCIÓN REMOTA**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA

ADALBERTO MANZANILLA CANO

**DIRECTORA DE TESIS
DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA**

MÉXICO, D.F. 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

Agradezco la oportunidad que el Instituto Nacional de Estadística y Geografía me brindó para estudiar esta maestría en donde he tenido oportunidad de aprender las técnicas de percepción remota y el uso de herramientas para explotar las imágenes de satélite en beneficio de la sociedad.

Un agradecimiento especial a la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Geofísica por las enseñanzas y disposición de los Doctores que impartieron las asignaturas del posgrado y que amable y pacientemente nos transmitieron sus conocimientos.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	2
I.1 Aspectos geográficos.....	4
I.1.1 Ubicación geográfica.....	4
I.1.2 Regiones.....	5
I.1.3 Fisiografía.....	6
I.1.4 Estratigrafía.....	7
I.1.5 Edafología.....	8
I.1.6 Oceanografía.....	9
I.2 Aspectos climáticos.....	10
I.2.1 Clima.....	10
I.2.2 Presencia de huracanes.....	11
I.3 Aspectos bióticos.....	12
I.3.1 Flora.....	12
I.3.2 Fauna.....	13
I.4 Aspectos socio-demográficos.....	14
I.4.1 Origen de Playa del Carmen.....	14
I.4.2 Crecimiento poblacional.....	14
I.4.3 Expansión de la mancha urbana.....	16
I.5 Generalidades de Percepción remota.....	19
I.5.1 Definición.....	19
I.5.2 Orígenes.....	20
I.5.3 La serie Landsat.....	24
I.5.4 Principios físicos de la percepción remota.....	27
I.5.4.1 Espectro electromagnético.....	27
I.5.4.2 Regiones de importancia en el espectro electromagnético.....	28
I.5.4.3 Interacción objeto - energía electromagnética.....	30
I.5.4.4 Tipos de Resolución.....	31
I.6 Pre procesamiento de imágenes.....	34
I.6.1 Corrección atmosférica.....	34
I.6.2 Composiciones a color.....	35
I.6.3 Clasificación de imágenes.....	36
I.6.3.1 Clasificación no supervisada.....	36
I.6.3.2 Clasificación supervisada.....	36

CAPÍTULO II. MATERIALES Y METODOLOGÍA	38
II.1 Materiales.....	38
II.1.1 Imágenes de satélite	38
II.1.2 Insumos geomáticos	39
II.1.3 Software empleado	39
II.2 Metodología	39
CAPÍTULO III.- RESULTADOS.....	41
III.1 Conversión de formato de las imágenes.....	41
III.2 Recorte de imágenes	41
III.3 Corrección atmosférica.....	42
III.4 Compuestos a color	44
III.5 Clasificación no supervisada	45
III.6 Clasificación supervisada	45
III.7 Verificación de la clasificación.....	49
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN	52
IV.1 Matriz de cambio	57
IV.2 Mapas booleanos.....	59
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.- Ubicación geográfica del municipio de Solidaridad</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.- Regiones del estado de Quintana Roo</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3.- Fisiografía del municipio de Solidaridad</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4.- Geología del municipio de Solidaridad</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5.- Edafología del municipio de Solidaridad</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6.- Huracanes de mayor importancia en la zona norte del estado de Quintana Roo.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7.- Corte transversal del litoral.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 8.- Vegetación en Playa del Carmen.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 9.- Fotografía aérea</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10.- Fotografía aérea tomada.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11.- Primera imagen capturada por un satélite.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12.- Órbita de Landsat.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13.- Onda electromagnética.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14.- Respuesta foliar a la energía electromagnética.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15.- Escena completa del año 2000, banda 1.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16.- Recorte de la imagen del año 2000, banda 1.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17.- Composiciones RGB y NDVI</i>	<i>44</i>
<i>Figura 18.- Resultado del análisis del clúster a la imagen 2000.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 19.- Campos de entrenamiento definidos.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 20.- Clasificación supervisada para el año 1990</i>	<i>48</i>
<i>Figura 21.- Clasificación supervisada para el año 2000</i>	<i>49</i>
<i>Figura 22.- Puntos aleatorios sobre la imagen 1990 clasificada</i>	<i>50</i>
<i>Figura 23.- Puntos aleatorios sobre la fotografía aérea de 1991.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24.- Puntos aleatorios y mancha urbana de Playa del Carmen, año 1990 en Google Earth</i>	<i>51</i>
<i>Figura 25.- Mapas booleanos del área urbana de Playa del Carmen de los años 1990 y 2000</i>	<i>59</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.- Crecimiento poblacional en Playa del Carmen en el periodo 1921-2010</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2.- Estadísticas de población y vivienda en Playa del Carmen en el periodo 1980-2010.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3.- Ordenamientos vigentes en materia territorial.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 4.- Logros históricos de satélites civiles relacionados con la percepción remota</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 5.- Características de los satélites Landsat</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 6.- Bandas de microondas</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7.- Imágenes Landsat utilizadas</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8.- Coordenadas extremas de las sub-imágenes 1990 y 2000.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 9.- Niveles digitales antes y después de la corrección atmosférica</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 10.- Puntos aleatorios por cada clase en las imágenes clasificadas 1990 y 2000</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 11.- Superficies por año y clase (hectáreas)</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 12.- Matriz de errores de la clasificación por mínima distancia del año 1990</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 13.- Matriz de errores de la clasificación por la mínima distancia del año 2000</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 14.- Matriz de cambio en la zona de Playa del Carmen en el periodo 1990-2000 (en miles de m²).....</i>	<i>58</i>

ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1.- Crecimiento poblacional de Playa del Carmen en el periodo 1921-2010.</i>	<i>16</i>
<i>Gráfica 2.- Población y vivienda en el periodo 1980-2010</i>	<i>17</i>
<i>Gráfica 3a.- Histograma antes de la corrección atmosférica</i>	<i>43</i>
<i>Gráfica 3b.- Histograma después de la corrección atmosférica</i>	<i>43</i>
<i>Gráfica 4.- Firmas espectrales de la imagen 2000</i>	<i>47</i>
<i>Gráfica 5.- Firmas espectrales de la imagen 1990</i>	<i>48</i>
<i>Gráfica 6.- Superficies obtenidas por clase y por año.....</i>	<i>54</i>

RESUMEN

En este trabajo se estudió el porcentaje y superficie de crecimiento de la mancha urbana de Playa del Carmen, Quintana Roo, y el cambio del uso del suelo de su entorno en el periodo 1990-2000. Se emplearon dos imágenes del satélite Landsat 5: una del sensor MSS del año 1990 y otra del sensor TM del año 2000. Se efectuaron recortes de las imágenes originales para contar con un subconjunto de datos de ambos años en donde se garantizara el total cubrimiento de la zona urbana de la ciudad. Posteriormente se sometieron a una corrección atmosférica aplicando el método de Chavez (1988). Se efectuaron compuestos a color y se obtuvo el NDVI de ambas imágenes. Con estos productos se definieron las firmas espectrales de la zona urbana, vegetación sana, vegetación deteriorada, playa, mar subclase 1 y mar subclase 2. A partir de estas se realizó la clasificación supervisada por medio del método de la mínima distancia. La clasificación se sometió a una validación obteniendo una aproximación promedio mayor al 80%. Se generaron matrices de cambio y mapas booleanos.

En el periodo estudiado (1990-2000) la mancha urbana de Playa del Carmen incrementó su superficie en 6.0804 km² lo que representa un crecimiento del 222.83%. Este crecimiento fue en deterioro de las superficies antes ocupadas por la vegetación y franja costera de playa, evidenciando una posible afectación al entorno ecológico.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En el periodo 2005-2010, el estado de Quintana Roo presentó una tasa de crecimiento media anual de la población de 3.1 % (INEGI, 2011) y su crecimiento económico estaba por arriba de la media nacional, teniendo como principal pilar el sector turismo que genera más del 70 % del Producto Interno Bruto (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2005). El motor de la economía del estado es pues, el turismo, siendo los principales desarrollos los que están ubicados en la zona norte de la entidad, concretamente en los municipios de Isla Mujeres, Benito Juárez, Solidaridad, Cozumel y Tulum, este último creado en 2008. La Riviera Maya está comprendida en esta misma zona, aunque la Costa Maya se encuentra en la zona sur, en el municipio de Othón P. Blanco.

De estos municipios turísticos, Solidaridad atrae la atención de la mano de obra, principalmente, en el ramo de la construcción, lo que ha incrementado el flujo migratorio hacia esta zona con la esperanza de encontrar un trabajo bien remunerado y mejorar la calidad de vida de las familias. La ciudad de Playa del Carmen es la cabecera municipal y constituye a la vez el principal centro urbano, turístico y de servicios del municipio y de la Riviera Maya presentando un crecimiento poblacional anual de poco más del 20 % en los últimos tres lustros (PNUMA *et al.*, 2008).

En general, en la región Caribe norte y, particularmente, en la Riviera Maya (Playa del Carmen), se ha observado en los últimos años un gran desequilibrio en la infraestructura urbana, medio ambiente y desarrollo sustentable (Campos, 2007). Esto pese a que las acciones de planeación urbana y ordenamiento del territorio son acordes a las prioridades establecidas en las agendas de organismos internacionales y nacionales. El crecimiento urbano de Playa del Carmen se presenta de manera acelerada y, aún más, de forma descontrolada; lo que ha traído que los servicios e infraestructura sean insuficientes (PNUMA *et al.*, 2008).

Los trabajos desarrollados en materia urbana y de ordenamiento del territorio en el estado de Quintana Roo y en el municipio de Solidaridad han sido realizados principalmente por el sector oficial con la publicación de diversos decretos específicos en el tema urbano y del territorio; siete de ellos entre 2001 y 2009. En el ámbito del medio ambiente, los mayores esfuerzos al parecer están encabezados por la academia y Organizaciones No Gubernamentales. Lo anterior hace

evidente (y urgente) la necesidad de realizar mayores estudios en la zona relacionados con la expansión urbana por parte de las áreas especializadas.

Algunos estudios revisados refieren el uso de imágenes de satélite para la determinación del crecimiento de ciudades en diferentes partes del mundo. Herrera (2001) efectuó un estudio del crecimiento de la ciudad de Valdivia, Chile, con diferentes sensores (LandSat TM, SPOT HRV, ERS 2, e incluso productos fotográficos), en donde concluye que dichos sensores individualmente no tendrían el mismo peso comparado con su aplicación integrada. La idea de integrar procedimientos y datos en los estudios de gestión del territorio ha sido también descrita por Ruiz *et al.* (2007), quien enfatiza que la aplicación tiene mayores posibilidades en aquellos espacios urbanos que presentan crecimientos importantes y en donde se requieren estudios de evolución de manera periódica. Torres-Vera *et al.* (2009) concluyen que el uso integral de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica resultó eficaz en el monitoreo y análisis de los patrones de crecimiento urbano en el suroeste de la ciudad de México utilizando imágenes de satélite Landsat de 1973, 1992 y 2000.

Probada, la utilidad de las imágenes obtenidas por los sensores remotos en el estudio de las ciudades, así como el interés de determinar el grado de crecimiento que ha experimentado la ciudad de Playa del Carmen en las últimas décadas son factores que motivaron la realización del presente trabajo con la ayuda de imágenes del satélite Landsat, sensores MSS y TM, en 1990 y en 2000. Para ello se planteó el siguiente objetivo.

Objetivo general

- Determinar la superficie y porcentaje de crecimiento de la mancha urbana de Playa del Carmen y el cambio del uso del suelo en lugares aledaños en el periodo 1990-2000.

En las secciones siguientes se mencionan los aspectos geográficos, climáticos, bióticos y socio demográficos que caracterizan la zona de estudio. De igual modo se detallan algunos rasgos particulares de la localidad de Playa del Carmen relacionados con su origen, población y crecimiento urbano. Asimismo se revisan los conceptos de la percepción remota.

En el Capítulo II se describen los materiales utilizados y la metodología aplicada en las diferentes etapas de procesamiento de las imágenes de satélite. Los resultados obtenidos se detallan en el Capítulo III, resumiendo en tablas los cambios que se presentaron en las coberturas estudiadas en

el periodo 1990-2000. En el Capítulo IV se discuten los resultados alcanzados y se describen los posibles factores que incidieron en ellos. Finalmente, en el Capítulo V se pueden encontrar las conclusiones del presente trabajo de investigación.

I.1 Aspectos geográficos

I.1.1 Ubicación geográfica

La ciudad de Playa del Carmen es la cabecera municipal de Solidaridad, estado de Quintana Roo (figura 1). Se localiza en las coordenadas geográficas, 20° 37' 39" de latitud norte y 87° 04' 52" de longitud oeste. Su altitud es de aproximadamente 15 metros. Cartográficamente se encuentra en la carta topográfica escala 1:50 000, clave F16C69 (INEGI, 1988). El municipio de Solidaridad fue creado el 28 de Julio de 1993 y se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas 20° 20' y los 20° 49' de latitud norte y entre 86° 55' y los 88° 05' de longitud oeste.

Solidaridad tiene una extensión territorial de 2 205 km² que representa el 4.33 % respecto a la superficie total del estado de Quintana Roo.

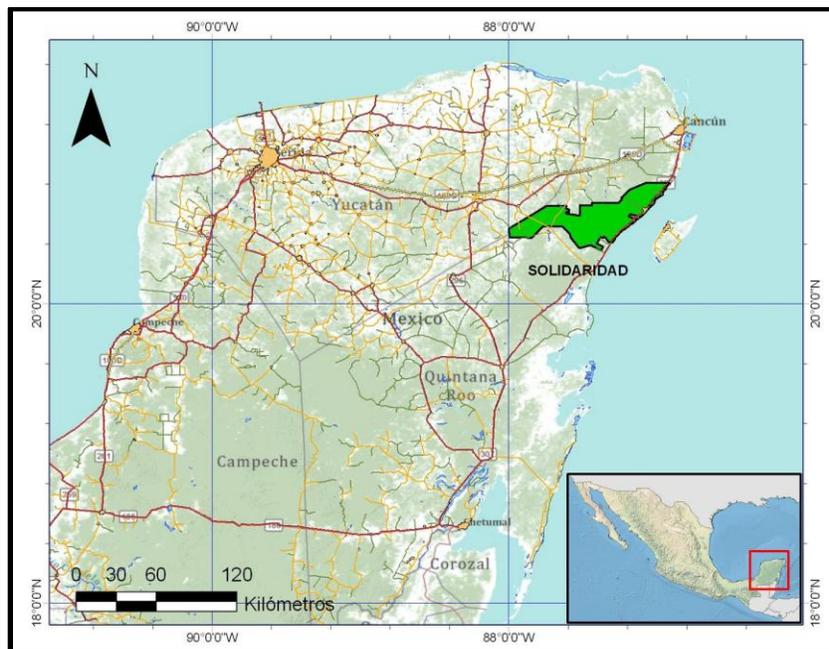


Figura 1.- Ubicación geográfica del municipio de Solidaridad

Fuente: Elaboración propia

Sus límites territoriales son:

- al norte colinda con el municipio de Benito Juárez;
- al noroeste con el municipio de Lázaro Cárdenas;
- al este con el mar Caribe y el municipio de Cozumel; y
- al sur con el municipio de Tulum.

I.1.2 Regiones

El estado de Quintana Roo, por las características particulares de cada zona, se ha dividido en tres grandes regiones:

- Caribe norte;
- Maya; y
- Frontera sur.

Playa del Carmen se ubica dentro de la región Caribe norte, que comprende de manera íntegra los municipios de Isla Mujeres, Benito Juárez y Cozumel, y de forma parcial el municipio de Solidaridad. Su principal característica es que agrupa las zonas de mayor desarrollo turístico en el estado (concentra el 90 % de la infraestructura turística estatal), lo que la coloca como la región de mayor importancia no solo a nivel estatal sino también en el ámbito nacional por lo que significa en la captación de divisas. La población que la conforma representa casi las dos terceras partes del total estatal (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2002), aproximadamente 554 971 habitantes al año 2000 (Campos, 2007).

Las regiones se ilustran en la figura 2: en color rosado la región Maya, en color amarillo la región Caribe Norte, y en color naranja la región Frontera Sur. El polígono en color verde representa las áreas naturales protegidas denominadas Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an y Uaymil, que no fueron incluidas en ninguna de las anteriores (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2002). El polígono del municipio de Solidaridad se observa en contorno rojo.

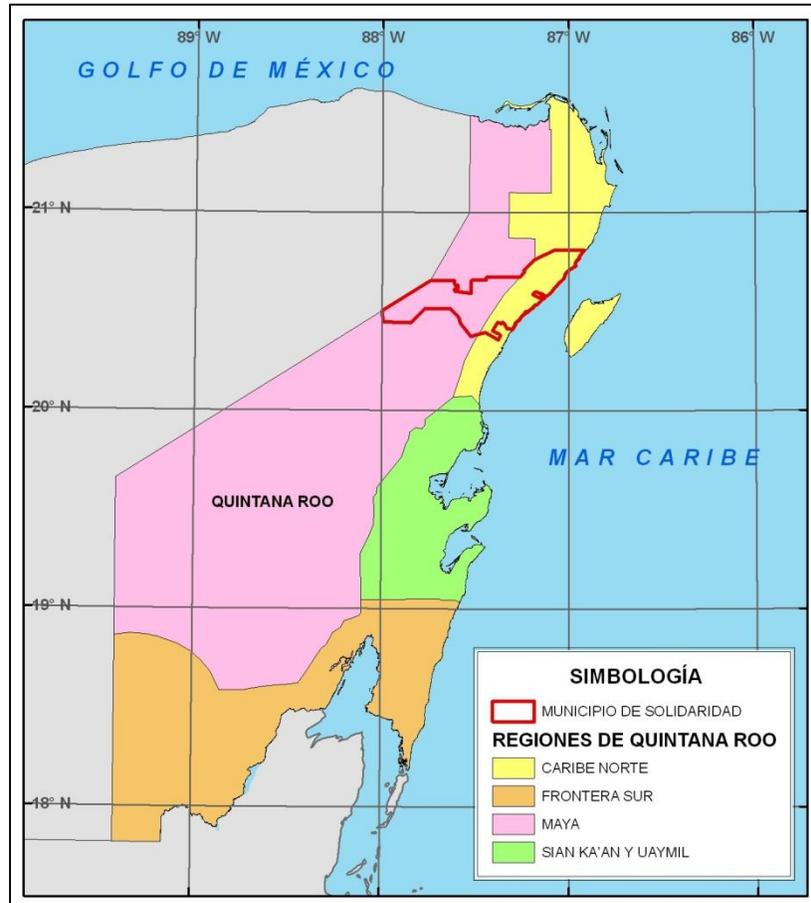


Figura 2.- Regiones del estado de Quintana Roo

Adaptado de Gobierno del Estado de Quintana Roo (2002).

I.1.3 Fisiografía

La zona geográfica en donde se localiza la península de Yucatán corresponde en general a la unidad orogénica Plataforma Yucateca, constituida por rocas calizas que se formaron por sedimentación marina, pues en un principio se encontraba cubierta por un mar somero (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2002). Con el paso del tiempo emergió caracterizándose por un relieve llano y con una altitud mínima.

El estado de Quintana Roo se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica denominada Península de Yucatán, localizándose dentro de su extensión territorial tres sub-provincias:

- a) Carso y Lomeríos de Campeche
- b) Carso Yucateco

c) Costa Baja de Quintana Roo

La ciudad de Playa del Carmen está asentada en la sub-provincia Carso Yucateco misma que comprende parte del centro y norte del estado, ocupando una superficie aproximada de 54.52 % respecto del total estatal (PNUMA *et al.*, 2008; y Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2002). En la figura 3 se aprecian las sub-provincias fisiográficas que se localizan en el estado de Quintana Roo, en color verde la subprovincia carso yucateco, en color amarillo la subprovincia carso y lomeríos de Campeche, y en color naranja la subprovincia costa baja de Quintana Roo.



Figura 3.- Fisiografía del municipio de Solidaridad

Adaptado de INEGI (2011).

I.1.4 Estratigrafía

Prácticamente en la totalidad de la península de Yucatán existen afloramientos de sedimentos calcáreos de origen marino, que fueron depositados en el transcurso de la era Cenozoica (Terciario

Superior). En algunas áreas se presenta bajo esta capa, una caliza blanda que en la región se denomina *sascab* (Gobierno del Municipio de Solidaridad, 2002) cuya raíz etimológica maya significa tierra blanca.

Los basamentos de calizas conforman una geomorfología con relieve cárstico cuyas geformas principales la constituyen los cenotes, cavernas, dolinas y poljes. En el Cretácico Superior ocurrieron cambios en la península principalmente en la porción central que comenzó a emerger hasta quedar expuesta (Gobierno del Estado de Quintana Roo y FONATUR, 2002).

De acuerdo al Atlas Nacional Interactivo de México publicada por el INEGI (figura 4), en la zona circundante a Playa del Carmen no hay evidencias de rocas ígneas ni rocas metamórficas, pero se aprecian algunas fallas con orientación noreste-suroeste de poca importancia.

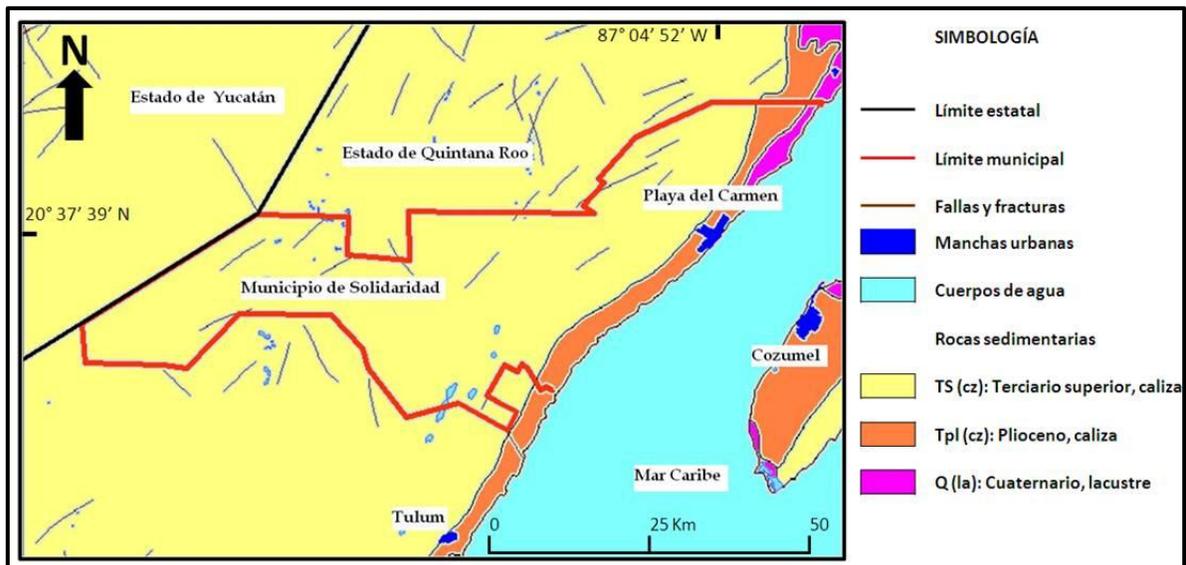


Figura 4.- Geología del municipio de Solidaridad

Adaptado del Atlas Nacional Interactivo de México (INEGI, 2010).

I.1.5 Edafología

En el estado de Quintana Roo se presentan suelos poco profundos y asociaciones de dos o más tipos, predominando los litosoles y las rendzinas (INEGI, 2002). En la parte norte del estado se presentan suelos poco aptos para la agricultura, predominando afloraciones rocosas que hacen difícil el cultivo de especies vegetales, aunque se aprovechan algunas áreas pequeñas dispersas con tierra de cierta profundidad para la milpa.

La carta edafológica del INEGI (1984a) indica que en gran parte del municipio de Solidaridad hay una fuerte presencia de Rendzina (E), y en menor presencia Solonchak (Zm) y Gleysol (Gm); principalmente en terrenos aledaños a la costa, en donde se asienta la capital municipal (figura 5). Esto se confirma en el reporte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente donde se indica que en el municipio de Solidaridad dominan los suelos conocidos como Rendzinas y Litosoles, así como Solonchak órtico de textura media (PNUMA *et al.*, 2008).

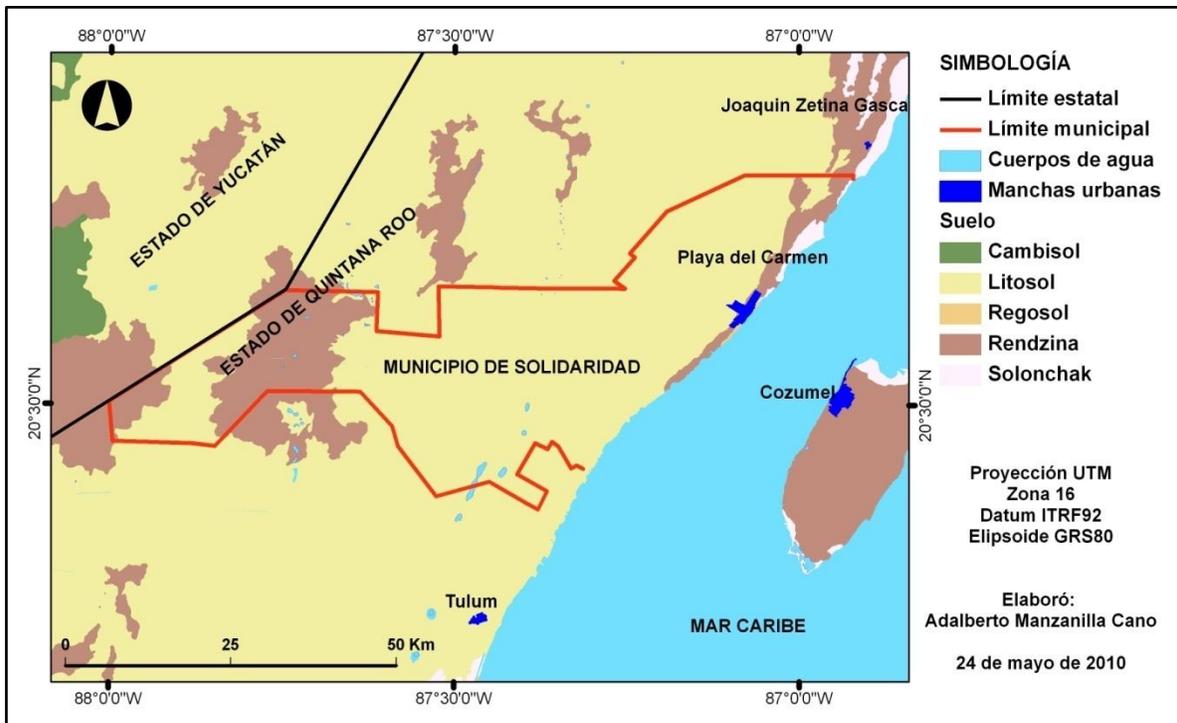


Figura 5.- Edafología del municipio de Solidaridad

Fuente: INEGI (1984a).

I.1.6 Oceanografía

En la región del Mar Caribe mexicano los vientos alisios prevalecen tanto en dirección como en magnitud. Durante el invierno provienen del este y noreste, en el verano del este y sureste, con una rapidez que varía entre 3.5 m/s a 10.5 m/s. No obstante, este patrón presenta anomalías durante el invierno que se manifiestan como vientos violentos denominados “nortes” sobre el Golfo de México y la parte norte del Mar Caribe, en tanto que durante el verano y otoño se presentan tormentas tropicales y huracanes por el calentamiento de la superficie marina (Aguirre, 2002). De acuerdo a los registros históricos en el periodo 1999-2006 publicados en el Atlas

Climático Digital de México, el comportamiento del viento climatológico superficial mensual en el mar, frente a la costa oriente de Quintana Roo, durante octubre a enero, presenta una magnitud general entre 4 m/s a 8 m/s con una dirección predominante hacia el suroeste. Entre febrero y agosto (excepto junio), la dirección del viento es hacia el oeste y oeste-suroeste; durante junio y septiembre la dirección es hacia el oeste-noroeste, con magnitudes cercanas a 8 m/s el primer mes y cercanas a 3 m/s para el segundo (Fernández *et al.*, 2010).

El campo de velocidades superficiales frente a las costas de Playa del Carmen muestra una corriente predominante hacia el norte y paralela a la costa (El Colegio de la Frontera Sur, 2008) conocida como la corriente de Yucatán (Schmitz y McCartney, 1993; Johns *et al.*, 2002; citados por El Colegio de la Frontera Sur, 2008). Esta corriente es dividida en su trayectoria por la isla de Cozumel, fluyendo a través del canal de Cozumel, donde se tiene cerca del 20 % del transporte marino (Chávez *et al.*, 2003 citado por El Colegio de la Frontera Sur, 2008). En cuanto a la línea de costa, ésta presenta gran dinamismo en el transporte de arenas de playa con un movimiento anual de forma cíclica, por lo que el paisaje varía durante diferentes épocas (Gobierno del Municipio de Solidaridad, 2002).

I.2 Aspectos climáticos

I.2.1 Clima

El estado de Quintana Roo, al igual que el resto de la península, presenta el régimen climático de tipo cálido sub-húmedo (Aw2), en el que influye tanto su ubicación en la zona intertropical, así como factores locales como las influencias marinas (Mar Caribe y Golfo de México) y la reducida elevación sobre el nivel del mar (INEGI, 2002).

El área de estudio se ubica entre Puerto Morelos y la comunidad de Xcalak, franja costera en la que rige el subtipo Aw2, con una temperatura media anual de 25.8 °C, y con una precipitación anual de 1 288 mm. La precipitación en el estado tiene una tendencia creciente en sentido norte-sur y oeste-este. Las mayores precipitaciones se presentan en una franja de aproximadamente 35 km de ancho localizada entre Playa del Carmen (al norte del estado) hasta la península de Xcalak, al sur (INEGI, 2002).

I.2.2 Presencia de huracanes

En la figura 6 se presentan los huracanes de categoría 3, 4 y 5 que han azotado la zona de Playa del Carmen en un radio de acción de 100 km. La región ha sido azotada por diversas tormentas tropicales de acuerdo a los registros del *National Hurricane Center* de la NOAA (2010); sin embargo, los más destructivos se han presentado en años recientes si se toma en cuenta el registro más antiguo para la zona que data de 1852. De esta manera se tiene que en orden de categoría *Gilbert* (categoría 5) impactó la zona en 1988; *Charlie* en 1951, *Emily* y *Wilma* en el año 2005 con categoría 4; *Roxanne* en 1995 y otros dos sin nombre en 1903 y 1909 con categoría 3. De acuerdo a estos datos, la trayectoria de *Gilbert* es la que afectó directamente con su ojo a Playa del Carmen, que en 2005 era una localidad con cerca de 3 000 habitantes y 700 viviendas.

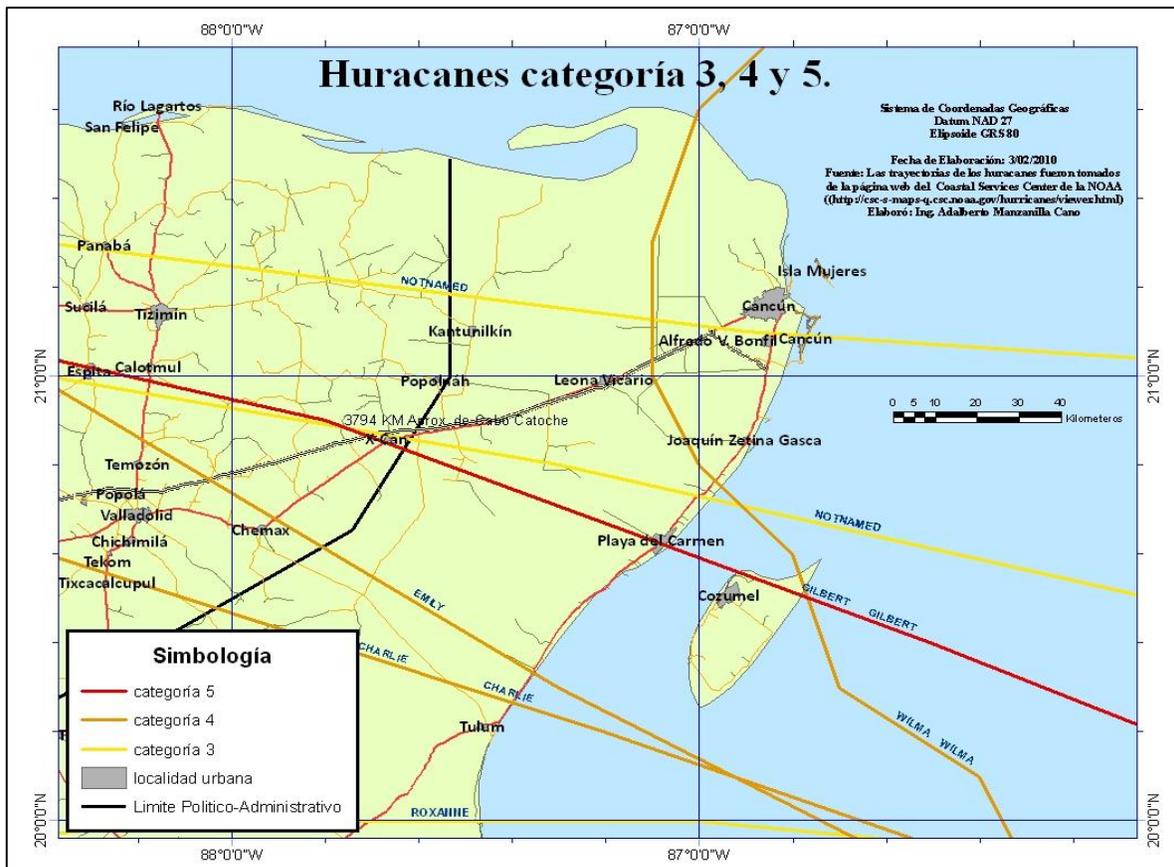


Figura 6.- Huracanes de mayor importancia en la zona norte del estado de Quintana Roo.

La trayectoria de los huracanes están señaladas con líneas de colores: en rojo los de categoría 5; en naranja los de categoría 4; en amarillo los de categoría 3. De manera paralela a su trayectoria se indica el nombre del evento. Adaptado de NOAA (2010).

I.3 Aspectos bióticos

I.3.1 Flora

La vegetación que está presente en el corredor turístico Cancún-Tulum tiene una distribución acorde a sus características geoecológicas, con lo que se determinan tres tipos fisonómicos que se aprecian en la figura 7 (Gobierno del Estado de Quintana Roo y FONATUR, 2002).

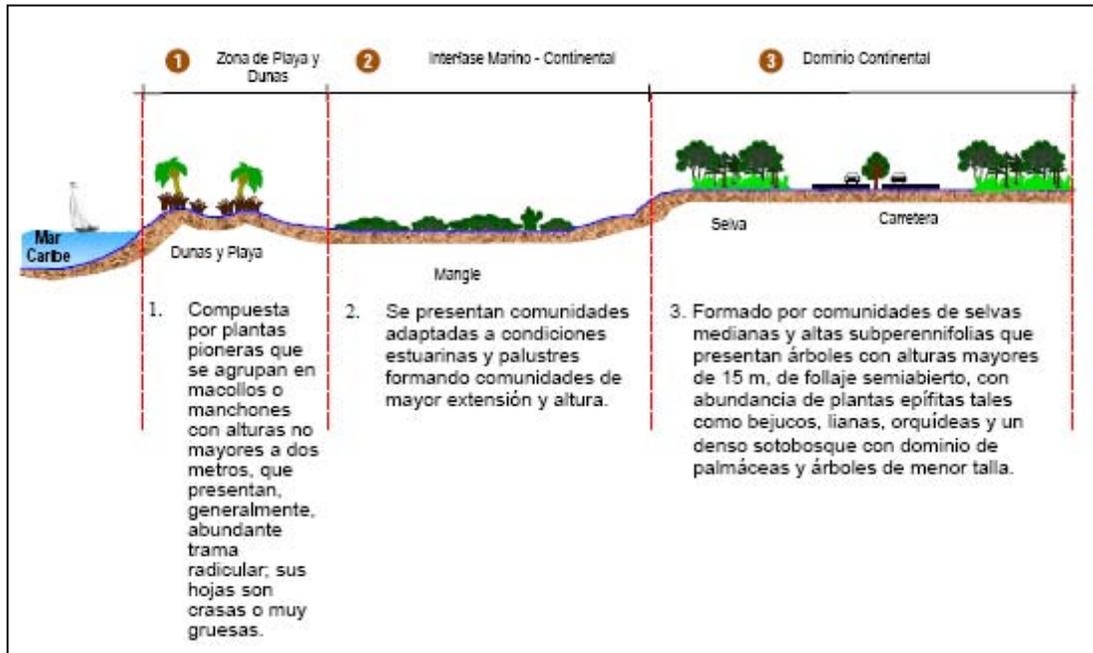


Figura 7.- Corte transversal del litoral

Fuente: Gobierno del Estado de Quintana Roo y FONATUR, 2002

La ciudad de Playa del Carmen es atravesada a lo largo de su extensión por la carretera federal 307 en el sentido NE-SW. Esta vía está construida de manera paralela a la costa, a una distancia aproximada de 1000 m. En esta zona próxima al mar, en lugares aledaños a la ciudad y a lo largo de la costa (NE y SW) es posible encontrar algunas comunidades de manglares y ciénegas que albergan especies como mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle blanco (*Lagumcularia racemosa*). También existen zonas con especies epífitas (bejucos, lianas, orquídeas) y un sotobosque dominado por palmáceas y árboles menores. Al oeste de la vía mencionada se encuentra selva mediana sub-perennifolia, así como vestigios de selva mediana sub-caducifolia y selva baja sub-perennifolia, que aportan maderas preciosas como son caoba y cedro. También habitan las especies conocidas comúnmente como *chachén*, zapote y *chaka'a* (Gobierno del

Municipio de Solidaridad, 2002). Se observan manchones de pastizales cultivados una distancia cercana a los 14 km al suroeste y de 1 km al noreste de la ciudad estudiada (figura 8). Al este de la mancha urbana y colindando con ella se localiza una zona de manglar que llega hasta la costa, en una franja de poco más de 500 m de ancho (INEGI, 1984b).

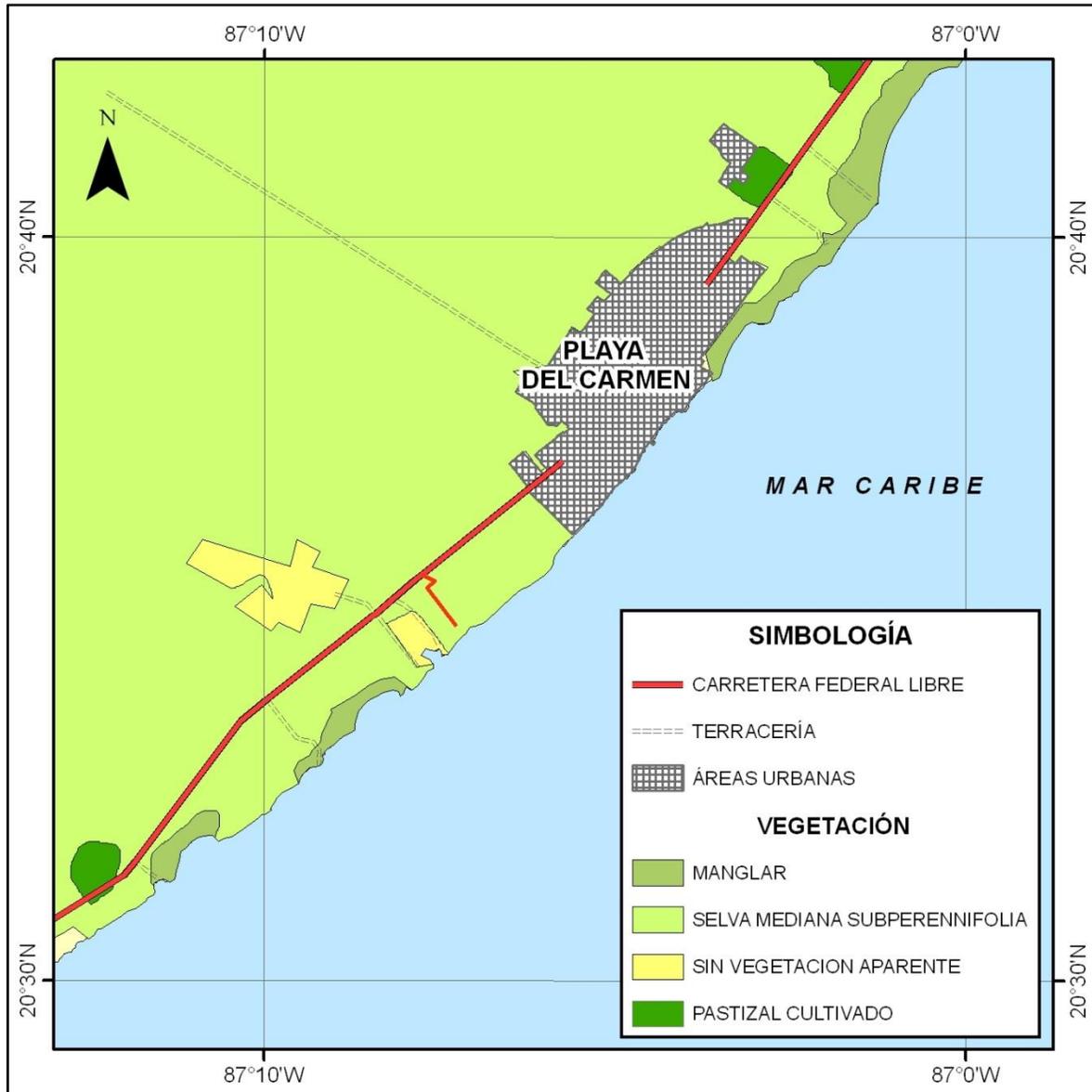


Figura 8.- Vegetación en Playa del Carmen. INEGI (1984b).

I.3.2 Fauna

Dentro de las especies que habitan en la zona de estudio, se encuentran aquellas que están asociadas con la existencia de cuerpos o fuentes de agua. En el caso de los cenotes se encuentran

peces y diversas especies de artrópodos, arañas e insectos (Gobierno del Municipio de Solidaridad, 2002). En las zonas secas proliferan especies que toleran estas condiciones, sobresaliendo los reptiles (Gobierno del Estado de Quintana Roo y FONATUR, 2002). En general, la fauna se forma por:

- Mamíferos: venado, jaguar, ocelote, manatí, nutria, mono araña, mono aullador, tapir, jabalí, zorra y tejón;
- Reptiles: boa, tortugas, cocodrilos e iguanas;
- Aves: tucán, flamingo, guacamaya, perico, pájaro carpintero, faisán, chachalaca, garza, cenizote, colibrí, pelícano y halcón entre otros;
- Peces: boquinete, dorado, mero y otros multicolores de gran belleza;
- Moluscos y crustáceos: pulpo, caracol y langosta (Gobierno del Municipio de Solidaridad, 2002).

I.4 Aspectos socio-demográficos

I.4.1 Origen de Playa del Carmen

En la literatura que refiere a los orígenes de Playa del Carmen, se relaciona a esta ciudad con la antigua *Xamanhá*, asentamiento maya cuya toponimia significa "Agua del Norte", *xaman*: norte y *há*: agua. Cuando Francisco de Montejo inicia la conquista de la península de Yucatán, en 1597, pasa por *Xamanhá*, que pertenecía al cacicazgo maya de *Ecab*. Alonso Dávila, en ese mismo año, en su camino al cacicazgo de *Chaktemal* (hoy Chetumal), lo bautiza como Salamanca de *Xamanhá*. Aunque fue hasta 1902, año en que se crea el Territorio de Quintana Roo, que dicho lugar cambia de nombre y desde entonces es conocido como Playa del Carmen (INEGI, 2011).

I.4.2 Crecimiento poblacional

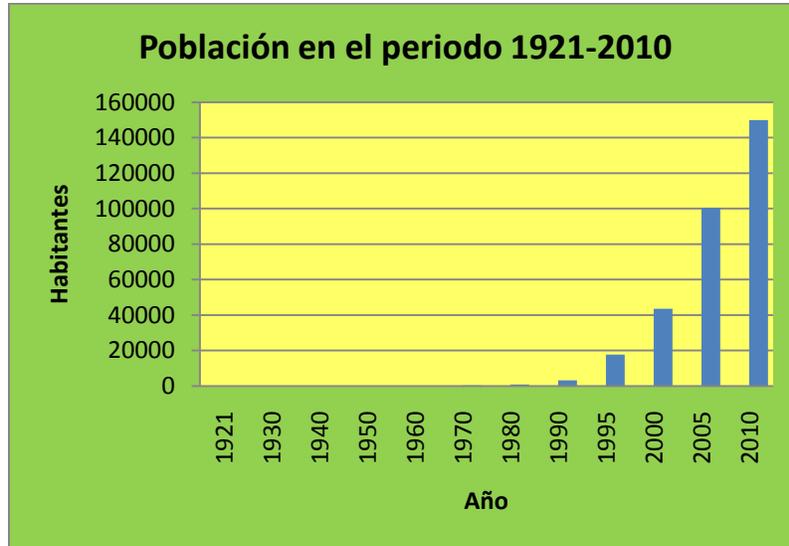
El municipio de Solidaridad, cuya cabecera es la ciudad de Playa del Carmen, se ubica en la región Caribe Norte que se caracteriza por la presencia de áreas costeras, fuerte infraestructura turística (más del 90 % estatal), y gran dinamismo incrementado por la explosión demográfica que ahí se presenta. La población del municipio al año 2010 fue de 159 310 habitantes. En el periodo 2005-2010 la ciudad de Playa del Carmen presentó una tasa de crecimiento media anual del 8.3 % (INEGI, 2011).

En la tabla 1 se resume el crecimiento poblacional que ha tenido Playa del Carmen desde el año 1921, en el que se reportó como una localidad menor con variaciones demográficas hasta el año 2010. De acuerdo a los resultados censales, en 1970 inició su repunte poblacional, mismo que sigue en constante ascenso (gráfica 1).

Tabla 1.- Crecimiento poblacional en Playa del Carmen en el periodo 1921-2010

Fuente	Evento Censal	Categoría política	Total de Habitantes
Censo	1921	Montería chiclera	60
Censo	1930	Montería	25
Censo	1940	Pueblo	89
Censo	1950	Pueblo	69
Censo	1960	Pueblo	93
Censo	1970	Pueblo	232
Censo	1980	Pueblo	737
Censo	1990	Indefinida	3 098
Conteo	1995	Ciudad	17 621
Censo	2000	Ciudad	43 613
Conteo	2005	Ciudad	100 383
Censo	2010	Ciudad	149 923

Adaptada de INEGI (2011).



Gráfica 1.- Crecimiento poblacional de Playa del Carmen en el periodo 1921-2010. INEGI (2011).

De acuerdo a estimaciones del Consejo Estatal de Población de Quintana Roo (COESPO, 2010), en el año 2010 dicha localidad tendría una población total aproximada de 167 967 habitantes. Esta cifra difiere de los 149 923 habitantes contabilizados por el INEGI (2011) como resultado del Censo de Población y Vivienda 2010.

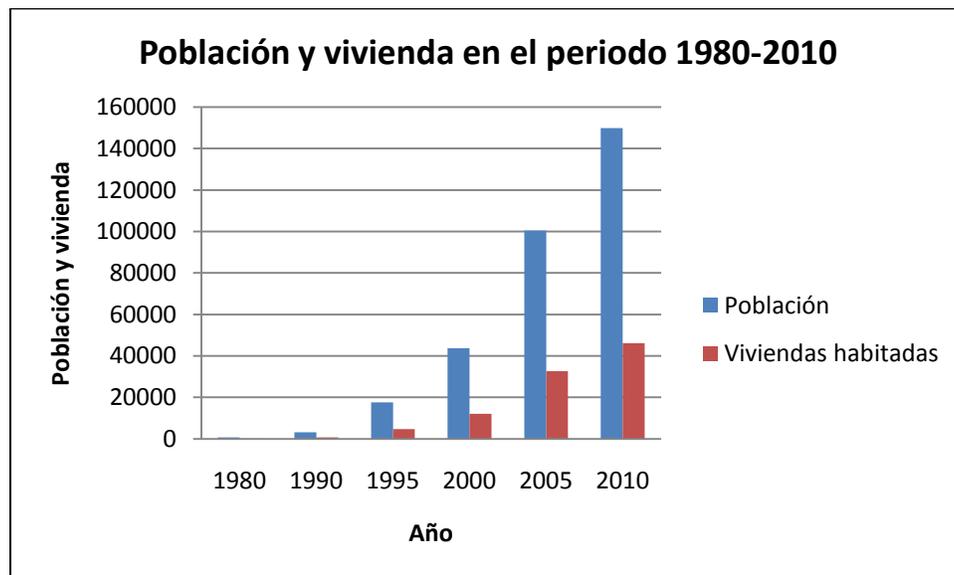
I.4.3 Expansión de la mancha urbana

El crecimiento poblacional de Playa del Carmen en los últimos veinte años (1990-2010) ha propiciado a la vez una necesidad de contar con mayor número de viviendas y de suelo destinado para vivienda. En esta zona del país, el crecimiento de las ciudades es preponderantemente en sentido horizontal, por lo que se infiere que la superficie ocupada por la mancha urbana ha ido en constante aumento si se toman en cuenta la evolución poblacional y de vivienda en el periodo antes mencionado. En la tabla 2 y gráfica 2 se muestra la cantidad de viviendas que se han reportado en los eventos oficiales levantados por el INEGI entre 1980 y 2010, destacando que en 1980 se habían reportado 149 viviendas en contraste con las encontradas en el 2010, las cuales ascienden a 46 145 (INEGI, 2011).

Tabla 2.- Estadísticas de población y vivienda en Playa del Carmen en el periodo 1980-2010

Año censal	Población	Viviendas habitadas
1980	737	149
1990	3 098	711
1995	17 621	4 646
2000	43 613	12 125
2005	100 383	32 581
2010	149 923	46 145

Adaptado de INEGI (2011)

**Gráfica 2.- Población y vivienda en el periodo 1980-2010**

Adaptado de INEGI (2011).

El turismo ha sido, sin duda alguna, el detonante que ha propiciado el acelerado crecimiento de Playa del Carmen; alrededor de 1970 no era más que un pueblo de pescadores que servía como punto de contacto entre la zona continental de la península y la isla de Cozumel. El turismo es considerado por Campos (2007) como un factor de crecimiento y desarrollo económico y social de la ciudad, señalándolo como el “motor” no solo de la economía local, sino también a nivel regional en la costa norte del estado de Quintana Roo. Aparejado a esta actividad se encuentra la

construcción, que al igual que otras actividades ligadas y dependientes del sector turístico (prestadores de servicios varios, industria restaurantera, hotelería, arrendadoras de vehículos, etc.) atrae a inmigrantes con la esperanza de encontrar mejores empleos que en su lugar de origen y mejores condiciones de vida, lo cual dispara el requerimiento de suelo urbano y, en muchas ocasiones, supera la capacidad de respuesta de las autoridades. La dinámica urbana explosiva, de acuerdo con Campos (2007), es generada por el crecimiento de la actividad turística, creando un esquema de desarrollo desequilibrado. Para atender esta problemática y prever las necesidades propias de una ciudad en pleno desarrollo se han elaborado y publicado periódicamente distintos ordenamientos relacionados con el desarrollo urbano y cuidado del medio ambiente en la zona de estudio (ver tabla 3). Algunos de estos ordenamientos se han actualizado debido al rápido desarrollo de la zona en los últimos años.

Uno de los objetivos del Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Solidaridad, publicado en el 2009, es “generar las condiciones para detener el avance de asentamientos humanos irregulares por medio del establecimiento de zonas específicas para el crecimiento urbano y mediante la promoción de otras formas, suficientemente rentables y menos agresivas para el ambiente, de aprovechar el territorio” (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2009).

Tabla 3.- Ordenamientos vigentes en materia territorial

Ordenamiento	Fecha *
Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Corredor Cancún-Tulum (actualizado el 16 de noviembre de 2001).	09/06/1994
Programa Director de Desarrollo Urbano del Centro de Población Playa del Carmen 2002-2026.	01/04/2002
Programa Estatal de Desarrollo Urbano.	22/04/2002
Programa Subregional de Desarrollo Urbano de la Región Caribe Norte del Estado de Q. Roo.	30/05/2003
Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Reserva Poniente de Playa del Carmen, Q. Roo 2003-2008.	03/11/2003
Plan Parcial de Desarrollo Urbano No. 1 del Centro Urbano de Población de Playa del Carmen 2008-2013, Mpio. de Solidaridad, Q. Roo, denominado “Del Fuego y del Agua”.	29/05/2008
Programa de Ordenamiento ecológico Local del Mpio. de Solidaridad.	25/05/2009

*La fecha se refiere a su publicación en el Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo.

I.5 Generalidades de Percepción remota

I.5.1 Definición

La percepción remota puede definirse a partir de su propia composición: percepción y remota (Real Academia Española, 2010).

Percepción: Acción y efecto de percibir.

Percibir: Recibir por uno de los sentidos las imágenes, impresiones o sensaciones externas.

Remota: Distante

Distante: Apartado, remoto, lejano.

Con estos significados se puede entender de manera literal que la Percepción Remota como tal, es la acción de recibir por uno de los sentidos (en este caso la visión) imágenes de objetos que se encuentran lejanos. A partir de esta base conceptual se pueden derivar extensas definiciones que describen de una manera más aproximada la esencia de la percepción remota. En este sentido se puede interpretar la percepción remota como:

“...la adquisición, procesamiento y análisis de datos superficiales y cercanos a la superficie recolectados por sistemas de satélite y aerotransportados” (US Army Corps of Engineers, 2003).

También puede definirse como *“...el estudio de un objeto sin tener un contacto físico con él - en el cual - se incluyen las mediciones de las propiedades físicas”* - del objeto (Aguirre, 2002).

Finalmente, una definición de la percepción remota en su forma aplicada y que involucra otros conceptos se refiere a *las técnicas empleadas en la adquisición y análisis de datos o información espacialmente organizados en un arreglo de puntos (píxeles) de la escena captada mediante la aplicación de uno o más dispositivos de grabación, sin estar en contacto físico con el objeto observado* (Short, 2009). Estas técnicas utilizan la radiación electromagnética, campos de fuerza, o energía acústica mismas que son captadas por los instrumentos de medición que pueden ser cámaras de grabación y de radiación, escáneres, rayos láser, receptores de radio frecuencia, sistemas de radar, sonar, dispositivos térmicos, detectores de sonido, sismógrafos, magnetómetros, gravímetros y otros instrumentos (Short, 2009).

I.5.2 Orígenes

Desde los albores de la humanidad, cuando el hombre miró al cielo y tuvo la capacidad de describir, y luego analizar e interpretar los fenómenos que ocurrían a cientos o miles de kilómetros o cientos de años-luz de distancia, probablemente se fue gestando lo que en la actualidad conocemos como percepción remota. No obstante, es a partir de la observación y comparación de sucesos distanciados en el tiempo que se fueron forjando las primeras inquietudes de la humanidad para estudiarlos.

Se ha vinculado el nombre de percepción remota con las primeras misiones interplanetarias de sondas espaciales no tripuladas, que llevaban a bordo cámaras de televisión que permitieron capturar imágenes de la superficie de otros planetas (Lira, 1987).

La teledetección como tecnología comenzó con las primeras fotografías en el siglo XIX (Short, 2009). En el periodo comprendido entre la Primera y Segunda Guerra Mundial la fotografía aérea fue utilizada para reconocimiento militar (National Research Council, 2001).

La idea de fotografiar la superficie de la Tierra desde arriba, para obtener la denominada foto aérea, surgió en la década de 1860 con imágenes tomadas desde globos. El primer éxito obtenido fue una foto de un valle francés, ahora perdida, logrado por Gaspard Félix Tournachon, también conocido como Nadar, fue un famoso fotógrafo francés y aeronauta que hacía estudios de la tierra a partir de fotografías aéreas (Figura 9).



Figura 9.- Fotografía aérea desde globo en el siglo XIX.

Short, 2009.

En la figura 10 se aprecia una foto tomada desde un cometa en 1889 por A. Balut, que abarca la región de Labrugauere, Francia (Short, 2009).



**Figura 10.- Fotografía aérea tomada desde un cometa.
Short, 2009.**

Aunque Nadar sentó las bases para el futuro de la teledetección, no tuvo éxito en sus actividades aéreas. Sin embargo, sus observaciones fotográficas llamaron la atención de los militares (NASA, 2001; Short, 2009), lo que posiblemente los indujo a efectuar estudios más concretos en la materia. En 1903, un intento innovador para evitar los globos peligrosos o cometas inciertos fue instalar una cámara a una paloma mensajera. Estas cámaras tomaban una foto cada treinta segundos (NASA, 2001).

Las primeras fotografías tomadas desde un avión fueron obra de LP Bonvillain, quien acompañaba a Wilbur Wright en un vuelo de demostración en Francia en 1908. El biplano sustituyó al globo aerostático en la observación de las posiciones enemigas en la Primera Guerra Mundial (NASA, 2001).

Los programas de teledetección por encima de la atmósfera se originaron en los albores de la era espacial (tanto de Rusia como de Estados Unidos). El 24 de octubre de 1946, fue lanzado por el ejército de Estados Unidos, el misil de la serie V-2 llevando una cámara de cine, con la que se adquirió una serie de vistas de la superficie de la Tierra a 134 km de altitud. Cohetes de sondeo más pequeños, tales como la WAC Corporal, y el Viking y la serie de Aerobee, fueron desarrollados y lanzados por los militares en los años 40 y finales de los años 50 (Short, 2009).

Los primeros sensores sin fotos fueron las cámaras de televisión montadas en naves espaciales no tripuladas dedicadas principalmente a la observación de las nubes. El primer satélite meteorológico de EE.UU. TIROS-1, fue puesto en órbita el 1 de abril de 1960 por un cohete Atlas (Short, 2009), obteniendo la primera imagen adquirida de la Tierra por un satélite (Ver figura 11).



Figura 11.- Primera imagen capturada por un satélite.

Short, 2009.

En 1972, con la finalidad de aplicar esta tecnología a la cartografía y la evaluación de recursos naturales, se inició el programa ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) y se produjo el lanzamiento del primer satélite de la serie. El programa se renombró como LANDSAT y se puso en órbita el segundo satélite en 1975, los lanzamientos continuaron con cierta regularidad hasta poner el último, el Landsat 7 en 1999 (González y Rial, 2004).

A LANDSAT siguieron otros proyectos, tales como el SKYLAB en 1973, el satélite oceanográfico SEASAT en 1978, el satélite francés SPOT en 1986, el japonés MOS-1 en 1987, el Indio IRS-1A en el año 1988 (González y Rial, 2004) y muchos más en los años subsecuentes.

En la tabla 4 se hace un recuento de algunos momentos que quedaron registrados en la historia por estar ligados con la puesta en órbita de satélites de percepción remota para el estudio de la superficie terrestre y de la atmósfera, principalmente.

Tabla 4.- Logros históricos de satélites civiles relacionados con la percepción remota

AÑO	SATÉLITE
1960	El primer satélite meteorológico, TIROS 1, adquiere la primera imagen para ser utilizada en pronóstico del clima. CORONA, un satélite militar de reconocimiento, toma su primera imagen. Sus Imágenes fueron desclasificadas en 1995.
1968	Apolo 8 devuelve las primeras imágenes de la Tierra desde el espacio.
1972	La NASA lanza el primer satélite civil para el estudio de recursos terrestres, el Earth Resources Technology Satellite (ERTS), llamado más tarde Landsat 1.
1973	Lanzamiento del Skylab: 14 de mayo de 1973
1975	La NASA pone en órbita la serie Landsat 2. Es lanzada la primera generación de satélites de la serie GOES
1978	Se ponen en órbita el Landsat 3, SEASAT 1 y TIROS N.
1979	La NOAA asume el control del programa Landsat y lanza el NOAA 6.
1982	La NASA lanza la serie Landsat 4.
1984	La NASA lanza la serie Landsat 5.
1985	La NOAA transfiere el programa Landsat a EOSAT, un operador privado. Nimbus-7 (un mapeador de ozono total) confirma la reducción en la concentración del ozono.
1986	Francia lanza el primer satélite comercial orientado a la observación de la Tierra, SPOT 1.
1987	Lanzamiento del MOS 1 japonés.
1988	Inicia operaciones el satélite hindú IRS 1A.
1991	La India lanza el satélite IRS 1B. La Agencia Espacial Europea pone en servicio el satélite ERS 1.
1992	Japón lanza el JERS 1. Se pone en servicio el satélite GOES 7, último de la primera generación.
1993	Se autoriza la primera licencia para la operación de un sistema privado de percepción remota, el satélite Early Bird. Lanzamiento fallido de Landsat 6 de EOSAT. Inicia operaciones el satélite IRS P1.
1994	Es lanzado el GOES 8, primer satélite de la segunda generación de esta serie.
1995	Sovinformsputnik, empresa rusa comercializa imágenes de satélite con una resolución espacial de 2 metros. Es puesto en órbita el satélite ERS 2 de la Agencia Espacial Europea. Canadá lanza el primer radar de apertura sintética, Radarsat 1.
1996	Se lanza el ADEOS 1 japonés.
1997	Inicia operaciones el satélite IRS 1D.
1998	Se lanza el NOAA K (AVHRR modelo 3).
1999	La NASA lanza la serie Landsat 7 y Terra, el primer satélite del sistema EOS. Space Imaging, Inc.

	lanza el primer satélite comercial con resolución de 1 metro, IKONOS 2.
2002	La Agencia Espacial Europea (ESA), pone en servicio el Envisat. Es puesto en órbita el segundo satélite del sistema EOS, Aqua.
2008	Geoeye 1 fue lanzado el 6 de septiembre.

Adaptado de: National Research Council, 2001; National Resources Canada, 2007; Geomensor, 2010; GEOAMIGOS de Puerto Rico, 2010; NASA, 2010b; NASA, 2011.

I.5.3 La serie Landsat

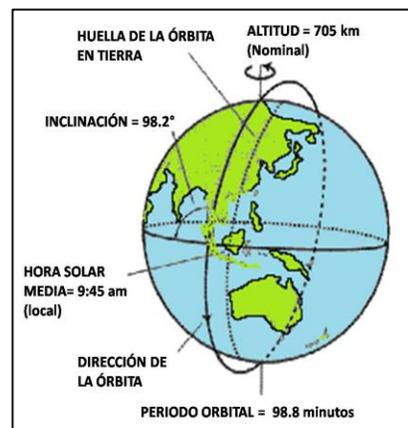
Como ya se ha mencionado desde un inicio, en este trabajo se utilizaron imágenes adquiridas por diferentes sensores del satélite Landsat. Por tal motivo es conveniente conocer algunas características de esta serie de satélites, su origen, resoluciones, bandas y aplicaciones, entre otros detalles de importancia, a fin de ubicarnos en el contexto espacial de las series de Landsat.

El primer satélite de la serie Landsat fue lanzado en 1972 y llevaba a bordo un vidicon con haz de retorno (RBV) y un escáner multiespectral (MSS) de 80 m de resolución. Los satélites Landsat 2 y 3, lanzados en 1975 y 1978, respectivamente, fueron configurados de manera similar. El Landsat 1 inicialmente fue llamado ERTS-1, en tanto que el Landsat 2 tenía como nombre ERTS-2. Estos cambios fueron hechos por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos, NASA por sus siglas en inglés (National Research Council, 1998). En 1984, el Landsat 4 fue lanzado con un MSS y un nuevo instrumento denominado mapeador temático (TM). La actualización de los instrumentos incluyó la resolución espacial mejorada a 30 m y 3 nuevos canales o bandas. Landsat 5, un duplicado del 4 pero sin el sensor MSS, inició operaciones en 1984 y aún en la actualidad (2010) después de 26 años - 21 años más allá de sus 5 años de vida de diseño - devuelve datos útiles. Landsat 6, equipado con una banda pancromática de 15 m, se perdió inmediatamente después de su lanzamiento en 1993. El satélite Landsat 7 fue lanzado exitosamente el 15 de abril de 1999 desde la base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California (NASA, 2010a).

Los sensores MSS y TM detectan primero la radiación reflejada de la Tierra en la longitud de onda visible y de IR; el MSS se utilizó en los Landsat 1-5, mientras que el sensor TM fue utilizado en los Landsat 4-5, por que provee más información radiométrica que el sensor MSS. Las características de las bandas espectrales del MSS y el TM se escogieron para optimizar las capacidades de detección y monitoreo de los diferentes tipos de recursos terrestres (CICEANA, 2007):

- Banda 1MSS (banda 2 TM) - Detectan el reflejo verde de la vegetación saludable.
- Banda 2 MSS (banda 3 TM) - Detectan la absorción de clorofila en la vegetación.
- Banda 3 y 4 MSS (banda 4 TM) - Detecta el reflejo del IR cercano en vegetación saludable.
- Banda 1 TM - Penetra el agua para medir su profundidad a lo largo de áreas costeras (batimetría); permite la diferenciación entre el suelo y la vegetación y,
- Banda 5 y 7 TM - Detectan la humedad en el suelo y la vegetación; discrimina tipos de rocas y minerales.
- Banda 6 TM - Se utiliza para mapeo termal, y para estudios de humedad en suelo y vegetación.

La órbita de Landsat 7 es circular, heliosincrónica y casi polar con una altitud de 705 km en el ecuador, el cual cruza de norte a sur entre las 10:00 y 10:15 a.m. en cada paso. Circula la Tierra a una velocidad de 7.5 km/s y cada órbita la cubre en aproximadamente 99 minutos (Figura 12). La nave completa poco más de 14 órbitas por día, cubriendo toda la Tierra entre los 81° de latitud norte y 81° de latitud sur cada 16 días. (NASA, 2010a).



**Figura 12.- Órbita de Landsat.
NASA, 2010a.**

Aplicaciones

Los datos del Landsat se han utilizado en una variedad de aplicaciones públicas, privadas, de seguridad nacional y del gobierno. Algunos ejemplos son la gestión de la tierra y el agua, la investigación del cambio global, el petróleo y la exploración de minerales, la previsión de la producción agrícola, monitoreo de la contaminación, detección de cambio del uso del suelo, y generación de cartografía. También se han utilizado en el monitoreo de selvas y bosques: medición del ritmo de destrucción de bosques y su regeneración, así como sucesión vegetal. En vulcanología: mapeo de los depósitos volcánicos superficiales; y en simulaciones de superficie de la Tierra de manera conjunta con otros insumos, como datos topográficos adquiridos por el radar Shuttle (NASA, 2010a). En la tabla 5 se resumen algunos datos básicos de los satélites Landsat, que permiten conocer su evolución en el tiempo, desde que fue lanzado el primer satélite.

Tabla 5.- Características de los satélites Landsat

satélite	Altitud (km)	Lanzamiento (dd/mm/aa)	Fin de servicio (dd/mm/aa)	Sensor	Banda	Ancho (μm)	Resolución (metros)
Landsat 1-2	917	Landsat-1 23/07/1972	Landsat-1 06/01/1978	RBV	1	0.48 a 0.57	80
					2	0.58 a 0.68	80
		Landsat-2 22/01/1975	Landsat-2 25/02/1982		3	0.70 a 0.83	80
				MSS	4	0.5 a 0.6	79
					5	0.6 a 0.7	79
					6	0.7 a 0.8	79
		7	0.8 a 1.1	79			
Landsat 3	917	05/03/1978	31/03/1983	RBV	1	0.505 a 0.75	40
					MSS	4	0.5 a 0.6
				5		0.6 a 0.7	79
				6		0.7 a 0.8	79
				7		0.8 a 1.1	79
				8	10.41 a 12.6	240	
Landsat 4-5	705	Landsat-4 16/07/1982	Landsat-4: Fuera de servicio el 15/06/2001	MSS	2	0.52 a 0.6	68 x 83
					3	0.63 a 0.69	68 x 83
		4	0.76 a 0.9		68 x 83		
		6	2.08 a 2.35		68 x 83		
		Landsat-5 01/03/1984	Landsat-5: En operación	TM	1	0.45 a 0.52	30
					2	0.52 a 0.60	30
					3	0.63 a 0.69	30
					4	0.76 a 0.90	30
					5	1.55 a 1.75	30
					6	10.4 a 12.5	60
7	2.08 a 2.35	30					
Landsat 7	705	15/04/1999	En operación pese al fallo del corrector de escaneo de línea (SLC por sus siglas en inglés) desde el 31/05/2003.	ETM+	1	0.45 a 0.52	30
					2	0.52 a 0.60	30
					3	0.63 a 0.69	30
					4	0.76 a 0.90	30
					5	1.55 a 1.75	30
					6	10.4 a 12.5	60
					7	2.08 a 2.35	30
				PAN	0.50 a 0.90	15	

Fuente: NASA, 2010a; NASA, 2011.

I.5.4 Principios físicos de la percepción remota

I.5.4.1 Espectro electromagnético

La percepción remota implica la medición de la energía que es reflejada o emitida por objetos, sin entrar en contacto con ellos. Esta energía electromagnética, viaja por el espacio como ondas electromagnéticas. Las ondas se caracterizan por su frecuencia o por su longitud de onda, la cual es la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda (Figura 13). El espectro electromagnético consiste en todas las longitudes de onda de la energía electromagnética. El espectro continuo se subdivide en algunos tipos familiares de energía electromagnética como los rayos X, rayos ultravioletas (UV), visibles, infrarrojo (IR), microondas, y ondas de radio (Von Martini *et al.*, 2009).

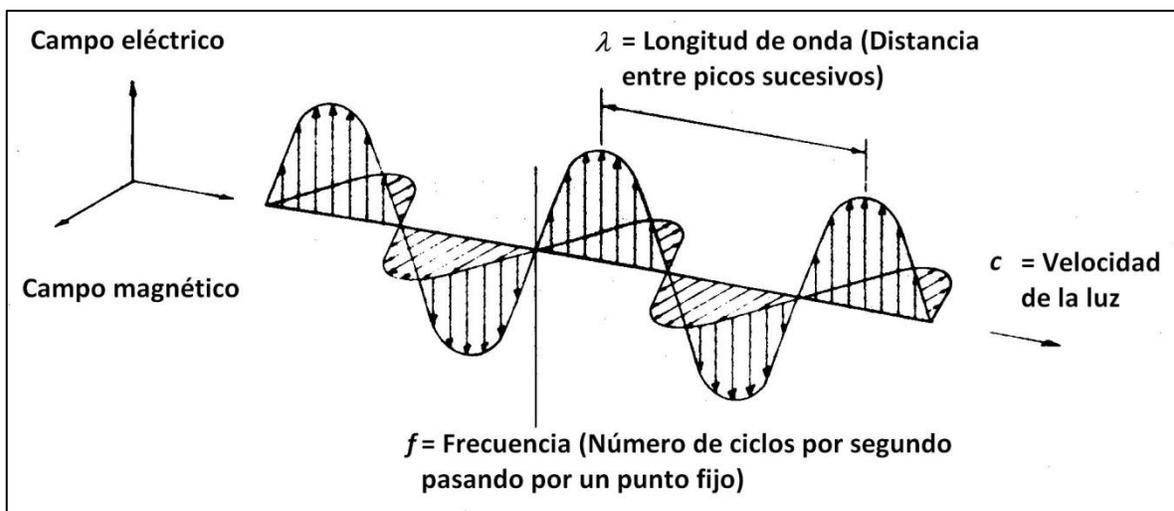


Figura 13.- Onda electromagnética. Yuras (2002).

Según la teoría ondulatoria la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (Figura 13).

Esta energía se puede describir por dos elementos: f (frecuencia) y λ (longitud de onda)

$$C = f * \lambda$$

En donde C = velocidad de la luz

A mayor λ menor energía y a mayor F , mayor energía. La ecuación descrita muestra que la frecuencia varía inversamente con la longitud de onda y directamente con la velocidad de la propagación de la onda (Yuras, 2002; CICEANA, 2007).

I.5.4.2 Regiones de importancia en el espectro electromagnético

Diferentes regiones del espectro electromagnético pueden proveer información discreta acerca de un objeto. Los sensores remotos están diseñados para detectar rangos de frecuencia y longitudes de onda específicas (US Army Corps of Engineers, 2003). En los siguientes párrafos se describen algunos de los rangos de longitudes de onda de mayor importancia en la percepción remota:

Ultravioleta (0.300 – 0.446 μm).- La porción ultravioleta del espectro contiene radiación que va más allá del violeta visible. La radiación en este rango tiene longitudes de ondas cortas y una alta frecuencia. Este rango es usado en aplicaciones de las ciencias atmosférica y geológica. Los materiales tales como las rocas y los minerales muestran fluorescencia o emiten luz visible ante la presencia de radiación ultravioleta. La fluorescencia asociada a filtraciones de hidrocarburos naturales es de utilidad en la vigilancia de los campos petroleros en el mar. En la atmósfera superior, la luz ultravioleta es absorbida en gran medida por el ozono (O_3) y se convierte en una herramienta importante en el seguimiento de los cambios en la capa de ozono ((Yuras, 2002; US Army Corps of Engineers, 2003; CICEANA, 2007).

Espectro visible (0.4-0.7 μm).-La radiación detectada por el ojo humano está en el rango visible del espectro. El azul, verde y rojo, son los colores primarios o las longitudes de onda del espectro visible. Se definen como tales porque el resto de los colores pueden ser formados combinando azul, verde y rojo en varias proporciones (CICEANA, 2007).

Los colores que están asociados al rango del visible y sus correspondientes longitudes de onda son los siguientes:

- Violeta (0.400 - 0.446 μm)
- Azul (0.446 - 0.500 μm)
- Verde (0.500 - 0.578 μm)
- Amarillo (0.578 - 0.592 μm)
- Naranja (0.593 - 0.620 μm)
- Rojo (0.620 - 0.700 μm)

La luz visible detectada por los sensores depende en gran medida de la reflexión superficial de los objetos. Entre aquellas aplicaciones que usan el rango del visible están: la identificación de elementos urbanos, discriminación de suelo/vegetación, productividad de los océanos, cobertura nubosa, precipitación, cubierta de hielo, nieve (Yuras, 2002; US Army Corps of Engineers, 2003; CICEANA, 2007).

IR-cercano: 0.7 - 1.3 μm , también llamado IR próximo, reflejado o fotográfico, puesto que puede detectarse mediante películas especiales. Su importancia radica en que es capaz de discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

IR medio: 1.3- 3 μm , aquí se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Su mayor importancia es para identificar minerales que tienen sus principales rasgos de absorción en esta zona del espectro. Es de utilidad para la detección de puntos de calor que pueden representar potenciales incendios, o bien, volcanes con actividad.

IR-lejano o térmico: 3 a 14 μm , incluye la porción emisiva del espectro terrestre, por lo que detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres, incluyendo la temperatura superficial del mar y variaciones de temperatura del hielo.

Microondas: 1 mm – 1 m. De gran interés en la percepción remota, ya que la cubierta nubosa es transparente a la mayor parte de la energía en esta región. Esta región incluye una amplia gama de longitudes de onda, en el extremo con longitud de onda corta, las microondas exhiben propiedades similares a la radiación infrarroja térmica, mientras que las longitudes de onda mayores conservan propiedades similares a las utilizadas por las emisiones de radio. En virtud de que la emisión de microondas es influenciada por el contenido de humedad, es útil para el mapeo de la humedad del suelo, el hielo marino, corrientes, y los vientos de superficie. Otras aplicaciones incluyen el análisis de la humedad de la nieve, el perfil de las mediciones de ozono atmosférico y el vapor de agua, y la detección de las manchas de petróleo (Chuvienco, 2002; Yuras, 2002; US Army Corps of Engineers, 2003; Lillesand *et al.*, 2008).

Las longitudes de onda y bandas que corresponden al rango de las microondas se presentan en la tabla 6.

Tabla 6.- Bandas de microondas

Banda	Frecuencia (MHz)	Longitud de onda (cm)
Ka	40 000 – 26 000	0.8 – 1.1
K	26 500 – 18 500	1.1 – 1.7
X	12 500 – 8 000	2.4 – 3.8
C	8 000 – 4 000	3.8 – 7.5
L	2 000 – 1 000	15 – 30
P	1 000 – 300	30 – 100

Fuente: US Army Corps of Engineers, 2003

I.5.4.3 Interacción objeto - energía electromagnética

Partiendo del hecho de que todos los objetos emiten energía electromagnética y con base en que tienen temperaturas mayores a cero absoluto [-273 °C), esta radiación se emite en longitudes de onda que están por lo general fuera de la banda del visible. Por ello no es posible ver la mayor parte de la energía con el ojo humano, sino únicamente la energía reflejada. Cuando la energía electromagnética, como la proveniente del sol, llega a un objeto, sucede uno o algunos de estos fenómenos:

- Reflexión, la energía es reflejada por el objeto
- Transmisión, es transmitida a través del objeto
- Absorción, en la que es absorbida por el objeto

La energía absorbida puede incluso ser convertida en calor y ser emitida del objeto a una longitud de onda diferente. Esto es lo que pasa cuando un objeto se calienta al sol. Se calienta y emite energía electromagnética en la banda del infrarrojo.

La manera en que la longitud de onda afecta a un objeto está en función de sus características y de los ángulos en que la luz le llega. La energía reflejada y emitida de los objetos es lo que se mide en la percepción remota.

Una hoja verde se ve de ese color porque la clorofila presente en el mesófilo en empalizada absorbe la mayor parte de la energía en las longitudes de onda del azul y el rojo, reflejando las

longitudes de onda correspondientes al color verde; por su parte, la banda del infrarrojo cercano penetra hasta el mesófilo esponjoso reflejando una parte de ella y absorbiendo otra (figura 14).

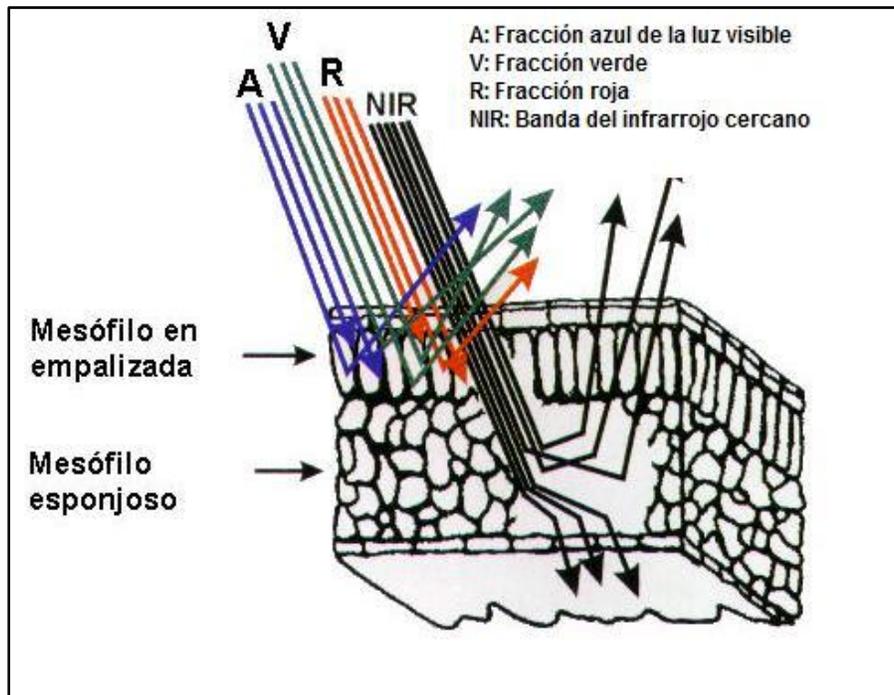


Figura 14.- Respuesta foliar a la energía electromagnética

Fuente: Von Martini *et al.* (2009)

Cada objeto o grupo de objetos, examinados por percepción remota refleja un único espectro de longitudes de onda. Las diferencias entre el espectro reflejado es la base para distinguir un objeto de otro (Von Martini *et al.*, 2009).

I.5.4.4 Tipos de Resolución

En la descripción de los sistemas de percepción remota y las imágenes que producen, se deben considerar algunos conceptos relacionados con ciertas dimensiones espaciales y temporales, siendo las de mayor relevancia las que se verán a continuación

- Resolución espacial
- Resolución espectral
- Resolución radiométrica
- Resolución temporal

Resolución espacial

La resolución espacial está relacionada con las dimensiones del píxel que caracteriza a una imagen, lo que deriva en el detalle de la información que contiene o que representa ese cuadro. Es decir, la resolución espacial determina al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está en función del tamaño del píxel, medido en metros sobre la superficie de la cubierta observada. Esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado y las características ópticas del sensor como el poder resolutivo del sistema óptico (Vivancos *et al.*, 2005; Bense, 2007).

Por ejemplo las imágenes Landsat TM, tienen una resolución espacial de 30x30 m en las bandas 1,2,3,4, 5 y 7 y de 60x60 m en la 6 (térmica). El sensor SPOT - HRV tiene una resolución de 10x10 m, mientras que los satélites meteorológicos como NOAA, el píxel representa un área con un tamaño desde 500 a 1 100 m de lado (Vivancos *et al.*, 2005).

Resolución espectral

Consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor (Vivancos *et al.*, 2005; Bense, 2007). Von Martini *et al.* (2009) refieren que la resolución espectral está ligada con la habilidad de los sistemas de percepción de diferenciar distintas longitudes de onda en la radiación electromagnética.

El LANDSAT y el SPOT son sistemas multispectrales, que se caracterizan por un número no muy elevado de bandas espectrales, SPOT tiene 3 bandas y el Landsat 7; cuanto más estrechas sean las bandas mayor será la resolución espectral (Vivancos *et al.*, 2005; Bense, 2007). El sensor ASTER en el satélite TERRA de la NASA posee 14 bandas en las regiones visible, infrarroja y térmica del espectro (Bense, 2007). Los nuevos sensores, llamados hiperespectrales, llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho (unos pocos nm) para así separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral (Vivancos *et al.*, 2005; Von Martini *et al.*, 2009).

Una limitación al número de bandas consiste en que cuanto más estrecha es la banda, menor es la energía que se transmite al detector (Bense, 2007).

Resolución radiométrica

El nivel de gris o nivel digital-también llamado número digital- es el valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico-electrónico (González, 2002). Partiendo de este concepto, la resolución radiométrica se refiere a la cantidad de niveles de gris o número de niveles digitales utilizados para expresar los datos recogidos por el sensor que serán almacenados y procesados posteriormente. Cuanto mayor es el número de niveles, mayor será el detalle con que se podrá representar dicha información (Vivancos *et al.*, 2005; Bense, 2007). Por ejemplo, la serie Landsat tiene las siguientes resoluciones:

- Landsat sensor MSS tiene una resolución radiométrica de $2^6 = 64$ niveles de gris en el canal 6
- Landsat sensor MSS en las bandas 4 a 7 de $2^7 = 128$ niveles de gris
- Landsat TM es de $2^8 = 256$

Esto significa que tenemos una mejor resolución dinámica en el TM y podemos distinguir mejor las pequeñas diferencias de radiación (Vivancos *et al.*, 2005).

Los niveles de gris se expresan en términos de dígitos binarios (bits) necesarios para almacenar el valor del nivel de gris máximo posible de cada caso. Un bit es la unidad fundamental de un sistema binario pudiendo poseer sólo los valores 1 y 0. Para lograr una imagen de pantalla con variaciones de brillo prácticamente continuas desde el punto de vista visual se necesitan 5 o 6 bits por píxel. El número de valores que pueden ser representados por una serie de dígitos es x^n , donde x es el número de valores que cada dígito puede representar y n es el número de dígitos usados. En una base binaria el número de valores será 2^n . Por ejemplo, para 5 bits tendremos 32 valores, para 8 bits 256 valores, para 11 bits 2 048, etc. En el caso del Landsat se tienen 8 bits, es decir, la escala de grises se extiende de 0 a 255, totalizando 256 valores (Bense, 2007).

Resolución temporal

Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre, es decir, cada cuánto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita; períodos cortos de visita, es decir altas resoluciones temporales, aumentan la probabilidad de obtener imágenes satisfactorias (Vivancos *et al.*, 2005; Bense, 2007; Von Martini *et al.*, 2009).

Las altas resoluciones temporales son importantes en el monitoreo de inundaciones, incendios, calidad del agua en el caso de contaminación, desarrollo de cosechas, etc. Asimismo, en áreas con cubiertas nubosas casi constantes como por ejemplo las selvas tropicales (Bense, 2007).

El ciclo de repetición de las plataformas Landsat-1 al Landsat 3 era de 17 días. A partir del Landsat 4 en 1984 el ciclo de repetición se redujo a 15 días. SPOT permite un ciclo de repetición de entre 3 y 26 días (Von Martini *et al.*, 2009).

I.6 Pre procesamiento de imágenes

Las operaciones de pre-procesamiento, referidas en ocasiones también como restauración y rectificación de imágenes, están destinadas a corregir las distorsiones geométricas y radiométricas de los datos provenientes de los sensores y de las plataformas (*National Resources Canada, 2007*), mediante una compensación en los datos para calcular los niveles digitales más cercanos a la realidad (Short, 2009). Para conocer las unidades de radiación o de reflectancia que faciliten la comparación entre datos se debe convertir y / o calibrar la información de las imágenes (*National Resources Canada, 2007*).

Entre las correcciones comúnmente necesarias, destacan: las correcciones radiométrica, atmosférica, geométrica y topográfica, mismas que se describen en los párrafos siguientes.

I.6.1 Corrección atmosférica

El objetivo de la corrección atmosférica es recuperar la reflectancia de la superficie (que caracteriza a las propiedades de la superficie terrestre) a partir de imágenes de percepción remota mediante la eliminación de los efectos atmosféricos mediante procedimientos basados en: datos climáticos, medidas directas en campo y en medidas basadas en la propia imagen (*University of Maryland, 1995; Pinilla, 2006*).

Las imágenes captadas por los satélites en gran medida están contaminadas por los efectos de partículas de la atmósfera mediante la absorción y dispersión de la radiación de la superficie de la tierra (*University of Maryland, 1995; National Resources Canada, 2007*).

La dispersión ocurre cuando las partículas o moléculas de gas presentes en la atmósfera interactúan con ella y ocasionan que la radiación electromagnética sea desviada de su trayectoria original. Se conocen tres tipos de dispersión:

Dispersión de Rayleigh.- Se produce cuando las partículas atmosféricas son de un tamaño mucho menor a la longitud de onda de la radiación (Lillesand *et al.*, 2008). Cuando la luz pasa a través de la atmósfera, las longitudes de onda más cortas (por ejemplo el azul) del espectro visible se dispersan más que las longitudes de onda más largas. Es el principal mecanismo de dispersión en la atmósfera superior (*National Resources Canada*, 2007). La dispersión de Rayleigh es la causante del tono azulado del cielo y del tono rojizo en el amanecer y atardecer (Lira, 2010).

Dispersión de Mie.- Se produce cuando el tamaño de las partículas atmosféricas es comparable a la longitud de onda detectada (Lillesand *et al.*, 2008; Lira, 2010). Se presenta principalmente en las partes bajas de la atmósfera donde las partículas más grandes son más abundantes, y domina cuando el medio está nublado (*National Resources Canada*, 2007).

Dispersión no selectiva.- La dispersión no-selectiva ocurre cuando la atmósfera presenta una alta concentración de partículas de polvo y contaminantes (Lira, 2010), cuyo tamaño es mucho mayor a la longitud de onda del espectro visible y toma su nombre del hecho de que todas las longitudes de onda son dispersadas por igual. Provoca que la niebla y las nubes se vean blancas a nuestros ojos porque la luz, en las frecuencias del azul, verde y rojo, es dispersada en cantidades aproximadamente iguales (*National Resources Canada*, 2007).

I.6.2 Composiciones a color

Las imágenes de satélite se pueden visualizar en diferentes colores para propósitos específicos, como resaltar las zonas cultivadas o las zonas urbanas. Para ello los colores con que normalmente se despliega la imagen en color natural, se manipulan para que distintos materiales presentes en la superficie terrestre puedan apreciarse mejor con un color diferente al que espectralmente reflejan. Dado que la visión humana únicamente percibe las longitudes de onda entre 0.4 y 0.7 μm que representan los tres colores primarios: rojo, verde y azul, los dispositivos de salida emplean por lo tanto 3 canales, uno para cada color (Chuvienco, 2002). Con ello se puede intentar representar el color natural de los elementos de una imagen; por ejemplo, Landsat con la combinación RGB 3-2-1, la banda 3 se representará en el canal 1 (rojo), la banda 2 en el canal 2 (verde), y la banda 1 en el canal 3 (azul).

Es conocido el rango de frecuencia en el que se refleja la luz por ciertos materiales. De acuerdo con Martínez (2005), con el sensor TM de Landsat es posible la detección de turbidez y

contaminación del agua (banda azul), exploración minera (infrarrojo medio), contenidos de humedad en las plantas y en el suelo (infrarrojo medio) y detección de focos de calor (infrarrojo medio y térmico). Con esta información es posible acomodar las diferentes bandas en los 3 canales para resaltar un material dado.

I.6.3 Clasificación de imágenes

I.6.3.1 Clasificación no supervisada

En una clasificación no supervisada, el objetivo es agrupar los patrones de respuesta espectral multibanda en grupos que son estadísticamente separables (Short, 2009). Es un proceso mediante el cual se realizan operaciones numéricas que buscan agrupar naturalmente las propiedades espectrales de los píxeles (Jensen, 1996). Un pequeño rango de números digitales, por ejemplo para 3 bandas, puede formar un grupo que se aparta de una combinación especificada para otro grupo, y así sucesivamente. Estos grupos pueden ser modificados, de modo que su número total puede variar arbitrariamente cuando cuatro o más bandas están involucradas. Esta situación es multidimensional (Short, 2009). No obstante, algunos grupos pueden carecer de sentido, ya que representan clases mixtas de materiales de la superficie terrestre. Es por ello que se deben conocer las características espectrales del terreno lo suficientemente bien como para definir ciertos grupos que representen las clases de información (Jensen, 1996). Este método se denomina clasificación no supervisada precisamente porque las clases no son seleccionadas de antemano (Short, 2009).

I.6.3.2 Clasificación supervisada

En la clasificación supervisada, los patrones espectrales de la imagen del conjunto de datos se evalúan mediante reglas predefinidas para determinar la identidad de cada píxel (Lillesand *et al.*, 2008). Es decir, con ayuda de la firma espectral de los materiales a discriminar se clasifica cada píxel tomando en cuenta su nivel digital. De acuerdo con Jensen (1996), se debe conocer el origen de la imagen (sensor) y sus bandas espectrales. Las imágenes se tienen que corregir radiométricamente y geométricamente de manera previa. Una vez que se ha cumplido con estas recomendaciones, se eligen las áreas de interés en la imagen, mismas que conformarán los campos de entrenamiento que agrupan las celdas con respuestas espectrales similares. Estas zonas de entrenamiento ayudan al programa de cómputo para el reconocimiento de las clases,

pues a partir de ellas se asignarán los demás píxeles a las distintas clases (Chuvienco, 2002). Así, la clasificación se efectúa mediante un algoritmo obteniendo un mapa de clases. Finalmente se aplica una evaluación rigurosa de los errores (Jensen, 1996); el propósito de ello es conocer la precisión de la clasificación evaluando los errores por omisión y por comisión.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

II.1 Materiales

En este apartado se describen los materiales que se emplearon para el presente estudio, dividiéndolos en diferentes rubros de acuerdo a la naturaleza de su origen y de su aplicación.

II.1.1 Imágenes de satélite

Para el presente estudio se emplearon dos imágenes del satélite Landsat serie 5 adquiridas en 1990 y 2000. La primera de ellas captada por el sensor MSS y la segunda por el TM (consultar la tabla 7). Estas imágenes fueron descargadas de las páginas web de Earth Explorer (<http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>) y Global Visualization Viewer (<http://glovis.usgs.gov/>), dependientes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S.G.S. por sus siglas en inglés). En la búsqueda de las imágenes se procuró tener libre de nubes la zona que corresponde a la mancha urbana, aunque otras zonas presentan algún porcentaje de nubosidad no llega a afectar en la determinación del área ocupada por la ciudad.

Se decidió estudiar ese periodo por presentar un cambio notable en el crecimiento urbano y su población. Adicionalmente se verá la relación que tiene con la población total presente en la ciudad de Playa del Carmen en los años censales de acuerdo a las cifras finales publicadas por el INEGI.

Tabla 7.- Imágenes Landsat utilizadas

Sensor de Lansat	Fecha de adquisición	Path/row	evento censal
MSS	01/08/1990	018/046	Censo de 1990
TM	25/06/2000	018/046	Censo de 2000

El año de inicio es 1990 ya que de acuerdo a la tabla 1 y la gráfica 1, es el momento aproximado en que la entonces localidad de Playa del Carmen inicia un marcado incremento en el número de viviendas y de habitantes, y el año 2000 en virtud de que coincide con un año en el que se realizó

el penúltimo Censo General de Población y Vivienda, que podría dar una idea que cómo ha ido creciendo la mancha urbana en relación a la población.

II.1.2 Insumos geomáticos

Se emplearon planos de localidad elaborados por el INEGI para los años correspondientes a los eventos censales (ver tabla 7) para observar si los puntos aleatorios a evaluar en la matriz de error corresponden al área urbana, pues estos productos cartográficos contienen información a nivel manzana. De igual modo se recurrió a una fotografía aérea escala 1:75 000 del INEGI (1991) del mes de marzo y la carta topográfica escala 1:50 000 hoja Playa del Carmen de 1988, producto elaborado por el INEGI.

Otro apoyo de importancia fue el uso de *Google Earth* en donde se visualizaron los puntos aleatorios para una mejor y ágil ubicación geográfica con la finalidad de validar la clasificación.

II.1.3 Software empleado

Para el pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes antes descritas, elaboración de mapas, importación y exportación de archivos en diferentes formatos y otros procesos menores, se utilizaron los siguientes programas de cómputo:

- Idrisi Andes, versión 15.0.- En este software se realizaron la mayoría de los procesos de manipulación de las imágenes, desde la corrección atmosférica pasando por los compuestos a color, hasta las clasificaciones.
- *Google Earth*, versión 5.1.- Esta herramienta cartográfica se utilizó para observar la ubicación de los puntos aleatorios de la validación de las clasificaciones.

II.2 Metodología

En las siguientes líneas se describen de manera breve los métodos empleados para el pre procesamiento y procesamiento de las sub imágenes de la zona de estudio hasta alcanzar los resultados que se presentan en el apartado correspondiente.

En cuanto a la necesidad de corrección de las imágenes que se emplearon en esta investigación, solamente fue necesaria realizar una corrección atmosférica a través del método de sustracción simple del cuerpo oscuro propuesto por Chávez (1988). Se decidió este método para aprovechar la

circunstancia de que las sub-imágenes utilizadas presentan una gran cobertura de agua (cuerpo oscuro). La topografía llana de la zona de estudio fue un factor determinante para no efectuar la corrección topográfica; tampoco se consideró útil corregir radiométricamente pues las sub imágenes no presentaron problemas de líneas o píxeles perdidos.

Se efectuaron compuestos en falso color para resaltar e identificar las diferentes cubiertas: urbana, vegetal, marina, y playa. Se observaron buenos resultados con las combinaciones en RGB 4-3-2 para la sub-imagen de 1990 y 4-7-1 para la sub-imagen de 2000.

Finalmente se clasificaron las sub imágenes en seis clases logrando mejores resultados con el método de clasificación de la mínima distancia. Estas clasificaciones se sometieron a un proceso de validación con el apoyo de puntos de muestreo aleatorio representados en Google Earth y en una ortofoto del INEGI. Los resultados obtenidos, así como las discusiones y conclusiones se detallan en los apartados siguientes.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS

III.1 Conversión de formato de las imágenes

Inicialmente se efectuó la conversión del formato original de la escena de TIFF a RST por medio de Idrisi Andes, obteniendo una imagen para cada banda, como la que se aprecia en la figura 15.

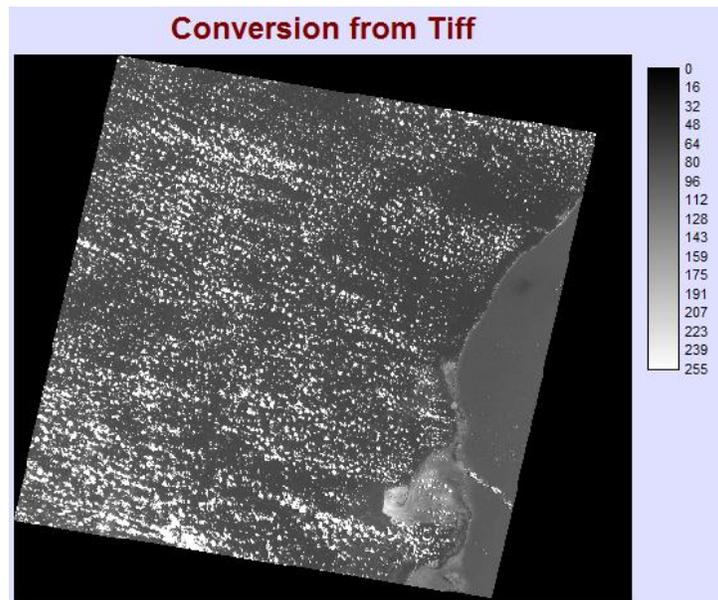


Figura 15.- Escena completa del año 2000, banda 1

III.2 Recorte de imágenes

Se efectuaron recortes a las imágenes a fin de obtener una sub-imagen de cada año estudiado, cuyos límites en coordenadas UTM son las siguientes:

Tabla 8.- Coordenadas extremas de las sub-imágenes 1990 y 2000

Imagen	N máximo	N mínimo	E máximo	E mínimo
1990	2 285 458	2 277 793	495 101	488 755
2000	2 285 475	2 277 765	495 105	488 745

Al aplicar este recorte a todas las bandas se obtuvieron sub-imágenes con la zona de estudio como se muestra en la figura 16, que corresponde a la banda 1 de la imagen del año 2000.

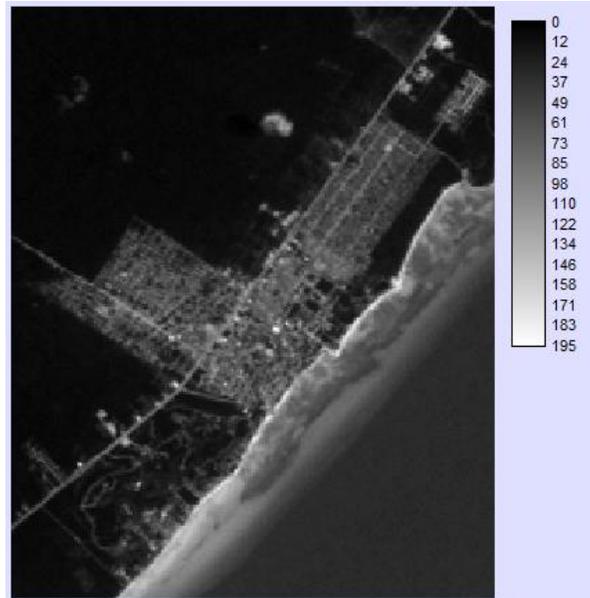


Figura 16.- Recorte de la imagen del año 2000, banda 1

Estos recortes abarcan completamente el área que ocupa la zona urbana de Playa del Carmen de acuerdo a la imagen del año 2000, por lo que de esta manera se garantizó que la imagen del año 1990 contuviera el área de estudio en la misma medida. El recorte se hizo con ayuda del programa Idrisi Andes.

III.3 Corrección atmosférica

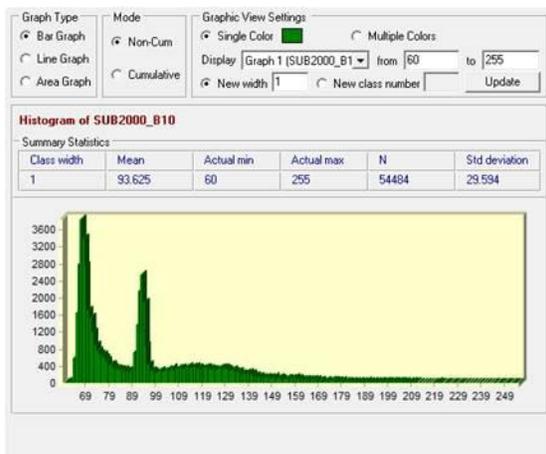
Las sub-imágenes utilizadas presentan una gran cobertura de agua (cuerpo oscuro). A la vez, en general los niveles digitales son bajos para ambas sub-imágenes, lo que indica que la dispersión atmosférica es relativamente baja. Se aprovecharon estas circunstancias para efectuar la corrección atmosférica aplicando el método de sustracción simple del cuerpo oscuro propuesto por Chávez (1988), por lo que a cada banda se le restó su valor mínimo, de esta manera se obtuvieron histogramas con valores mínimos de cero (tabla 9).

Se observa que los valores mínimos de los histogramas respectivos inician en cero, y con ello se ha tratado de eliminar en lo posible la influencia de las partículas atmosféricas, tales como moléculas de aire, humo, neblina, bruma, polvo y nubes sobre los niveles digitales (Lira, 2010). En los histogramas de las gráficas 3a y 3b correspondientes a la imagen del año 2000 muestran un comportamiento bimodal en el que se acumulan diversos números digitales para las cubiertas de vegetación y de agua de mar. Aunque el resultado visual de la imagen corregida no muestra

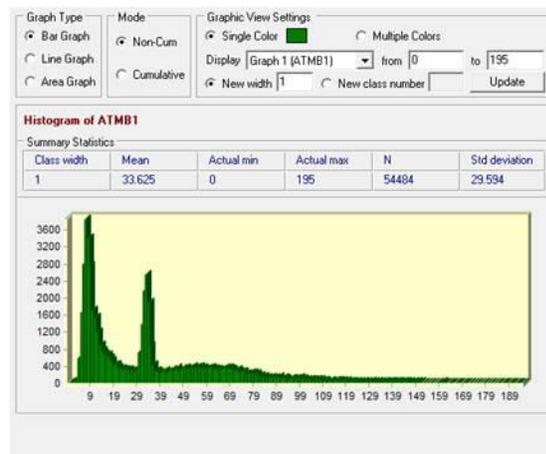
diferencias significativas estas existen; por ejemplo, los valores mínimo y máximo del histograma previo a la corrección eran 60 y 255 respectivamente (gráfica 3a), en tanto que en el histograma corregido los valores son 0 y 195 respectivamente (gráfica 3b).

Tabla 9.- Niveles digitales antes y después de la corrección atmosférica

Imagen	Banda	Previo a la corrección		Posterior a la corrección	
		ND mínimo	ND máximo	ND mínimo	ND máximo
MSS 1990	2	24	127	0	103
	3	7	127	0	120
	4	1	127	0	126
	6	1	127	0	126
TM 2000	1	60	255	0	195
	2	23	155	0	132
	3	18	190	0	172
	4	23	185	0	162
	5	22	255	0	233
	7	8	169	0	161



Gráfica 3a.- Histograma antes de la corrección atmosférica



Gráfica 3b.- Histograma después de la corrección atmosférica

III.4 Compuestos a color

A partir de las bandas que constituyen las imágenes de los diferentes años, en función del sensor empleado, se efectuaron composiciones a color para ver inicialmente en color verdadero la zona de estudio. De igual modo se realizaron composiciones en falso color para poder resaltar e identificar la pertenencia de algunos píxeles a alguna cubierta en particular, siendo más útil la combinación RGB 4-3-2 para la sub-imagen de 1990 y 4-7-1 para la sub-imagen de 2000.

Esta primera revisión de la región permitió observar que están presentes elementos claramente diferenciados, como son: cuerpos de agua, franja arenosa, vegetación verde, áreas mixtas, que al parecer son combinaciones de vegetación y suelo desnudo, zonas netamente urbanizadas y carreteras. Estos elementos dieron un primer indicio de cuántas clases se tendrían que incluir en los procesos de clasificación. Para el caso de la imagen del año 2000 se efectuaron los compuestos a color: RGB 321 (en color natural) y RGB 471. Con ambos compuestos se resaltan tanto la cubierta vegetal como la zona urbana y el mar. También se obtuvo el índice de vegetación NDVI con el objetivo de diferenciar las subclases de vegetación (vegetación sana y la deteriorada) y sus límites con la zona urbana. Estas composiciones se pueden consultar en las figuras 17-a, 17-b y 17-c.

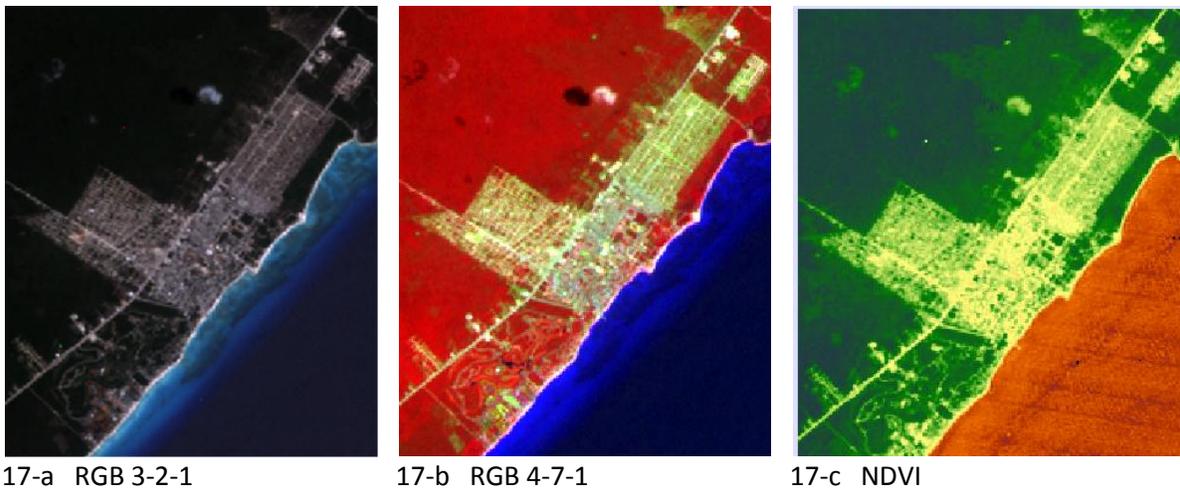


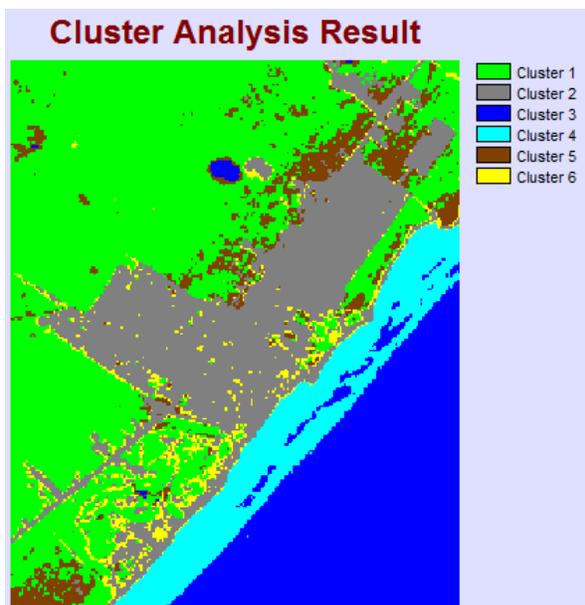
Figura 17.- Composiciones RGB y NDVI

En las figuras 17-a y 17-b se resaltan tanto la cubierta vegetal como la zona urbana y el mar. En la primera en color natural mientras en la segunda se aprecia la vegetación en rojo, el mar en azul y la zona urbana en tonos dorados. El índice de vegetación NDVI se observa en la figura 17-c

logrando diferenciar las subclases de vegetación (vegetación sana en verde oscuro y la vegetación deteriorada en verde claro) respecto de la zona urbana. La imagen de satélite es del año 2000.

III.5 Clasificación no supervisada

En la clasificación no supervisada se establecieron las seis clases definidas en la composición de color. El resultado mostró que con base del conocimiento previo que se tiene del área estudiada, se definieron con buena aproximación cinco clases que corresponden al área urbana, dos subclases de vegetación, y dos subclases de agua de mar (figura 18). Así se puede asegurar que este resultado es muy cercano a la realidad. La zona de playa quedó clasificada como área urbana de la que hay necesidad de separarla.



En la imagen clasificada de la figura 18 los clústeres de salida representan las cubiertas siguientes:

Clúster 1: vegetación en buen estado

Clúster 2: área urbana, arena y nube

Clúster 3: mar tipo 1 y sombra

Clúster 4: mar tipo 2

Clúster 5: vegetación deteriorada y sombras

Clúster 6: área urbana, nubes y arena

Figura 18.- Resultado del análisis del clúster a la imagen 2000.

III.6 Clasificación supervisada

Una vez analizada la clasificación automática, se realizó la clasificación supervisada definiendo seis áreas de entrenamiento cada cual agrupando píxeles que representan a las clases siguientes:

- **Área urbana:** Representa la zona urbana, complejos turísticos cercanos a la línea de costa y caminos y carreteras principalmente.
- **Vegetación sana:** Aquella vegetación que de acuerdo al NDVI se encuentra vigorosa y en buen estado de salud.

- **Vegetación deteriorada:** comprende las potenciales áreas de suelo desnudo y la vegetación con menor densidad o condiciones fisiológicas pobres.
- **Playa:** De acuerdo a su reflectancia agrupa la franja arenosa que se encuentra entre el mar y la zona continental, así como material con alto contenido de calizas que puede estar presente en las calles sin pavimentación como material de relleno o como bancos de material en terrenos al interior.
- **Mar subclase 1:** Se refiere a las aguas marinas cercanas a la costa, someras, en las que los sedimentos y el material orgánico disuelto (sustancia amarilla) dominan las propiedades ópticas del mar. Este tipo de aguas se denominan caso 2 (Aguirre, 2002).
- **Mar subclase 2:** Indicativo de aguas más profundas que las primeras, con mayor oscuridad y alejadas de la costa. Estas se denominan caso 1, y se caracterizan por el dominio del fitoplancton y sus derivados sobre las propiedades ópticas del océano (Aguirre, 2002).

Se construyeron los polígonos de entrenamiento de cada clase agrupando aquellos píxeles que se consideraron representativos de cada cubierta que se requiere aislar. La Figura 19 muestra los polígonos de entrenamiento que se definieron.

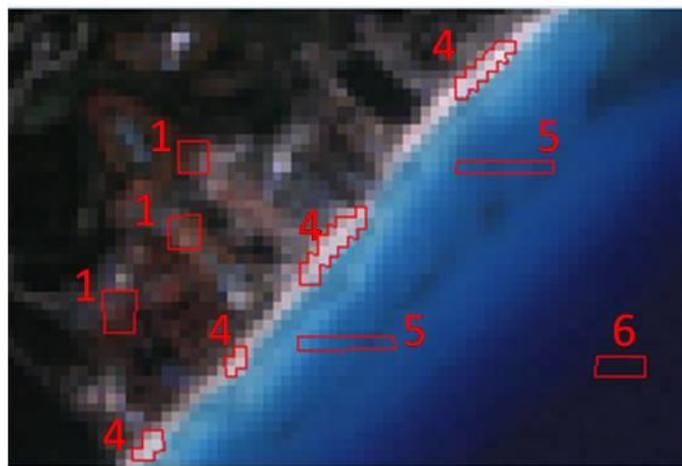
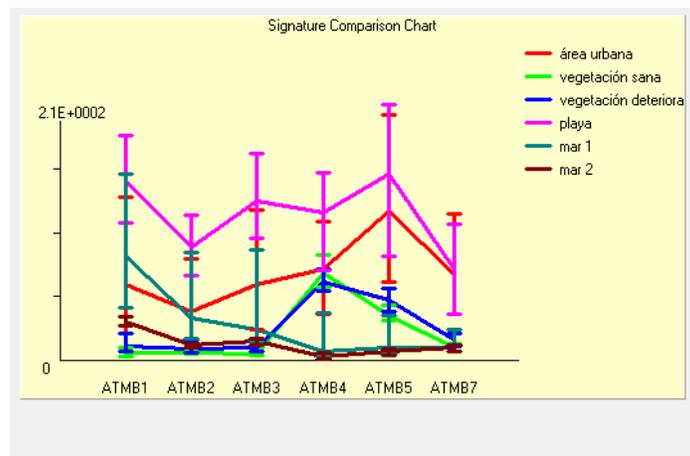


Figura 19.- Campos de entrenamiento definidos.

1: zona urbana; 4: playa (arena); 5: mar (mar subclase 1); 6: mar (mar subclase 2).

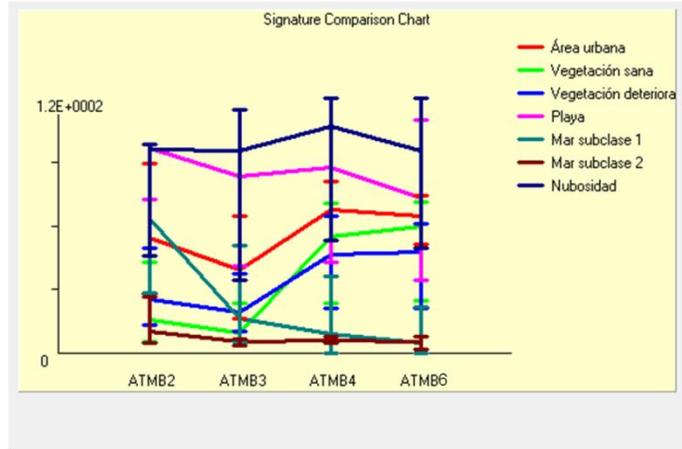
Con la ayuda de los campos de entrenamiento se obtuvieron las firmas espectrales de las cubiertas definidas previamente; en la gráfica 4 se aprecian las obtenidas con la imagen 2000. En ella se observa que el agua de mar subclase 1 presenta mayor reflectancia en las bandas 1 y 2 en comparación con la subclase 2, lo que indica características físico-químicas diferentes que

dependen de la mayor o menor influencia de la profundidad, transparencia del agua, partículas en suspensión, color del piso marino, densidad y temperatura del agua, entre otras. Las dos subclases de vegetación no presentan diferencias significativas, acaso una leve variación en la banda cuatro, en la que la vegetación sana tiene una respuesta espectral mayor y en las bandas cinco y siete, menor en contraste con la subclase que representa a la vegetación deteriorada. La playa se observa aislada de las demás firmas; sin embargo, presenta alguna semejanza en la reflectancia con la clase urbana en las bandas 4, 5 y 7 por la superposición de rangos de reflectancia, lo que es más evidente en la banda 7. Finalmente, la firma espectral correspondiente al área urbana está claramente diferenciada de las restantes, excepto por las semejanzas encontradas con la clase de playa. De igual modo se llega a apreciar una similitud en la reflectancia con la vegetación sana.



Gráfica 4.- Firmas espectrales de la imagen 2000

En el caso de las firmas espectrales de la imagen Landsat del año 1990, el área urbana se destaca en color rojo en la gráfica 5 y de igual modo se encuentra claramente separada de las otras firmas con un leve descenso en la banda 3 (rojo) y un repunte en las bandas 4 y 6 (infrarrojo cercano e infrarrojo medio). Las firmas de la vegetación tienen mayor diferencia en la reflectancia en las bandas 2 y 6 lo que podría indicar un área con mayor deterioro en esa fecha en relación a la presente en el año 2000. En cuanto a las firmas de las dos subclases de mar, a semejanza del año 2000, están bien diferenciadas lo cual se refleja también visualmente en los colores verdaderos.



Gráfica 5.- Firmas espectrales de la imagen 1990

Las firmas espectrales obtenidas a partir de las bandas de la imagen de 1990 incluyen una clase correspondiente a la nubosidad, debido a la presencia de una pequeña nube sobre la vegetación, con la intención de separarla de la clase Playa, pues en intentos previos se observó que los píxeles quedaban clasificados en ambos grupos, dando un resultado falso para la clase Playa. Las imágenes resultantes de este proceso se presentan en las figuras 20 y 21, la primera para el año 1990 y la segunda para el año 2000.

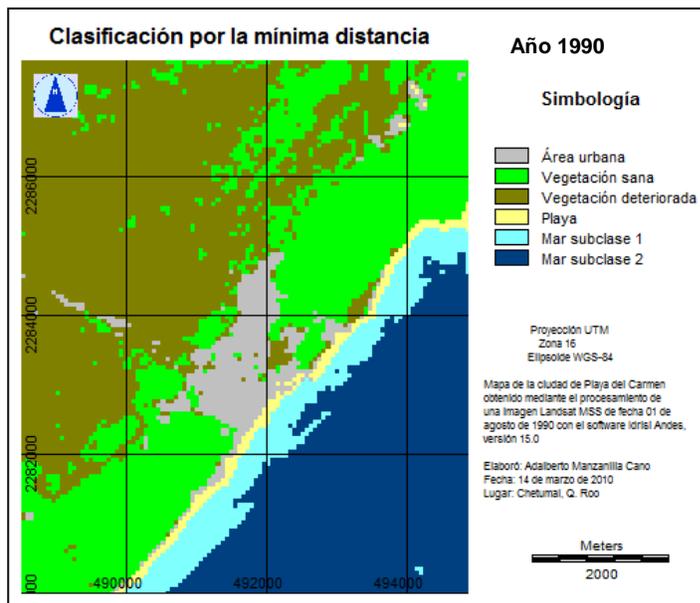


Figura 20.- Clasificación supervisada para el año 1990

En la clasificación de la imagen del año 1990 se llegan a apreciar algunos píxeles clasificados como subclase de mar 1 dentro de la subclase 2 en la parte inferior derecha de la imagen. Al parecer el objeto que está representado por estos píxeles corresponde realmente a una embarcación conocida como transbordador, misma que transporta a pasajeros entre la ciudad de Playa del Carmen y la isla de Cozumel.

El área urbana se presenta en color gris; la vegetación sana en color verde brillante; en café la vegetación deteriorada; la playa en amarillo; en azul claro el mar subclase 1 y en azul oscuro el mar subclase 2.

La figura 21 representa la clasificación obtenida con la imagen del año 2000. En ella destaca un pequeño grupo de píxeles clasificados como mar subclase 2 dentro de una zona de vegetación (parte inferior izquierda de la imagen), la cual en realidad corresponde a un lago artificial de un complejo turístico ubicado en la zona.

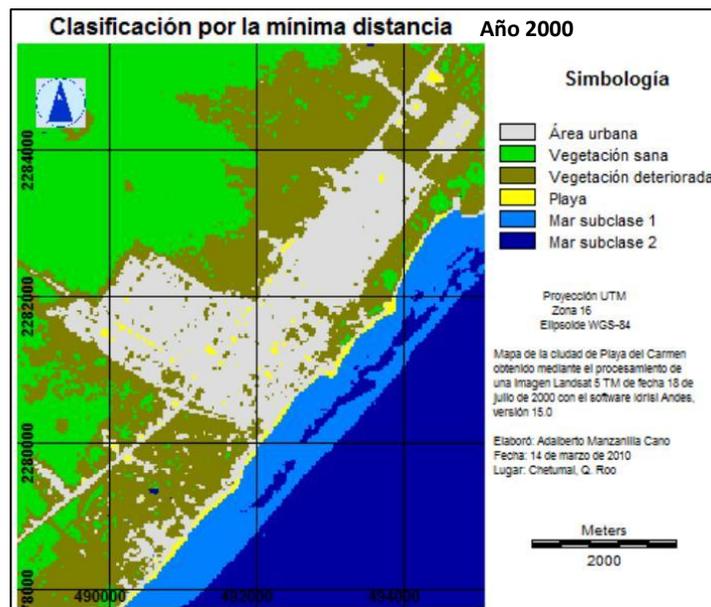


Figura 21.- Clasificación supervisada para el año 2000

El área urbana se presenta en color gris; la vegetación sana en color verde brillante; en café la vegetación deteriorada; la playa en amarillo; en azul claro el mar subclase 1 y en azul oscuro el mar subclase 2.

III.7 Verificación de la clasificación

Se generaron puntos de muestreo aleatorio-estratificado con el software Idrisi Andes obteniendo un archivo vectorial de 350 y 349 puntos (imágenes 1990 y 2000, respectivamente) según se observa en la tabla 10; mismos que se superpusieron a ambas imágenes clasificadas para analizar y cuantificar cuántos puntos corresponden a cada clase (ejemplo en la figura 22), lo cual

finalmente se hizo mediante una tabulación cruzada. De igual manera, en la figura 23 la capa de puntos se representó en una fotografía aérea escala 1:75,000 del INEGI (1991), tomada en el mes de marzo y en Google Earth (figura 24) para poder validar los errores de la clasificación. Previamente, con la ayuda del software ArcGIS 9.3 se georreferenció la fotografía aérea en la proyección UTM zona 16. Con el mismo programa el archivo vectorial de puntos generado en Idrisi Andes se transformó en el formato nativo de Google Earth, con extensión KML, con lo cual se logró contar con otra fuente de información para validar la calidad de la clasificación.

Tabla 10.- Puntos aleatorios por cada clase en las imágenes clasificadas 1990 y 2000

Imagen	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Clase 6	Total
1990	16	96	129	5	23	81	350
2000	60	78	104	5	28	74	349

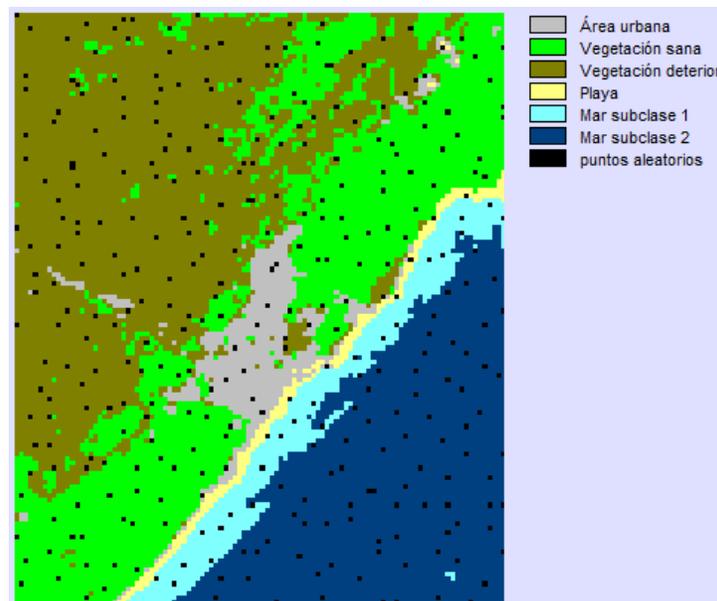


Figura 22.- Puntos aleatorios sobre la imagen 1990 clasificada

Para la validación de la clasificación también se consultó el plano de localidad urbana de Playa del Carmen de los años 1990 y 2000, así como el croquis municipal de Solidaridad del año 2000, publicados por el INEGI en esos años, mismos que se utilizaron como base cartográfica para los eventos censales de ambos cortes. En la figura 24 se aprecia un recuadro negro que simula el contorno de la imagen de 1990; en color amarillo el polígono digitalizado de la mancha urbana a

partir del plano de localidad impreso del año 1990, representado espacialmente en Google Earth , que conjuntamente con los puntos aleatorios (en color rojo) coadyuvaron a verificar la calidad de la clasificación.

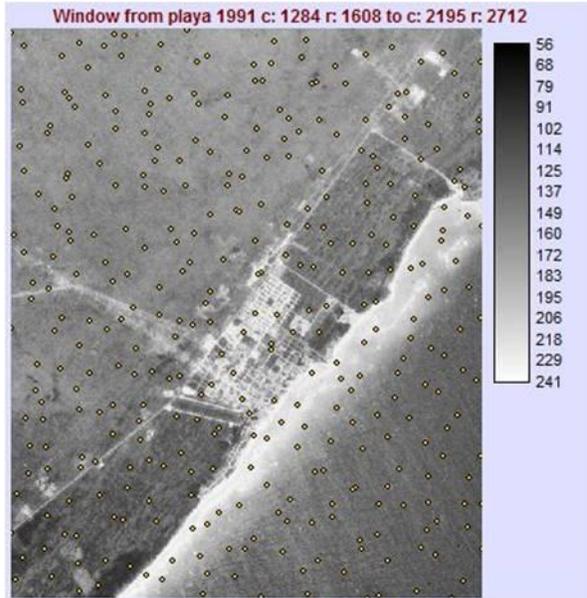


Figura 23.- Puntos aleatorios sobre la fotografía aérea de 1991



Figura 24.- Puntos aleatorios y mancha urbana de Playa del Carmen, año 1990 en Google Earth

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN

Como resultado de los procesos realizados se generaron los mapas de clasificación para ambas imágenes (1990 y 2000) con base en el método de la mínima distancia, que representó mejor la realidad de los píxeles estimados con los campos de entrenamiento y firmas espectrales. Estos mapas están representados en las figuras 20 y 21, en donde se aprecia la cobertura y distribución geográfica de las clases en el área estudiada.

En ambas imágenes la zona urbana está representada en color gris. Las zonas cubiertas por vegetación sana y deteriorada se visualizan en color verde brillante y café, respectivamente. Se nota claramente la frontera entre la vegetación sana y la mancha urbana. En la clasificación del año 2000, la ciudad es circundada por la vegetación deteriorada, lo cual no se observa en la clasificación del año 1990. Las arenas de la playa están coloreadas de amarillo, es notorio el contraste del área ocupada por la cubierta arenosa en 1990 y la encontrada en el 2000, en la que se observa un decrecimiento. El agua marina subclase 1 ha quedado en azul claro y está ubicada en la zona aledaña a la playa, el agua de mar subclase 2, en color azul oscuro se localiza después de la clase anterior alejándose de la costa. En el año 2000 algunas porciones de mar subclase 2 quedaron clasificadas dentro del mar definido como subclase 1. En lo que respecta a las aguas marinas, la clasificación fue hecha considerando su respuesta espectral y la profundidad estimada a priori. Un estudio de batimetría del mar de la zona de Playa del Carmen realizado por Gajá (2007), indica que hasta los siete metros de profundidad la pendiente submarina es suave, y después de ese límite la pendiente se torna más pronunciada. Con base en tales características físicas de esta zona marina, que revelan poca profundidad en las cercanías a la costa (Mar subclase 1) y lo contrario conforme la distancia aumenta hacia aguas abiertas (Mar subclase 2), así como por su mayor o menor transparencia, se infiere que parte del material en suspensión y fondo marino, con características espectrales distintas aunque con una ubicación espacial semejante al medio en la que se encuentran, ha sido captado por el sensor y se ha clasificado como Mar subclase 2, misma que se observa en las figuras 20 y 21 como manchones inmersos en las aguas catalogadas como Mar subclase 1.

En la tabla 11 se presentan las superficies resultantes de la clasificación realizada en las imágenes de los años 1990 y 2000. En la última columna se indican las diferencias entre ambos años.

Tabla 11.- Superficies por año y clase (hectáreas)

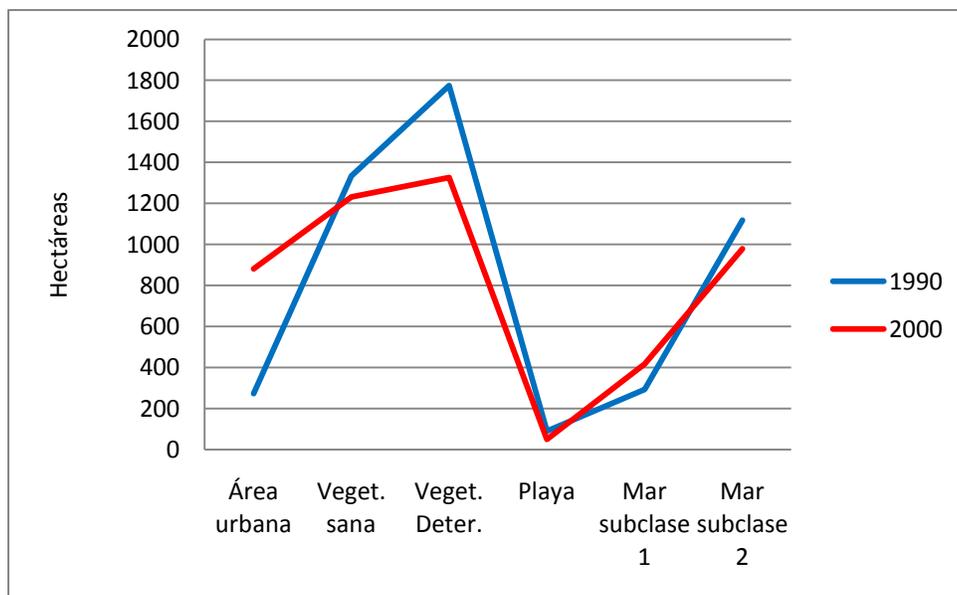
Clase	1990	2000	Diferencia
Área urbana	272.88	880.92	+608.04
Vegetación sana	1 334.52	1 231.20	-103.32
Vegetación deteriorada	1 775.16	1 326.60	-448.56
Playa	90	49.32	-40.68
Mar subclase 1	293.4	417.96	+124.56
Mar subclase 2	1 118.52	978.48	-140.04
Total	4 884.48	4 884.48	0

En relación a las superficies ocupadas por cada material estudiado, concentradas en la tabla 11, es notorio el crecimiento que ha tenido el área urbana en un lapso de diez años, pasando de una superficie ocupada en 1990 de 272.88 hectáreas (ha) aproximadamente a 880.92 en el año 2000, lo que representa un crecimiento de 608.04 ha, que promedia un aumento de 60.8 ha por año. En contraste, las superficies de cubierta vegetal han disminuido en conjunto 551.88 ha en el mismo periodo, que sumado al decrecimiento de la franja arenosa (40.68 ha) da un total de 592.56 ha, superficie muy cercana al incremento observado en la zona urbana.

Estas cifras son indicativas de una expansión de la mancha urbana en detrimento de las superficies ocupada por la selva y por la playa asociado al establecimiento de algún tipo de infraestructura inmobiliaria en los terrenos originales. La gráfica 6 representa los cambios temporales en superficie de las coberturas estudiadas. En cuanto a los cambios del mar se refiere, se observa un decrecimiento de la subclase 1 y un crecimiento de la subclase 2. La profundidad del mar en ambas subclases no explica estos cambios pues no se ha presentado ningún fenómeno que lo haya alterado, a la vez el comportamiento de las mareas debió ser similar ya que la imagen de 1990 se tomó a las 15:30 Zulu (Z) y la de 2000 a las 15:46Z, horas del día cercanas entre sí. Es más probable que estos cambios estén influenciados por las diferentes concentraciones de clorofila en los meses en que fueron adquiridas las imágenes, la del año 1990 se tomó en el mes de agosto mientras la del año 2000 corresponde al mes de junio. Otro factor relevante es el impacto en la zona del huracán Gilberto en septiembre de 1988, dos años de diferencia respecto a la primera imagen, de la que probablemente aún se estaba recuperando el ecosistema marino de la región en el año 1990. La presencia de vientos superficiales es otro factor de relevancia, de acuerdo a los

registros publicados en el Atlas Climático Digital de México, en el periodo 1999-2006 el comportamiento del viento climatológico superficial mensual en el mar, frente a la costa oriente de Quintana Roo, es el siguiente: en agosto la dirección del viento sobre el mar predomina hacia el oeste con magnitudes muy cercanas a 4 m/s; durante junio la dirección es hacia el oeste-noroeste, con magnitudes cercanas a 8 m/s (Fernández *et al.*, 2010). Estas diferencias pueden originar cambios en las concentraciones de la sustancia amarilla y de la clorofila afectando la respuesta espectral.

Dicho de otra manera, las zonas de mar que en el año 1990 quedaron clasificadas como subclase 1, en la imagen del año 2000, por la influencia de los factores mencionados quedaron como subclase 2. Gráficamente se observa que la aparente pérdida de cubierta marina de la subclase 2, en su mayor parte ha quedado incluida en la subclase 1 en el año 2000.



Gráfica 6.- Superficies obtenidas por clase y por año

Las superficies ocupadas por cada clase se presentan en dos colores: en azul los valores correspondientes al año 1990, en rojo los del año 2000. Los valores de superficie están indicados en hectáreas. Los mayores cambios en hectáreas se presentan en la clase urbana y vegetación deteriorada.

Con los insumos mencionados anteriormente (apartado III.7 Verificación de la clasificación), utilizados para la validación de las clases definidas en la clasificación supervisada, se obtuvieron los

resultados que se ilustran en la tabla 12 para el año de 1990. Los errores por omisión y por comisión están cerca del 20 %, lo cual es el promedio de todas las clases.

Tabla 12.- Matriz de errores de la clasificación por mínima distancia del año 1990

Clasificación	Realidad							Promedio
	Área urbana	Veget. Sana	Veget. Deter.	Playa	Mar subclase 1	Mar subclase 2	%	
Área urbana	12	2	2	0	0	0	75	79.6 % en comisión
Vegetación sana	3	93	0	0	0	0	97	
Vegetación deteriorada	4	0	125	0	0	0	97	
Playa	1	1	1	1	1	0	20	
Mar subclase 1	0	0	0	1	22	0	96	
Mar subclase 2	0	0	0	0	6	75	93	
%	60	97	98	50	76	100		
Promedio	80.1 % en omisión							

Los valores de la matriz están expresados en cantidad de píxeles contenidos en cada clase. El promedio se refiere al porcentaje de aproximación general por errores de comisión y de omisión. En el caso de la clase 1, que corresponde al área urbana, se observa que la exactitud de la clasificación en puntos omitidos es del 60 %, y en la aproximación por comisión es mayor (75 %). La precisión relativamente baja posiblemente se deba a similitudes de reflectancia de la clase urbana con la clase de vegetación deteriorada.

Los mejores resultados se alcanzan en las cubiertas clasificadas como aguas marinas y vegetación, lo cual se explica dado el alto número de puntos de muestreo localizados en ellas por su mayor presencia en las imágenes; en tanto, los resultados con mayor imprecisión se obtuvieron en la definición de las playas, en buena parte influenciado por el escaso número de puntos que aleatoriamente se ubicaron en dicha cubierta (5 únicamente) y por la reflectancia similar al suelo urbano y vegetación en la frontera entre arena-suelo urbano y arena-vegetación.

Para el año 2000, la aproximación en comisión es cerca del 87 % y por omisión cerca del 84 %, de acuerdo a los resultados que se presentan en la tabla 13, que muestra la matriz de errores de la

clasificación de la imagen del año 2000. El promedio de este porcentaje es de 0.855, superior al alcanzado en la matriz de errores del año 1990, cuyo promedio de ambos errores es del 79.85 %.

La clasificación realizada para la zona identificada como urbana a través de las firmas espectrales generadas con los campos de entrenamiento tiene una exactitud del 98% en el error por comisión y un 90% por omisión.

Tabla 13.- Matriz de errores de la clasificación por la mínima distancia del año 2000

Clasificación	Realidad							Promedio
	Área urbana	Veget. sana	Veget. deter.	Playa	Mar subclase 1	Mar subclase 2	%	
Área urbana	65	0	1	0	0	0	98	86.8 % en comisión
Vegetación sana	0	83	4	0	0	0	95	
Vegetación deteriorada	6	0	83	0	0	0	93	
Playa	1	0	0	2	0	0	67	
Mar subclase 1	0	0	0	1	22	0	96	
Mar subclase 2	0	0	0	0	21	54	72	
%	90	100	94	67	51	100		
Promedio	83.7 % en omisión							

Los valores de la matriz están expresados en cantidad de píxeles contenidos en cada clase. El promedio se refiere al porcentaje de aproximación general por errores de comisión y de omisión.

En la clasificación de la vegetación en ambas subclases (sana y deteriorada), los resultados son de alta precisión tanto en los errores por comisión como por omisión, siendo el valor mínimo obtenido un 94 % en éste último para la vegetación deteriorada. Para alcanzar estos resultados tuvo influencia la gran cantidad de puntos que se ubicaron al azar en las dos subclases (87 puntos para la vegetación sana y 89 para la vegetación deteriorada, ambos los más altos de todas las clases). La clase identificada como áreas de playas presentó la más baja calificación con un 67 % en ambos tipos de errores. Es posible que este resultado esté afectado por el escaso número de puntos que aleatoriamente se ubicaron (3) en esta clase, debido a que la zona de playa está formada por una franja de aproximadamente 80 metros de ancho a lo largo del litoral. Previo a la validación de la clasificación en ambas sub-imágenes, se generó en varias ocasiones la nube de puntos aleatorios hasta obtener el mayor número de puntos en la playa, que finalmente es el que

se utilizó en el presente trabajo. El mar definido como subclase 1 tuvo un 96 % de aproximación en el error por comisión y de 51 % por omisión. Éste último resultado por las diferencias de color del mar en la imagen de Google Earth usada para verificación de la clasificación, que data del año 2007, siete años de distancia en el tiempo en los que han ocurrido cambios físico-químicos en la constitución de este cuerpo de agua. Un fenómeno natural que de acuerdo a este resultado ha tenido lugar en las aguas próximas a las playas de la ciudad. Esta afirmación se realiza con base en el resultado para las aguas lejanas (mar subclase 2), en donde se obtuvo un 72 % por los errores por comisión, pues de 75 puntos de muestreo 21 pertenecieron al mar subclase 1 durante la validación. En los errores por omisión se obtuvo un 100 % para esta cubierta marina.

IV.1 Matriz de cambio

A partir de las imágenes clasificadas de los años 1990 y 2000 se generó la matriz de cambio por medio de la tabulación cruzada, cuyos resultados se muestran en la tabla 14. La clase que fue más afectada en porcentaje y en sentido negativo es la que comprende la zona de playas, pues el área que ocupa en la imagen estudiada es la de menor extensión, presentando un decrecimiento del 45.2 % asociado al establecimiento de infraestructura como hoteles, villas turísticas, obras de urbanización cercanas al mar, restaurantes con palapas construidas en la playa y otros similares. Las dos clases de vegetación tuvieron un retroceso en el área ocupada. La vegetación sana decreció en un 7.74 % y la vegetación con deterioro decreció en un 25.29 %. El agua representado por el Mar 1 subclase y Mar subclase 2 tuvo un cambio a favor de 42.45 % y en contra de 12.52 %, respectivamente.

En cuanto a la superficie ocupada por cada clase, el área urbana es la clase que presenta mayor cambio a favor, ganando 608.04 ha en diez años, en tanto que la vegetación deteriorada es la más afectada con una pérdida de 448.56 ha. De modo general, las diversas clases cedieron alguna superficie a la clase urbana del año inicial al final, debido a la expansión que ha experimentado en el decenio de estudio. La vegetación presente en las inmediaciones de la mancha urbana no ha sido una limitante para el crecimiento de la ciudad, en gran medida por la topografía del lugar que es llana; no existen rasgos fisiográficos adversos que sirvan de barrera ante el fenómeno urbano, excepto el Mar Caribe. Otro aspecto que viene a ser un factor de importancia es la presencia de tierras de propiedad social en la zona en donde la ciudad ha tenido su mayor crecimiento, en la

parte poniente, aportando el ejido de Playa del Carmen una gran superficie destinada al reparto de terrenos con fines habitacionales.

Tabla 14.- Matriz de cambio en la zona de Playa del Carmen en el periodo 1990-2000 (en miles de m²)

Imagen 2000	Imagen 1990						Total
	Área urbana	Vegetación sana	Vegetación deteriorada	Playa	Mar subclase 1	Mar subclase 2	
Área urbana	1 839.6	4 183.2	2 314.8	406.8	64.8	0	8 809.2
Vegetación sana	28.8	1 810.8	10 425.6	46.8	0	0	12 312
Vegetación deteriorada	752.4	7 282.8	4 939.2	284.4	7.2	0	13 266
Playa	104.4	54	61.2	108	165.6	0	493.2
Mar subclase 1	3.6	7.2	0	54	2 620.8	1 494	4 179.6
Mar subclase 2	0	7.2	10.8	0	75.6	9 691.2	9 784.8
Total	2 728.8	13 345.2	17 751.6	900	2 934	11 185.2	
Cambio (miles de m²)	6 080.4	-1 033.2	-4 485.6	-406.8	1 245.6	-1 400.4	
Cambio (ha)	608.04	-103.32	-448.56	-40.68	124.56	-140.04	
Cambio (%)	222.82	-7.74	-25.29	-45.2	42.45	-12.52	

La interpretación que se le puede dar a cada cifra obtenida se limita al ámbito estadístico en primer término, pues el objetivo del trabajo de investigación así lo indica. Sin embargo, en un segundo plano, las cifras resultantes en la matriz de cambio representan diversas tendencias que pueden servir de base para efectuar estudios específicos, sea en proyectos relacionados con cada clase estudiada o bien, vinculadas con éstas o considerando otras variables de interés.

IV.2 Mapas booleanos

En la figura 25 se aprecia el cambio que tuvo la ciudad de Playa del Carmen del año 1990 al 2000, ilustrándose en color negro las áreas que fueron clasificadas como zona urbana de acuerdo a la firma espectral que presentaron los grupos de píxeles identificados como parte de la ciudad. Éstos representan los niveles digitales correspondientes a los techos de las viviendas (de concreto y de otros materiales), calles pavimentadas, solares con mezcla de viviendas, suelo desnudo, vegetación de traspatio, jardines pequeños. Incluye zonas ubicadas en la periferia que al momento de la adquisición de la imagen por el sensor presentaban algún proceso de urbanización, siendo más notorio en la imagen del año 1990. Al comparar con el mapa booleano del año 2000 se observa que parte de estas zonas urbanas periféricas cambiaron a otras clases.

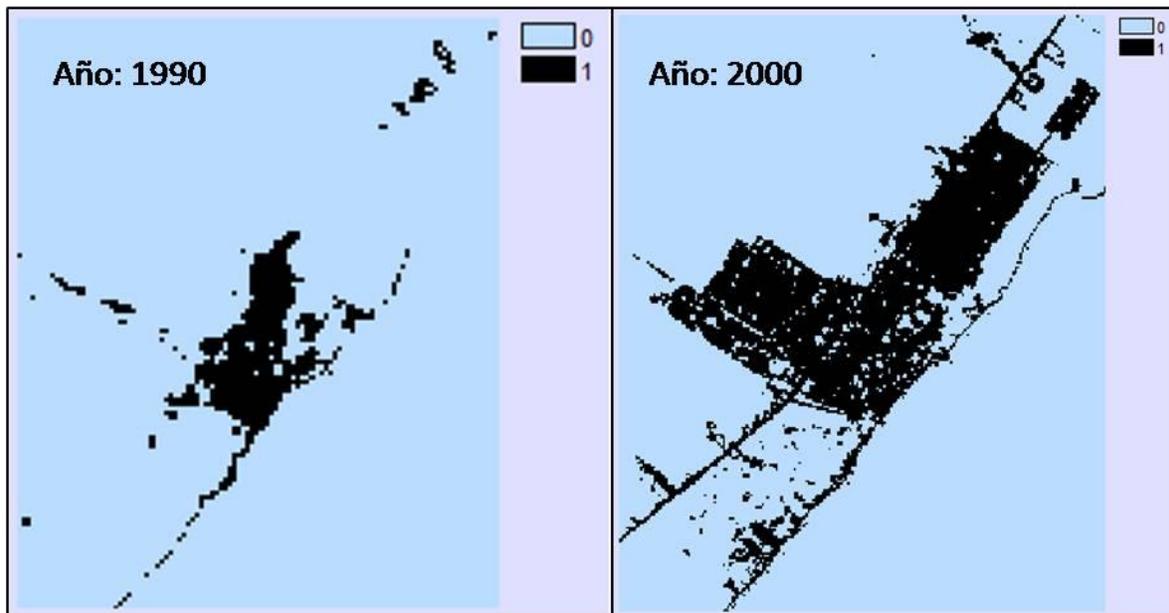


Figura 25.- Mapas booleanos del área urbana de Playa del Carmen de los años 1990 y 2000

En estos mapas se presenta en color negro (clase 1) el área clasificada como zona urbana, incluyendo las áreas netamente urbanas, carreteras pavimentadas y áreas de suelo desnudo. El resto de las clases quedaron agrupadas en una sola (clase 0) y se representan en color azul.

La clase que comprende las arenas de la playa tuvo una disminución para el año 2000, apreciándose en el mapa respectivo que la zona urbana creció también sobre la costa hacia el noreste y suroeste de la ciudad, en los lugares en donde antes se había detectado la presencia de arena (cotejar el mapa booleano del 2000 con los mapas de clasificación de las figuras 20 y 21).

De igual modo se aprecian dentro de la zona urbana, principalmente en el mapa booleano 2000, grupos de píxeles que no quedaron clasificados como urbanos. Se encontró que una parte de ellos corresponde a vegetación y otra parte a suelo con alta reflectancia en el visible, con gran similitud a las arenas blancas por lo quedaron clasificados dentro de la clase playa.

Finalmente, las carreteras han quedado clasificadas en su mayoría como clase urbana, siendo más notorio en la imagen del año 2000, en donde la carretera, por ser de cuatro carriles y medir aproximadamente 60 metros de ancho, se logró identificar en el proceso de clasificación según se observa en los mapas de clasificaciones (figuras 20 y 21). En la imagen de 1990 la carretera era de dos carriles (12 metros de ancho) quedando clasificada dentro de la clase de vegetación sana. En este caso el ancho de la carretera no fue lo suficientemente amplia para dar una respuesta espectral que dominara sobre la vegetación, conformándose entonces el pixel con la mayor aportación de reflectancia de las plantas en combinación con la respuesta del pavimento. Es consecuencia de la resolución espacial, en donde los 12 metros de ancho son menores a los 60 metros por lado del pixel.

Las sub-imágenes estudiadas en el presente trabajo cubren la zona urbana que ocupa Playa del Carmen y lugares aledaños en proceso de urbanización, representando una superficie aproximada de 4 884.48 ha. Esta región comprende parte de la zona continental al oriente de la Península de Yucatán y parte de las aguas del Mar Caribe, siendo sus respuestas espectrales derivadas de las composiciones a color e índice de vegetación normalizado las que determinaron el número de clases a identificar. La clase correspondiente a la zona urbana, de acuerdo a su firma espectral y píxeles que resultaron representativos en la clasificación supervisada, incluye no solamente las construcciones y vialidades, sino también áreas de suelo desnudo o su mezcla con algunas porciones de vegetación y/o construcciones urbanas. Estas variaciones se reflejaron en la matriz de cambio en donde una parte de la zona clasificada como urbana en el año 1990, para el año 2000 tuvo una conversión a vegetación deteriorada y en menor medida a playa y vegetación sana. Por un lado, los resultados indican que aquellas áreas de suelo desnudo con alguna presencia de vegetación o rasgos urbanos finalmente no se urbanizaron ni se integraron al resto de la mancha urbana, iniciándose entonces el proceso inverso: conversión a áreas verdes con distintos grados de recuperación. Por otro lado, las calles que en el año 1990 reflejaban caminos y veredas sin pavimentar, hacia el año 2000 mostraron cierto grado de evolución, con material de relleno que

tiene alta respuesta espectral en el rango del visible, muy similar al de las playas por lo que algunos píxeles quedaron clasificados como tales dentro de la zona urbana.

Asimismo, se establecieron dos subclases de vegetación y dos de aguas marinas por las diferencias observadas en el color y contraste entre las mismas clases. En el caso de la vegetación, en el año 1990, de acuerdo al NDVI se ha identificado una franja de vegetación sana de aproximadamente 1500 metros de ancho paralela a la costa (ver figura 20). El resto de la vegetación ha sido clasificada con algún grado de deterioro con base en sus rasgos de reflectancia en el infrarrojo cercano. En la imagen del año 2000, con la aplicación del NDVI, la situación se invirtió: las zonas de vegetación sana pasaron a ser vegetación deteriorada y ésta cambió a sana (ver figura 21). La explicación de este comportamiento de la vegetación se encuentra en diferentes ocurrencias de la época de lluvias para ambos años (agosto 1990 y junio 2000), la presencia de algún fenómeno meteorológico previo a la adquisición de las imágenes que haya dañado la cubierta vegetal e incluso la afectación por incendios forestales, o efectos combinados. Estas diferencias encontradas en la vegetación puede ser un tema que se estudie por separado con mayor profundidad incorporando otras variables.

En lo que respecta a las aguas marinas, el comportamiento que han tenido ambas subclases han sido complementarias entre sí: la subclase 1 aumentó en superficie 124.56 ha de 1990 al año 2000, mientras la subclase 2 disminuyó 140.04 ha en el mismo periodo. Las diferencias encontradas son influenciadas por las variaciones en la materia disuelta en el agua, la evolución que presenta la playa y hasta los mismos huracanes que se han presentado en años cercanos al decenio estudiado. De acuerdo a los registros del National Hurricane Center de la NOAA (2010), ilustrados en la figura 6, el ojo del huracán Gilbert pasó sobre la localidad de Playa del Carmen en 1988 y el huracán Roxane impactó la zona en 1995 con vientos de tormenta (NOAA, 2010), ocasionando erosión de las playas y pequeños cambios en la forma del litoral. En particular, la costa de la Riviera Maya es muy frágil ante los fenómenos meteorológicos que continuamente modifican su morfología (PNUMA *et al.*, 2008), además, el transporte de arenas de playa presenta gran dinamismo con movimientos cíclicos anuales, propiciando que el paisaje varíe durante diferentes épocas (Gobierno del Municipio de Solidaridad, 2002). Por ello es muy probable que hayan ocurrido cambios significativos en la amplitud de la franja costera que ocasionaron la disminución de 40.68 ha de playa entre 1990 y 2000 en la zona estudiada.

La matriz de cambio generada a partir de los mapas de clasificación demuestra que el área urbana se incrementó en un 222.83 % respecto al año 1990 y que en general las clases restantes decrecieron en diferentes porcentajes. Este cambio que presenta el área urbana en superficie se ha observado también en la población reportada en los resultados de los censos de 1990 y 2000, publicados por el INEGI, concentrados en la tabla 2. De acuerdo a estas cifras, para el año 2000 se incrementó en un 1 407 % la población y en un 1 705 % el número de viviendas tomando como punto de referencia las cifras del año 1990, lo cual representó el gran despegue urbano de Playa del Carmen, pues en ningún decenio anterior se había presentado esta situación. Las cifras oficiales del XIII Censo General de Población y Vivienda indican que la población de esta ciudad alcanzó los 149 923 habitantes y 46 145 viviendas en el año 2010 (INEGI, 2011). En el periodo 2000-2010, en términos porcentuales las cifras de población de Playa del Carmen tuvieron un incremento del 344 % y las de vivienda del 381 %; las proyecciones del Consejo Estatal de Población de Quintana Roo (COESPO, 2010), estimaban una población de 167 967 habitantes para el año 2010. Con base en estas cifras se pretende efectuar estudios complementarios de esta investigación, incorporando una sub-imagen Landsat 5 de fecha cercana al evento censal del 2010 para obtener nuevos resultados sobre el tema.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

En el estudio del crecimiento urbano han sido de gran utilidad las imágenes obtenidas por los sensores satelitales. El empleo de imágenes Landsat 5 para analizar el crecimiento de la mancha urbana de Playa del Carmen ha permitido generar mapas de clasificación de materiales superficiales, y a partir de estos generar matrices de error y de cambio, así como mapas booleanos. Se emplearon imágenes del sensor MSS para el año 1990 y del sensor TM para el año 2000. La resolución espacial de ambas imágenes tiene diferencias que para el propósito de este estudio puede introducir algún error en los resultados. El tamaño del píxel de la imagen de 1990 es de 60 metros por lado, y para la del año 2000 es de 30 metros. La incertidumbre que se pudo haber introducido se debe a que en un espacio de 60 x 60 metros pueden estar presentes en el terreno diferentes elementos de tamaño o cobertura menor al píxel, por lo que es posible que se hayan clasificado en una clase diferente, como el caso de la carretera. Por otro lado, algún elemento superficial que abarque mayor área en comparación con otras, dominará la respuesta espectral reflejada en el nivel digital del píxel ocultando la presencia de otros materiales y aumentando la superficie total representada. En el caso de la resolución de 30 metros, esta situación se reduce significativamente.

No obstante los errores que a causa de las diferencias en resolución espacial y espectral de los sensores que capturaron las imágenes empleadas, y los que involuntariamente se introdujeron en la generación de las firmas espectrales que sirvieron para la clasificación de los píxeles, se puede afirmar que los resultados de las matrices y los mapas elaborados forman parte de los incipientes estudios que a la fecha se han realizado en esta zona del país en materia urbana. De manera colateral se pudo detectar la escasa bibliografía de origen académico existente a la fecha sobre el tema de estudio. Emerge entonces un área de oportunidad que sugiere efectuar en un futuro próximo pero sobre todo inmediato, mayores estudios relacionados con el fenómeno urbano y sus efectos en el entorno ecológico en la zona de la Riviera Maya, la mayor puerta de entrada de divisas por turismo en México.

La mancha urbana de la ciudad de Playa de Carmen creció 6.0804 km^2 , equivalentes a un 222.83 % en el periodo de 1990-2000. Por lo cual se calcula un crecimiento anual promedio de 0.608 km^2 .

Los cambios que se presentaron en las clases de vegetación, playa y mar revelan un posible impacto ambiental derivado de la expansión urbana de Playa del Carmen y por las actividades turísticas que se realizan en las playas, aguas y selva, por lo que sería adecuado efectuar estudios específicos en cada uno de estos temas para evaluar el efecto de tales factores de cambio sobre los elementos naturales.

Los resultados de este estudio pueden coadyuvar en concretar nuevos proyectos y efectuar nuevas estimaciones orientadas a:

- satisfacer las necesidades de suelo que demanda la sociedad para edificación de viviendas
- garantizar las reservas de suelo para crecimientos futuros
- ordenar y regular las tendencias de crecimiento del área urbana
- cuantificar la superficie de playa perdida
- diagnosticar el estado actual de la selva y playas (arena y mar) que circundan la ciudad
- conocer necesidades de infraestructura básica y recursos a invertir en desarrollo social en áreas de potencial crecimiento urbano

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre Gómez, Raúl, 2002. Los mares mexicanos a través de la percepción remota. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y Plaza y Valdés, S. A. de C. V. Primera Edición. México, D.F. p. 15.

Bense, Tomás, 2007. Introducción a la percepción remota, tutorial (<http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm>). Página Web consultada el 20 de febrero de 2010.

Campos Cámara, Bonnie Lucía, 2007. Procesos de urbanización y turismo en Playa del Carmen, Quintana Roo. Editorial Plaza y Valdés, S. A. de C. V. Primera edición, México, D.F. p. Chavez, Jr., Pat S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote sensing of environment 24:459-479. Arizona, U.S.A.

Chuvieco, Emilio, 2002. Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio. Editorial Ariel, 1a. edición, Barcelona, España. 586 p.

CICEANA, 2007 (<http://www.ciceana.org.mx/recursos/Percepcion%20remota.pdf>). Página Web consultada el 18 de febrero de 2010.

Consejo Estatal de Población de Quintana Roo (COESPO), 2010. (<http://coespo.qroo.gob.mx/>). Página Web consultada el 2 de febrero de 2010.

El Colegio de la Frontera Sur, 2008. Informe final. Calidad de agua y dispersión de contaminantes en la zona costera de la Riviera Maya (Playa del Carmen, Quintana Roo). Chetumal, Quintana Roo, 121 p.

Geomensor, El, 2010. Sección Biblioteca, apartado Teledetección. (<http://www.elgeomensor.cl/downloads/teledeteccion/index.php>) Página Web consultada el 5 de febrero de 2010.

Fernández-Eguiarte A., J. Zavala-Hidalgo., R. Romero-Centeno. 2010. Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM (<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>).

Gajá Ferrer, Santiago, 2007. Características y modelación numérica del oleaje en dos regiones costeras del Caribe Mexicano: Playa del Carmen y Akumal (Tesis). México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. 88 p.

GEOAMIGOS de Puerto Rico, 2010. Percepción Remota y Fotogrametría (http://geoamigos.tripod.com/remote_sensing.html). Página Web consultada el 5 de febrero de 2010.

Gobierno del Estado de Quintana Roo y FONATUR, 2002. Programa Subregional de Desarrollo Urbano de la Región Caribe Norte del Estado de Quintana Roo. Versión Abreviada.

Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2002. Programa Estatal de Desarrollo Urbano, 2 tomos. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo, p. 83.

Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2005. Plan Estatal de Desarrollo 2005-2011. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo el 5 de julio de 2005. Chetumal, Quintana Roo. 147 p.

Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2009. Decreto del ejecutivo del estado mediante el cual se establece el Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Solidaridad, Quintana Roo. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo, p. 23.

Gobierno del Municipio de Solidaridad, 2002. Programa Director de Desarrollo Urbano del Centro de Población Playa del Carmen 2002-2026. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo.

González Aguayo, Rafael, 2002. SIG, Diccionario de términos. 106 p.

González, Liliana y Rial, Pablo, Editores, 2004. Guía geográfica interactiva de Santa Cruz (<http://www.inta.gov.ar/santacruz/info/documentos/teledet/guiasc/>). Página Web consultada el 4 de febrero de 2010.

Herrera, V. 2001 Estudio del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia (Chile) a través del uso integrado de imágenes de satélite, SIG y equipos GPS. Publicado en la Revista de Teledetección.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010. Atlas Nacional Interactivo de México (<http://www.atlasdemexico.gob.mx/index1.cfm>). Página Web consultada el 27 de mayo de 2010.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2011 (<http://www.inegi.org.mx/>). Página Web consultada el 6 de marzo de 2011.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1984a. Carta edafológica escala 1:250 000, hoja Cozumel F16-11. 1a. edición.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1984b. Carta uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, hoja Cozumel F16-11. 1a. edición.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1988. Carta topográfica escala 1:50 000, hoja Playa del Carmen F16C69.1a. edición.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1991. Fotografía aérea L-1 No. 13, escala 1:75 000, Vuelo especial Costa Puerto Morelos Tulum, Q. Roo R-613/91, marzo de 1991. Formato digital.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2002. Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo. Aguascalientes, Ags. 80 p.

Jensen, John R., 1996. Introductory digital image processing, a remote sensing perspective. Segunda edición. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, U.S.A.

Lillesand, Thomas M., Kiefer, Ralph W. and Chipman, Jonathan W., 2008. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, Inc. Massachusetts, U.S.A. Sexta edición. Pp. 555-557.

Lira Chávez, Jorge. 2010. Tratamiento digital de imágenes multiespectrales. Instituto de Geofísica, UNAM, México, D. F. Segunda edición. 605 p.

Lira, Jorge. 1987. La Percepción remota: nuestros ojos desde el espacio. Fondo de Cultura Económica. México, D. F. Primera edición. P. 27

Martínez Muñoz, Julio. 2005. Percepción Remota, fundamentos de teledetección espacial. Comisión Nacional del Agua, México. 62 p.

NASA, 2001. Remote sensing in history (http://physics.ship.edu/~mrc/astro/NASA_Space_Science/observe.arc.nasa.gov/nasa/exhibits/history/history_0.html). Página Web consultada el 2 de febrero de 2010.

NASA, 2010a. Science Data Users Handbook

(http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_toc.html) Página Web consultada el 18 de febrero de 2010

NASA, 2010b. Sección MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Página Web consultada el 4 de febrero de 2010.

NASA, 2011. Sección Landsat (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>). Página Web consultada el 3 de abril de 2011.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2010. Historical hurricane tracks (<http://csc.noaa.gov/hurricanes/#>) Página Web consultada el 8 de febrero de 2010.

National Research Council, 1998. People and Pixles. Linking remote sensing and social science. National Academy Press. Washington, D. C. p. 28-50.

National Research Council, 2001. Transforming Remote Sensing Data into Information and Applications. National Academy Press. Washington, D. C. p. 8, 10, 11.

National Resources Canada, 2007. Fundamentals of Remote Sensing (tutorial) (http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_e.php). Página Web consultada el 4 de febrero de 2010.

Pinilla Ruiz, Carlos, 2006. Lección 4, Interacción de la radiación con la atmósfera (<http://www.ujaen.es/huesped/pidoceps/tel/archivos/4.pdf>). Página Web consultada el 21 de febrero de 2010.

Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Honorable Ayuntamiento del Municipio de Solidaridad y Now Planeta Limpio, A. C., 2008. Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Playa del Carmen.

Real Academia Española, 2010. Diccionario de la lengua española en línea, vigésima segunda edición (<http://www.rae.es/rae.html>) Página Web consultada el 2 de febrero de 2010.

Ruiz Fernández, Luis Ángel, Rey Pérez, Amelia del, Estornell Cremades, Javier y Ruiz Marín, Rafael, 2007. La Teledetección como herramienta de análisis del crecimiento urbano y su representación en 3D. Arquitectura, Ciudad y Entorno, vol. 2, número 4. Junio de 2007. Pp. 675-693.

Short, Nicholas M., 2009 The Remote Sensing Tutorial (<http://rst.gsfc.nasa.gov/>). Página Web consultada el 2 de febrero de 2010.

Torres-Vera, M. A., Prol-Ledesma, R. M. and Garcia-Lopez, D. 2009. Three decades of land use variations in Mexico City, *International Journal of Remote Sensing*, 30:1, p. 117 — 138.

University of Maryland, 1995. Atmospheric correction (<http://www.umiacs.umd.edu/labs/GC/atmo/index.html>). Página Web consultada el 30 de julio de 2010.

US Army Corps of Engineers, 2003. Remote sensing. *Engineering and Design*, p. 2-1.

Vivancos, Jordi, Llastarri, Albert, Grau, Mónica y Vivancos, Daniel, 2005. La Tierra a vista de satélite. Introducción a la Teledetección. Orientaciones didácticas y guía de utilización (<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/>). Página Web consultada el 20 de febrero de 2010.

Von Martini, Axel, Bragachini, Mario, Bianchini, Agustín, Martellotto, Eduardo, Méndez, Andrés, 2009. Percepción remota, Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi (<http://www.agriculturadeprecision.org/percrem/PercepcionRemota.htm>). 20 p. Página Web consultada el 20 de febrero de 2010.

Yuras, Gabriel, 2002. Introducción a la percepción remota del océano, Universidad de Chile. 101 p.