



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS**

INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS

TESIS

**ANÁLISIS DE LA DESTRUCCIÓN DE
LOS ECOSISTEMAS COSTEROS DE LA
RIVIERA MAYA, UTILIZANDO
FOTOGRAFÍAS AÉREAS E IMÁGENES
DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUCIÓN**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN BIOLOGÍA
MARINA Y MANEJO INTEGRAL
DE CUENCAS**

PRESENTA

LUIS ANDRÉS GÓMEZ URIETA

EDUARDO GABINO ARAGÓN CHANONA



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS

TESIS

ANÁLISIS DE LA DESTRUCCIÓN DE LOS
ECOSISTEMAS COSTEROS DE LA RIVIERA
MAYA, UTILIZANDO FOTOGRAFÍAS AÉREAS E
IMÁGENES DE SATÉLITE DE ALTA
RESOLUCIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN BIOLOGÍA MARINA Y
MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS

PRESENTA

LUIS ANDRÉS GÓMEZ URIETA

EDUARDO GABINO ARAGÓN CHANONA

Director

M. EN C. JOSÉ REYES DÍAZ GALLEGOS

Asesora

M. EN C. JOANNA ACOSTA VELÁZQUEZ



Agradecimientos

A nuestro director de Tesis M. EN C. José Reyes Díaz Gallegos le agradecemos el compromiso, guía, apoyo, profesionalismo y principalmente la enseñanza que nos ha dado de principio a fin en la elaboración de la investigación científica. A nuestra asesora M. EN C. Joanna Acosta Velázquez le agradecemos el tiempo, dedicación y acertadas observaciones que nos brindó para llevar a cabo este trabajo de investigación.

A cada uno de los sinodales revisores M. EN C. José Reyes Díaz Gallegos, M. EN C. Ignacio Díaz Galdámez, M. EN C. Delmar Cancino Hernández y Dr. Bartolo Cruz Romero les expresamos nuestra gratitud por cada una de las observaciones, correcciones y sugerencias que nos aportaron con la finalidad que esta investigación se concluyera satisfactoriamente.

Agradecemos nuestros colegas y amigos los biólogos Ángel David Trujillo Martínez y a Luis Felipe Ramos Álvarez por el apoyo moral, por estar siempre en los buenos y malos momentos y por todas las experiencias vividas durante el transcurso de la carrera universitaria y hasta la fecha.

Dedicatoria de Luis Andrés Gómez Urieta

Dedicado a mi madre Adriana Urieta, padre Guillermo Chávez, hermanas Frida y Arantzazu Urieta, tío Víctor Urieta y abuelos Pedro Urieta y Marlene Girón quienes son mi familia y me enseñaron que la unión hace la fuerza. Especialmente a mi madre Adriana Urieta Carranza por la paciencia, confianza, sacrificio y apoyo incondicional que siempre me ha brindado, a ti madre te agradezco absolutamente todo y dedico mis logros porque también son los tuyos, sin tu ayuda no hubieran sido posibles.

Y a mi abuelo Pedro Urieta Carbajal le agradezco los sabios consejos y experiencias que me ha compartido, le dedico este esfuerzo sobre todo por ser quien me ha heredado el gusto hacia la naturaleza y que me ha llevado a culminar esta gran profesión.

Dedicatoria de Eduardo Gabino Aragón Chanona

A mi madre Esther Chanona García y mi padre Gabino Eduardo Aragón Rincón, porque ellos han dado razón a mi vida, por sus consejos, su apoyo incondicional y su paciencia, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad y muchos de mis logros son gracias a su apoyo, entre los que se incluye este, todo lo que hoy soy es gracias a ustedes y siempre les estaré agradecido, nuevamente gracias por el amor y cariño brindado durante toda mi vida. A mis hermanas Blanca Irene y Lorena Paulina por compartir siempre y brindarme su apoyo incondicional, escuchando sus consejos y bromas, gracias por el apoyo otorgado día con día.

A mis abuelos y familiares más cercanos, por todos los consejos y experiencias que han inculcado de la mejor forma en mi vida y que me encaminaron por el buen sendero, les dedico este nuevo logro y objetivo cumplido.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	11
II. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Ecosistemas costeros tropicales.....	15
2.1.1 Humedales.....	16
2.1.2 Manglares.....	17
2.1.3 Selvas bajas inundables.....	18
2.1.4 Lagunas costeras y esteros.....	18
2.1.5 Playas.....	19
2.1.6 Arrecifes de coral y laguna arrecifal.....	20
2.2 Fenómenos hidrometeorológicos que perturban los ecosistemas costeros.....	21
2.2.1 Tormentas tropicales y huracanes.....	22
2.2.2 Marejadas.....	23
2.2.3 Lluvias e inundaciones.....	23
2.3 Actividades antropogénicas que destruyen los ecosistemas costeros.....	24
2.3.1 Turismo.....	25
2.3.2 Sobrepesca.....	25
2.3.3 Contaminación.....	26
2.4 Cambio climático repercute en los ecosistemas costeros.....	27
2.5 Sistemas de información geográfica y percepción remota aplicados al monitoreo de los ecosistemas costeros.....	27
2.6 Mosaico de fotografías aéreas digitales.....	28

III.	ANTECEDENTES	31
IV.	HIPÓTESIS	34
V.	OBJETIVOS	34
	5.1 Objetivo general.....	34
	5.2 Objetivos específicos.....	34
VI.	ZONA DE ESTUDIO	35
	6.1 Geología.....	35
	6.2 Clima.....	36
	6.3 Hidrología.....	36
	6.4 Vetegación.....	37
	6.5 Fauna.....	38
VII.	MÉTODOS	40
	7.1 Diseño y construcción de la base de la cámara.....	40
	7.2 Diseño del plan y líneas de vuelo.....	42
	7.3 Realización del sobrevuelo.....	44
	7.4 Calibración y configuración de la cámara.....	44
	7.5 Montaje de equipo y toma de fotografías aéreas.....	48
	7.6 Trabajo de gabinete.....	50
	7.7 Procesamiento de fotografías aéreas y mosaico fotográfico.....	51
	7.8 Procesamiento de imágenes de satélite.....	53
	7.9 Generación de mapas de usos del suelo y vegetación.....	54
	7.10 Generación de mapas de la degradación de los ecosistemas....	56
	7.11 Generación de matrices de confusión.....	56

7.12	Cuantificación de cambios.....	57
7.12.1	Generación de matriz de detección de cambio.....	57
7.12.2	Generación del diagrama de flujo.....	58
7.12.3	Calculo de las tasas de deforestación.....	58
7.12.4	Calculo de la pérdida anual de superficie.....	59
VIII.	RESULTADOS.....	59
8.1	Mosaico de fotografías aéreas digitales de alta resolución.....	59
8.2	Confiabilidad global de los mapas.....	63
8.2.1	Matriz de confusión de los mapas de uso del suelo y vegetación sección norte.....	63
8.2.2	Matriz de confusión de los mapas de uso del suelo y vegetación sección sur.....	64
8.3	Mapa de uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya del año 1988.....	66
8.4	Mapa de uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya del año 2000.....	70
8.5	Mapa de uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya del año 2014.....	73
8.6	Análisis comparativo del comportamiento de clases y superficies en los tres años de estudio.....	76
8.7	Mapa de degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya período 1988-2000.....	77
8.8	Mapa de degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya período 2000-2014.....	82
8.9	Tasa de deforestación.....	86
8.10	Pérdida anual de superficie.....	86

IX.	DISCUSIÓN	87
X.	CONCLUSIONES	95
XI.	RECOMENDACIONES	100
XII.	REFERENCIAS	101
XIII.	ANEXOS	108
13.1	Colección de fotografías aéreas que muestran los tipos de impactos encontrados en los ecosistemas costeros de la Riviera Maya.....	108

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Clasificación de los ciclones tropicales de Saffir-Simpson, obtenida de CENAPRED, 2013.....	22
Cuadro 2.	Matriz de confusión: uso de suelo y vegetación sección norte del año 1988.....	63
Cuadro 3.	Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección norte del año 2000.....	63
Cuadro 4.	Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección norte del año 2014.....	64
Cuadro 5.	Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección sur del año 1988.....	64
Cuadro 6.	Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección sur del año 2000.....	65
Cuadro 7.	Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección sur del año 2014.....	65
Cuadro 8.	Datos de cobertura de superficies del uso del suelo y vegetación del año 1988.....	67
Cuadro 9.	Datos de cobertura de superficies del uso del suelo y vegetación del año 2000.....	70
Cuadro 10.	Datos de cobertura de superficies del uso del suelo y vegetación del año 2014.....	73
Cuadro 11.	Matriz de detección de cambio período 1988-2000.....	78
Cuadro 12.	Matriz de detección de cambio período 2000-2014.....	82
Cuadro 13.	Tasa de deforestación.....	86
Cuadro 14.	Pérdida anual de superficie.....	86

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1.	Flujo de probabilidades de transición del período 1988-2000.....	79
Diagrama 2.	Flujo de probabilidades de transición del período 2000-2014.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Base de acero inoxidable para montar la cámara fotográfica....	41
Figura 2.	Base y soporte de la cámara fotográfica.....	42
Figura 3.	Rejillas que muestran las líneas de vuelo.....	43
Figura 4.	Aeronave Cessna 206.....	44
Figura 5.	Equipo fotográfico utilizado.....	45
Figura 6.	Calibración y fijación de los parámetros de la cámara fotográfica.....	46
Figura 7.	Equipos conectados a la cámara fotográfica durante el vuelo...	47
Figura 8.	Montaje del equipo fotográfico en la aeronave.....	48
Figura 9.	Datos relevantes contenidos dentro de los detalles de cada fotografía aérea digital.....	49
Figura 10.	Equipo y personal de trabajo.....	50
Figura 11.	Software SASPLANET proceso de obtención de imágenes de referencia.....	51
Figura 12.	Software ArcMap, proceso de georreferenciación de fotografías aéreas.....	52
Figura 13.	Selección y recorte de imágenes de satélite de la Riviera Maya utilizando el Software Erdas Imagine 11.....	53
Figura 14.	Software Erdas Imagine, proceso de clasificación supervisad....	54
Figura 15.	Unidades de gestión ambiental de la localidad de solidaridad...	89
Figura 16.	Casos de incumplimientos de las normas que rige la zona federal marítima terrestre.....	90
Figura 17.	Canales internos artificiales “Marinas”. Localidad de Puerto Aventuras.....	91
Figura 18.	Degradación de manglar. Comunidad de Xcalacoco.....	92
Figura 19.	Degradación de manglar. Comunidad de San Miguelito.....	93
Figura 20.	Fragmentación de manglares por delimitación de predios en la Riviera Maya. Fotografía aérea digital del año 2014.....	93
Figura 21.	Deforestación de manglar para futuros proyectos hoteleros.....	94
Figura 22.	Muestra el proceso de rellenamiento tipo hormiga de ecosistemas costeros de la Riviera Maya (“A” año 2009, “B” año 2011, “C” año 2012, “D” año 2014 y “E” año 2015).....	97

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.	Porcentual de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del año 1988.....	67
Gráfica 2.	Porcentual de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del año 2000.....	70
Gráfica 3.	Porcentual de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del año 2014.....	73
Gráfica 4.	Dinámica comparativa de las clases de los años analizados.....	76

ÍNDICE MAPAS

Mapa 1.	Mapa de distribución y ubicación geoespacial de la Riviera Maya en el estado de Quintana Roo, México.....	39
Mapa 2.	Fotografía aérea digital georreferenciada #1958 aledaña a Puerto Morelos, Quintana Roo, México.....	60
Mapa 3.	Mosaico ilustrativo de 3 fotografías aéreas digitales de alta resolución de la costa de Playa del Carmen, Quintana Roo, México.....	61
Mapa 4.	Mosaico de fotografías aéreas digitales de alta resolución del 2014 de la Riviera Maya, Quintana Roo, México.....	62
Mapa 5.	Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección norte" del año 1988.....	68
Mapa 6.	Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección sur" del año 1988.....	69
Mapa 7.	Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección norte" del año 2000.....	71
Mapa 8.	Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección sur" del año 2000.....	72
Mapa 9.	Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección norte" del año 2014.....	74
Mapa 10.	Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección sur" del año 2014.....	75
Mapa 11.	Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección norte" período 1988-2000.....	80
Mapa 12.	Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección sur" período 1988-2000.....	81
Mapa 13.	Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección norte" período 2000-2014.....	84
Mapa 14.	Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección sur" período 2000-2014.....	85

RESUMEN

La Riviera Maya es una región con un desarrollo turístico de nivel internacional, representa una de las fuentes generadoras de divisas más importantes de la República Mexicana, por lo que constantemente surgen nuevos proyectos de inversión turística. A la par de los beneficios económicos del turismo al país, los estragos que este causa son de gran magnitud, debido a que genera una serie de problemáticas antropogénicas que ejercen fuerte presión sobre los ecosistemas costeros presentes en la zona, es por eso que el objetivo de esta investigación es cuantificar la dinámica de transformación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya, utilizando fotografías aéreas digitales de alta resolución e imágenes de satélite mediante los sistemas de información geográfica.

Para ello se diseñó un plan de vuelo de la toma de fotografías aéreas digitales de alta resolución, con el objetivo de evaluar el estado físico actual de los ecosistemas costeros. En gabinete se trabajó con dos escenas (1846 y 1946) del satélite Landsat-7 TM del año 2000 que se delimitaron y clasificaron para generar los mapas de usos del suelo y vegetación del año 1988 y 2014 con base en las imágenes de satélite del año 1988 y el mosaico de las fotografías aéreas del 2014.

Como resultado se obtuvo un mosaico de 2,300 fotografías aéreas digitales georreferenciadas de alta resolución y sin distorsión del año 2014, con una cobertura superficial total del mosaico de 14,356 ha. Así mismo se obtuvieron los mapas de uso del suelo y vegetación de los años 1988, 2000 y 2014 con sus respectivas matrices de confusión, tablas de cobertura superficial, matrices y mapas de detección de cambio de los períodos 1988-2000 y 2000-2014. Registrando que las selvas y los manglares presentaron las tasas de deforestación más altas con -1.13% y -1.08% respectivamente. Los resultados de esta investigación servirán como línea base para futuras tomas de decisiones en el ámbito de la gestión territorial para la conservación y aprovechamiento sustentable, la prevención y control ante desastres naturales e impactos antrópicos así como para aprovechar el alto valor recreativo de la Riviera Maya.

I. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son áreas de confluencia entre los sistemas terrestres y marinos, los cuales están sujetos a diversos procesos y fenómenos naturales determinados por la interface entre el continente, el océano y la atmósfera (Lara-Lara, 2008). Estas zonas se encuentran constituidas por ecosistemas que albergan gran biodiversidad, con posibilidades de aprovechamiento sustentable derivada de la riqueza de sus aguas y de sus ecosistemas costeros aledaños (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC, 2007).

Además los ecosistemas costeros proporcionan diversos servicios a la sociedad, como la estabilidad y protección a la zona costera, son fuente de alimentos, proveen de materiales para la construcción, regulan el clima, son zonas de recreación y poseen gran variedad de hábitats (Lara-Lara, 2008).

A pesar de su importancia ecológica, las zonas costeras han sufrido el impacto de la falta de ordenamiento de las actividades antropogénicas, por ejemplo: la pesca, la acuicultura, el turismo, el crecimiento urbano, los puertos marítimos comerciales (Lara-Lara, 2008) y la deforestación de las regiones costeras tropicales considerado uno de los principales eventos de cambios que está contribuyendo a la pérdida de la biodiversidad, propiciando la fragmentación de los ecosistemas y favoreciendo al cambio climático global (Houghton, 1994; Maser, 2002; Díaz-Gallegos y Acosta-Velázquez, 2009; Díaz-Gallegos, *et al.*, 2010).

La actividad turística de la Riviera Maya actualmente es considerada estratégica para la economía nacional, debido a la gran afluencia de visitantes y los numerosos empleos que genera (Guido, *et al.*, 2009). Sin embargo, a la par del éxito económico, han surgido problemas ambientales, urbanos y sociales que requieren análisis para la sustentabilidad de la zona de forma integral (Guillermo y Romero, 2005).

Los rellenos de humedales y manglares son utilizados para la construcción de infraestructura hotelera y residencial, la construcción de carreteras y canales que interrumpen el flujo superficial del agua, la contaminación del agua y blanqueamiento de los arrecifes coralinos provocado por combustibles marítimos, además de la corrupción de las autoridades.

Aunado a todas las fuentes antrópicas partícipes del calentamiento global, existe el calentamiento global natural, que juntos, ocasionan el aumento del nivel del mar, cambiando los patrones de lluvia y aumentando los eventos climatológicos como las ondas de calor, huracanes y sequías (Conde, 2006).

El estado de Quintana Roo geográficamente se ubica dentro de la franja con mayor incidencia de trayectorias de huracanes del país, lo que la hace altamente vulnerable ante estos fenómenos meteorológicos. Los huracanes más importantes que han impactado la zona del Caribe son, el huracán Gilberto que azotó las costas del estado en el año de 1988, seguido de dos huracanes Emily y Wilma categoría 4 y 5 respectivamente que entraron a la costa en el año 2005, así como en el 2007 se presentaron dos huracanes categoría 5 Dean y Félix y por último la tormenta tropical Dolly que impactó parte de la Riviera Maya en 2008 (Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, 2013).

La zona litoral costera de México consta de aproximadamente 11,000 km, de los cuales el 68% corresponde a las costas e islas del Océano Pacífico y el Golfo de California; y 32% a las costas e islas y cayos del Golfo de México y el Mar Caribe (INECC, 2007). Dentro región del Caribe Mexicano se localiza el área de estudio, conocida como “Riviera Maya” en el estado de Quintana Roo.

Ante la problemática descrita y dada la relevancia ambiental y económica de la Riviera Maya, optamos por realizar una investigación actualizada, confiable y precisa de la transformación ocurrida en los ecosistemas costeros de esta región en los últimos 26 años. Mediante la utilización integral de análisis de datos obtenidos con técnicas de percepción remota, sistemas de información geográfica y trabajo en campo.

El trabajo en campo consistió en el diseño de un plan de vuelo y la toma de las fotografías aéreas digitales de alta resolución, con el objetivo de generar información reciente de las características de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya del año 2014.

Clasificamos dos escenas (1846 y 1946) del satélite Landsat-7 TM del año 2000, por medio del método interdependiente el cual consiste en la interpretación visual de las clases de usos del suelo y vegetación definidas, se desactualizaron y actualizaron los polígonos de la misma clasificación y se generó los mapas de usos del suelo y vegetación del año 1988 y 2014 con base en las imágenes de satélite (1988) y el mosaico de fotografías aéreas digitales (2014), con la finalidad de generar resultados detallados de cada año de análisis.

La finalidad de esta investigación es informar a la comunidad con pruebas que registran las problemáticas y condiciones que han sometido a los ecosistemas costeros de la Riviera Maya durante los últimos 26 años y concientizar a la población de los riesgos que está ocasionando la mala planeación del desarrollo urbano y turístico de la región.

El conocimiento sobre el funcionamiento e importancia ecológica de los ecosistemas y de la dinámica de los recursos costeros para la toma de decisiones es limitado. La deficiente organización para administrar los recursos y una capacidad limitada al elaborar las políticas públicas apropiadas para un manejo sustentable, han ocasionado malas practicas y por ende el deterioro y degradación de los ecosistemas costeros que se encuentra en un proceso de transformación descontrolado (Lara-Lara, 2008).

Mediante el uso de las prácticas adecuadas en el proceso de planificación y diseño de la infraestructura costera, es posible mitigar los efectos causados a los ecosistemas, haciendo posible el desarrollo costero y así preservar su potencial recreativo y productivo. La finalidad es lograr un desarrollo equilibrado, ecológico, económico y social.

La relevancia de esta investigación radica en que es uno de los pocos estudios, que hace un análisis detalladamente de la transformación acelerada de los ecosistemas costeros presentes en la Riviera Maya, ya que los trabajos anteriormente realizados se caracterizan por ser de poco alcance, con inconsistencias y sin un análisis minucioso.

Nuestra investigación aporta una base de datos actualizados, precisos y detallados de los cambios ocurridos en la zona, e información útil para mejorar el proceso de la toma de decisiones en el sector ambiental. Los resultados de esta investigación podrán servir como línea base para proyectos futuros, asignar áreas prioritarias para la restauración y conservación, para la prevención y control ante desastres naturales, así como el soporte para aprovechar de forma sostenible el alto valor recreativo de la zona y como un insumo de apoyo en el manejo integral de la zona costera de la Riviera Maya.

II. MARCO TEÓRICO

En este apartado se describen los puntos más relevantes de los ecosistemas costeros, las características de los agentes que los han degradado y aspectos referentes a la metodología que se utilizó en esta investigación.

2.1 Ecosistemas costeros tropicales

Los ecosistemas costeros están ubicados en el litoral y tienen acceso condicionado al mar por acción del oleaje que determina sus límites (Programa Ambiental Regional para Centro América, PROARCA, 2004). En este trabajo se reconoce a los ecosistemas costeros tropicales como el espacio geográfico de interacción entre el medio acuático, terrestre y la atmosfera constituido por una porción continental, una marina y una porción insular (Lara-Lara, 2008).

La característica principal de los ecosistemas costeros tropicales es que son ambientes complejos, dinámicos, con una productividad significativa. La elevada productividad de los ecosistemas costeros tropicales está influenciada, entre otras cosas, por la producción primaria y del flujo de nutrientes provenientes de la cuenca alta y media (Sin, *et al.*, 1999).

Además, estos ecosistemas soportan una gran biodiversidad, productividad secundaria, regulan el flujo de agua, nutrientes y materiales sólidos a través del paisaje, proporcionan hábitat a una amplia variedad de especies de peces e invertebrados marinos de mucha relevancia para las pesquerías ribereñas y hábitat para la vida silvestre (Day, *et al.*, 1988; Osborne, 2000). Los ecosistemas costeros son dinámicos debido al gran flujo e intercambio de materia y energía entre el ambiente terrestre y el marino.

México cuenta con aproximadamente 1,000 Km de costa del mar Caribe, es una región importante porque posee el segundo mayor sistema arrecifal del mundo que junto con el manglar y las praderas de pastos marinos ofrecen zonas de alimentación y reproducción a más de 1,300 especies de peces, algunos

mamíferos marinos y las seis especies de tortugas marinas que llegan a esta región (Wilkinson, *et al.*, 2009).

A lo largo del litoral del estado de Quintana Roo la distribución de los ecosistemas costeros está en función de las características geomorfológicas de la costa, lo que determina la elevación del suelo y el tipo de ecosistema presente; el modelo de distribución de los ecosistemas en esta región, de este a oeste es el siguiente: arrecifes de coral, playas y dunas, humedales, lagunas costeras y selvas inundables (Molina, *et al.*, 1998). Estos ecosistemas cumplen con un papel relevante en la economía y la calidad de vida de los habitantes de Quintana Roo y constituyen el principal atractivo para el turismo ecológico.

2.1.1 Humedales

Los humedales son zonas donde coexisten en tiempo y espacio, ambientes acuáticos y terrestres, constituyen áreas de inundación temporal o permanente, que se presentan en zonas bajas como depresiones y planicies de inundación, generalmente; tienen suelos con un drenaje lento y se pueden encontrar a lo largo de las costas (CONANP, 2006; Rojas y Vidal, 2008).

Estos ecosistemas forman parte de procesos muy importantes como el almacenamiento, control de calidad, cantidad de agua y remoción de nutrientes, son acumuladores de sedimentos y carbón, son reconocidos como amortiguadores contra el oleaje provocado por las tormentas y diversos fenómenos meteorológicos y tienen potencial recreativo y valor estético (Molina, *et al.*, 1998).

Sin embargo, los humedales han sufrido procesos de transformación, por ejemplo obras de drenaje y designación de zonas para “mejorar” el ambiente por considerarse fuentes de infección, se consideran también peligrosas por ser susceptibles a inundación, y una vez drenadas se utilizan con fines agropecuarios urbanos y turísticos (Rojas y Vidal, 2008).

2.1.2 Manglares

Los manglares son zonas de transición entre los ecosistemas terrestres y marinos compuestos por árboles o arbustos con adaptaciones morfológicas y fisiológicas (ej. Neumatóforos) que los hacen resistentes a la salinidad. Los manglares se distribuyen en planicies costeras de las zonas tropicales y subtropicales, se desarrollan asociados a estuarios y marismas, cerca de las desembocaduras de ríos, arroyos o alrededor de esteros y lagunas costeras (Rodríguez-Zúñiga, *et al.*, 2013).

En México existen cuatro especies de mangles; *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), *Avicennia germinans* (mangle negro) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) y se han registrado *Rhizophora harrisoni* y *Avicennia bicolor* en las costas de Chiapas (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, CONABIO, 2009).

Los manglares tienen importancia social, económica y biológica, proporcionando diversos servicios ambientales, por ejemplo: son sumideros de bióxido de carbono por lo que contribuyen en la mitigación del calentamiento global, estabilizan la línea costera, forman barreras naturales contra fenómenos meteorológicos como los huracanes, son el hábitat de una gran variedad de fauna silvestre, funcionan como filtros biológicos y son fuente de nutrientes que posteriormente son exportados por las mareas a los hábitats marinos adyacentes, proveen de material para construcción de viviendas rurales, son productores de madera y leña además de poseer atractivo turístico y cultural (Flores, *et al.*, 1998; Lara-Lara, 2008).

La falta de planificación de las actividades humanas como el desarrollo urbano, industrial y turístico, el desarrollo agrícola, ganadero y acuícola, la contaminación por pesticidas, fertilizantes, derrames de petróleo y la modificación de las condiciones hidrológicas son las principales amenazas que ejercen presión en los manglares (CONABIO, 2009).

2.1.3 Selvas bajas inundables

Las selvas bajas se establecen en Quintana Roo principalmente en depresiones inundables conocidas como *akálche*, alcanzan hasta diez metros de altura y se consideran subcaducifolios (Ek Díaz, 2011).

Se encuentran tanto en depresiones de tierra adentro como en las proximidades de la costa, colindantes con los pantanos y manglares, tiene una diversidad única con gran cantidad de especies endémicas, proveen de frutos, hojas, semillas, raíces y cortezas a las diferentes especies de fauna silvestre de las que son hábitat (Challenger y Soberon, 2008).

Las selvas han sido utilizadas, desde la época prehispánica como fuente de obtención de recursos maderables, frutos y para la extracción del látex utilizado en la elaboración del chicle. Recientemente las selvas se han vuelto un atractivo ecoturístico, mediante el establecimiento de senderos para la observación de flora y fauna. El resultado del mal manejo de las prácticas agrícolas, ha provocado en los últimos años un rápido deterioro y fragmentación de estos ecosistemas (Molina, *et al.*, 1998).

2.1.4 Lagunas costeras y esteros

Son depresiones en las zonas costeras que se forman por debajo de la línea de marea alta, conectadas al mar de forma temporal, es decir que solo permanecen durante la época de lluvia y que se encuentran protegidas por algún tipo de barrera (Herrera y Morales, 2010).

Debido a la influencia de agua dulce y salada, son generalmente ambientes salobres (Contreras, 2007). Algunas lagunas costeras del norte de Quintana Roo representan un gran atractivo turístico para el desarrollo de actividades acuáticas como los paseos en *kayak*, el velero, esquí acuático, *wind surf*, entre otros.

Los recursos que proporcionan las lagunas costeras y servicios ambientales que ofrecen como la alta productividad, representan áreas de protección, reproducción, crianza y alimentación para muchas especies, sin mencionar su

potencial para la recreación y valor estético, han provocado que sean intensamente aprovechadas por el hombre. Y cuando se realizan actividades con las que se interrumpe la circulación natural de los cuerpos de agua, o existe aporte de nutrientes por descarga de aguas residuales se presentan problemas de eutrofización, ocasionando una reducción de su valor biológico y estético (Molina, *et al*, 1998).

2.1.5 Playas

Las playas son depósitos de materiales sueltos que se extienden de forma paralela con el litoral. Los materiales que las componen corresponden al tipo de roca expuesta en la costa, además de materia desintegrado de corales. Las playas son zonas dinámicas debido a la acción directa del oleaje, las corrientes, las mareas y del viento. Además, de ser hábitat para la anidación y alimentación de aves, crustáceos y tortugas marinas, cuya existencia depende de los procesos que se lleven a cabo en la playa (PROARCA, 2004).

Una característica muy particular de las playas de Quintana Roo es la poca amplitud que presenta (40-400 m) están limitadas al este por el mar Caribe y al oeste por una franja de humedales, esta condición aumenta su fragilidad y limita el área de aprovechamiento para el establecimiento de infraestructura costera. La forma natural de las playas es diferente a lo largo de la costa, esto en función del ambiente terrestre y de la presencia o ausencia de la laguna arrecifal.

Las playas cumplen con un papel crítico en la protección contra los efectos de las tormentas e inundaciones tanto de los recursos terrestres como del desarrollo costero (Molina, *et al.*, 1998). Desafortunadamente la belleza y la morfología de las playas que atrae a turistas, son modificadas por prácticas inadecuadas de construcción en sinergia con la acción de fenómenos naturales, tales como las tormentas y la erosión.

2.1.6 Arrecifes de coral y laguna arrecifal

Los arrecifes de coral son conocidos como biomas con enorme diversidad biológica y sitios de importancia económica, puesto que estos ofrecen recursos pesqueros y atractivos turísticos (Calderon y Reyes, 2005; Lara-Lara, 2008). Proporcionan hábitat a muchas especies a las cuales alimentan con su producción y con la acumulación de material orgánico que traen las corrientes marinas.

En Quintana Roo, los arrecifes se extienden en paralelo a la costa en parches discontinuos, debido a la existencia de algas y pastos marinos que se extienden en gran parte en la plataforma continental. El sistema arrecifal de Quintana Roo es considerado como el segundo más largo del mundo por sus dimensiones, después de la gran barrera coralina de Australia (Molina, *et al.*, 1998). Han ocupado un lugar dominante en la vida económica, cultural y social del estado, sobre todo en las poblaciones costeras ya que proporciona sustento para las pesquerías y el turismo.

Los arrecifes de coral desempeñan un papel importante, dado su distribución costera, brindan protección contra el oleaje, principalmente en la zona costera del Caribe ya que es ahí donde las tormentas y huracanes impactan con mayor frecuencia.

Las lagunas arrecifales constituidas en parte por pastos marinos y algas, se les ha dado poca importancia ya que por ignorancia se les ha considerado como un elemento antiestético. En la región se ha optado por destruirlas de las playas, sin tomar en cuenta la importancia de este ecosistema que brinda protección y alimento a gran cantidad de especies marinas. Además es aquí donde se desarrollan las larvas y juveniles de muchos invertebrados y peces que habitan en los arrecifes, la diversidad de especies en la zona arrecifal depende en gran parte de ellos (Molina, *et al.*, 1998).

2.2 Fenómenos hidrometeorológicos que perturban los ecosistemas costeros

Quintana Roo es el estado de la Península de Yucatán más expuesto a fenómenos meteorológicos como son las tormentas tropicales, huracanes y “nortes” particularmente la zona norte del litoral. Estos fenómenos marcan un papel importante en la economía por los impactos que tienen en la actividad turística que se desarrolla en el estado.

La presencia de estos fenómenos meteorológicos debe ser considerada en el proceso de planeación territorial de la región. Una actitud de previsión activa que combine la protección ante el peligro de éstos fenómenos y la conservación de los recursos naturales, simplifican los procesos de manejo y permite establecer un balance en la toma de decisiones sobre el tipo y la ubicación de las construcciones (Molina, *et al.*, 1998).

Estos fenómenos meteorológicos ocasionan tres diferentes fuerzas devastadoras:

- ❖ **Marejadas:** Capaces de producir olas de gran tamaño que arrastran embarcaciones dejándolas varadas, al mismo tiempo destruyen obras portuarias además de alterar la estructura original de la playa.

- ❖ **Inundaciones:** Generalmente se presentan durante la temporada de lluvias, aunado con las marejadas que salinizan las lagunas costeras cuando no existe un desfogue de las lagunas por la modificación o construcción de infraestructura realizada sobre sus cauces naturales contribuyen al desequilibrio hidrológico de estas.

- ❖ **Vientos:** Los estragos que estos ocasionan son principalmente el derribo de árboles, líneas eléctricas y telefónicas, también algunos tipos de construcciones (palapas, chozas y cabañas), además dañan severamente la vegetación silvestre y cultivada.

2.2.1 Tormentas tropicales y huracanes

Las tormentas tropicales o ciclones que llegan a México provienen de la zona de Campeche, Golfo de Tehuantepec, al sur de las islas Cabo Verde y en el Caribe. Los aspectos destructivos de los ciclones tropicales, que marcan su intensidad, se deben principalmente a cuatro aspectos: viento, oleaje, marea de tormenta y lluvia.

De acuerdo con la presión central, los ciclones se clasifican en depresión tropical (1008 a 1005 mb, velocidad del máximo viento menor a 63 km/h), tormenta tropical (1004 a 985 mb, velocidad del máximo viento entre 63 y 118 km/h) y huracán (menor a 984 mb, velocidad del máximo viento mayor a 119 km/h).

En la siguiente tabla se indica la clasificación de la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial que incluye a Norteamérica, Centroamérica y el Caribe (CENAPRED, 2013) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de los ciclones tropicales de Saffir-Simpson, obtenida de CENAPRED, 2013.

Categoría	Presión central (mb)	Vientos (km/h)	Marea (m)	Características
Perturbación tropical	1008.1 a 1010	-	-	Ligera circulación de vientos
Depresión tropical	1004.1 a 1008	<62	-	Localmente destructivo
Tormenta tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118	1.1	Tiene efectos destructivos
Huracán categoría 1	980.1 a 985	118.1 a 154	1.5	Altamente destructivo
Huracán categoría 2	965.1 a 980	154.1 a 178	2.0 a 2.5	Altamente destructivo
Huracán categoría 3	945.1 a 965	178.1 a 210	2.5 a 4.0	Extremadamente destructivo
Huracán categoría 4	920.1 a 945	210.1 a 250	4.0 a 5.5	Extremadamente destructivo
Huracán categoría 5	< 920	> 250	> 5.5	El más destructivo

Las tormentas tropicales y los huracanes se presentan en las costas de Quintana Roo en los meses de julio a octubre, los daños que ocasionan se deben a tres fuerzas destructoras: las marejadas, las inundaciones y los vientos. Los huracanes con mas impactos en la región han sido Wilma (categoría 5, año 2005) y Gilberto (categoría 5, año 1988).

2.2.2 Marejadas

Las marejadas pueden producir olas de 10 m o más de altura que llegan a demoler obras portuarias y alterar radicalmente la configuración de la playa, como ocurrió en Cancún después de los huracanes Gilberto y Wilma y hundir o lanzar a la costa buques de gran calado como los barcos camaroneros que quedaron varados en 1988 en Puerto Juárez por efecto del huracán Gilberto. La acción de las marejadas puede llegar a 30 o 40 m de profundidad por lo que destrozan o sepultan bajo gruesas capas de arena las formaciones coralinas (Molina, *et al.*, 1998).

El oleaje tiene la capacidad de desplazar grandes cantidades de arena de las playas e ingresarlas en los niveles bajos de los hoteles, como sótanos, albercas, *lobbies*, aéreas de recepción y restaurantes, incluso en Cancún el desplazamiento de las arenas se ha fusionado con la laguna *Nichupté*; al retirarse la marejada y el oleaje deja daños importantes en caminos, carreteras costeras, automotores, comercios, vegetación (manglares, palmeras y zona selvática) vida silvestre entre otros (Prieto, *et al.*, 2006).

2.2.3 Lluvias e inundaciones

Las inundaciones son ocasionadas por la combinación de eventos de precipitación extremos como las marejadas. Las marejadas impiden el desfogue de las aguas interiores que han sido acumuladas durante la temporada de lluvias sobre suelos arcillosos y poco permeables que tarda muchos días en infiltrarse o evaporarse.

Las precipitaciones en el Caribe pueden ser extremas con acumulaciones de 400 mm en un día, lo cual aumenta el nivel freático y provoca inundaciones. El centro de la zona urbana de Cancún, las vías de comunicación y otras localidades periféricas han mostrado vulnerabilidad muy alta a afectaciones de lluvias extremas (Prieto, *et al.*, 2006).

2.3 Actividades antropogénicas que destruyen los ecosistemas costeros

El desarrollo acelerado de las actividades económicas han propiciado un crecimiento desordenado de las zona urbanas en las costas, ocasionando conflictos socio-ambientales derivados de la competencia por el espacio, alteración en los flujos del agua, el uso de los recursos y la generación de residuos y contaminantes, problemáticas que influyen directamente en la deterioro de la calidad de vida y en la disminución de la competitividad de los sectores productivos y en sus actividades económicas (Lara-Lara, 2008).

Los problemas que enfrentan los ecosistemas costeros se originan principalmente de las actividades productivas y extractivas, las cuales carecen de planificación a largo plazo, provocando daños ecológicos y dejando vulnerables a los diferentes ecosistemas. Las principales actividades que impactan las zonas costeras son las industriales, agrícolas, pesqueras, turísticas y el producto de las mismas como la descarga de desechos humanos (Díaz-Gallegos, *et al.*, 2012).

Los cambios en el uso del suelo a pesar de las restricciones legales en materia de medio ambiente, como la tala de manglares y selvas para construcción de infraestructura turística, así como la extracción directa de los recursos como corales, arena para uso de construcción y minería, huevos de tortuga para el comercio y la captura de especies, están ocasionando una problemática socio-ambienta evidente en la región.

Los ecosistemas costeros están seriamente amenazados por la falta de planeación territorial a largo plazo, entre otros factores económicos (Lara-Lara, 2008). Sin embargo, mediante el uso de prácticas adecuadas en la planeación y diseño de la infraestructura costera, es posible mitigar los daños causados a los ecosistemas y prolongar su conservación, con el objetivo de preservar los servicios ambientales y asegurar la permanencia de la calidad de vida humana (Molina, *et al.*, 1998).

2.3.1 Turismo

La actividad turística en México ha crecido en las últimas décadas y se ha vuelto de suma importancia para la generación de empleo y captación de divisas. Pese a esto, genera impactos negativos sociales, culturales y ambientales (Instituto Nacional de Ecología, INE y Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAP, 2000).

De acuerdo con PROARCA (2004) los principales agentes de impacto son la construcción de infraestructura en sitios que interrumpen la conectividad ecológica, la descarga de desechos y el cambio de valores sociales y culturales.

La Riviera Maya constituye uno de los desarrollos turísticos de playa más modernos e importantes de la República Mexicana, su desarrollo y expansión se viene produciendo desde la década de los 70's y actualmente su actividad turística es considerada como un renglón estratégico de la economía nacional.

Los desarrollos portuarios, urbanos y turísticos construidos sobre humedales costeros causan problemas ambientales con pérdidas económicas a largo plazo. El crecimiento poblacional en terrenos que originalmente eran humedales como llanuras de inundación temporal (marismas), posteriores a las dunas y playas frecuentemente se ven afectados por inundaciones de las aguas pluviales y por el ascenso del nivel del mar (Flores, *et al.*, 1998).

2.3.2 Sobrepesca

La pesca es una actividad económica muy importante para el consumo local y la exportación, que a su vez afecta a los ecosistemas marinos, la excesiva demanda de alimentos provoca la sobreexplotación de los recursos pesqueros, incluyendo a las poblaciones silvestres de especies acuáticas que son objeto de captura y poblaciones que son cultivadas (Instituto Nacional de la Pesca, INP y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA. 2006).

La demanda excesiva de varias especies ha generado un esfuerzo pesquero y tasas de aprovechamiento superiores a los ritmos de recuperación que los recursos pueden soportar.

Esta actividad no solo tiene efectos sobre las especies que son buscadas por los pescadores, sino que también por las especies capturadas de manera accidental. La pesca no sustentable provoca el deterioro ambiental y contaminación a través de la destrucción del hábitat (INECC, 2007).

La pesca puede hacerse sostenible si resuelve los problemas de sobreexplotación y deterioro ambiental de los ecosistemas. Los recursos pesqueros dependen en gran medida de las aguas costeras y de los estuarios por lo que resulta indispensable la conservación de estos ecosistemas.

2.3.3 Contaminación

Los mares y océanos se les ha considerado como vertederos para los desechos domésticos e industriales, se pensaba que por ser un volumen de agua residual mucho menor que la de los mares y ríos, la concentración de contaminantes se diluirían (SEMARNAT, 2009). Las actividades terrestres son responsables de alrededor del 70% de la contaminación presente en los mares. Entre las actividades marinas, los derrames de combustibles y el tránsito de embarcaciones pueden afectar la calidad del agua de mar.

Los cuerpos de agua tienen gran capacidad para degradar y minimizar los contaminantes que son vertidos en ellos, los organismos que realizan esta función requieren de tiempo. La cantidad de contaminantes incrementaran los tiempos de degradación con la tendencia actual, acumulando gran cantidad de contaminantes lo cual es perjudicial para los ecosistemas costeros y fauna que se encuentran en la Riviera Maya.

2.4 Cambio climático repercute en los ecosistemas costeros

Además de los impactos de las actividades humanas sobre los ecosistemas marinos y costeros, hay fenómenos naturales que generan una fuerte presión en ellos, sobre todo cuando actúan en sinergia con factores antrópicos y no antrópicos como en el caso del cambio climático.

Las comunidades costeras, los pescadores y los acuicultores ya están siendo profundamente afectados por el fenómeno de calentamiento climático y cambio global. La elevación del nivel del mar, la acidez de los océanos, las sequías e inundaciones son algunos de los impactos más importantes. La acumulación de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en nuestra atmósfera está modificando diversas características del clima, océanos, y diversos ecosistemas (SEMARNAT, 2009).

Los ecosistemas costeros como manglares, marismas y marinos como los arrecifes de coral, serán de los ecosistemas más afectados ante el cambio climático principalmente por estrés, porque ocurriría el aumento del nivel del mar y habría un mayor riesgo de fenómenos meteorológicos extremos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, 2007; GREENPEACE, 2010).

2.5 Sistemas de información geográfica y percepción remota aplicados al monitoreo de ecosistemas costeros

Los sistemas de información geográfica (SIG) y percepción remota (PR) se han convertido en una fuente de obtención de datos espaciales útiles para la medición de los cambios de la cubierta terrestre en diferentes escalas espaciales y temporales (Petit, *et al.*, 2001; Ugalde, 2012).

Los SIG comprenden la integración organizada de hardware, software y datos geográficos, diseñado para capturar, almacenar y analizar toda la información geográficamente referenciada, esto con el fin de resolver problemas de planificación y gestión geográfica. Básicamente son herramientas que permiten

a los usuarios crear consultas, analizar la información espacial, editar datos y crear mapas (Laboratorio Unidad Pacifico Sur CIESAS, 2009).

La percepción remota engloba el conjunto de conocimientos y técnicas para la obtención de información de objetos o fenómenos a distancia (Avery y Berlin, 1992; Ugalde, 2012). De acuerdo con Rodríguez y Arredondo (2005) la PR involucra una serie de procesos entre la radiación y el objeto de interés. Requiere de una fuente de energía, como el sol, la cual ilumina al objeto de utilidad de la cubierta terrestre, además de un sensor que se encarga de recoger y grabar la radiación reflejada o emitida por el objeto y de un sistema de recepción y procesamiento, donde se recibe la información enviada por el sensor que finalmente requerirá de la interpretación y análisis para extraerle información.

Una de las principales ventajas de la PR o teledetección espacial es su capacidad para seguir fenómenos dinámicos, gracias a la cobertura cíclica que proporcionan. Esta capacidad ayuda a inventariar ciertos procesos ambientales: como el crecimiento urbano, desecación de humedales, efectos de incendios o plagas, entre otros (Chuvieco, 1996).

2.6 Mosaico de fotografías aéreas digitales

En los últimos años se han desarrollado alternativas tecnológicas con el propósito de poder contar con información actualizada sobre los procesos costeros. En este contexto la utilización de cámaras digitales y GPS portátiles, se han convertido en opción, para la obtención de imágenes digitales de alta resolución que pueden ser procesadas a través de computadoras y software especializados.

Las fotografías aéreas como una fuente de los sensores remotos nos proporciona el estado real de ocupación, una visión panorámica y sincrónica de un paisaje que permite identificar los diferentes procesos que ocurren en un área determinada (Chuvieco, 1985).

Es una tecnología cuya implementación no requiere de una fuerte inversión, ni disponer de medios técnicos muy sofisticados; es una herramienta eficaz para la ejecución de acciones de monitoreo detallado.

Entre los cuales se destaca: uso del suelo, cobertura de vegetación, procesos de erosión y de acumulación, transporte de sedimentos, evolución de la línea de costa, topografía y morfología del fondo marino en zonas poco profundas, florecimiento de algas, procesos de agentes contaminantes, procesos naturales en las desembocaduras de los ríos, desarrollos urbanos, deslaves, inundaciones, impactos de terremotos y otros procesos antropogénicos que requieran ser analizados con gran precisión, además de sus aplicaciones topográficas. De esta forma se puede mejorar la relación costo beneficio de medidas y acciones en el contexto del manejo integrado de zonas costeras.

Una fotografía que muestra la imagen de los objetos en su verdadera posición ortogonal se le llama ortofotografía, son geoméricamente equivalentes a los mapas planimétricos convencionales que mediante puntos, líneas y símbolos muestran la posición ortogonal de los objetos en un plano cartesiano.

Con las ortofotografía se pueden crear mosaicos ortofotogramétricos, estos están formados por la unión de un conjunto de fotografías aéreas para dar una visión general del área de estudio, comúnmente estas fotografías son sometidas a un procedimiento de rectificación geométrica y geográfica, que consiste en eliminar la inclinación y homogenizar las escalas de las fotografías, que posteriormente podrán montarse en una red de puntos de control, lo que permite generar mosaicos fotográficos de gran utilidad.

Los mapas preparados con ortofotos tienen ventajas sobre los mapas planimétricos y las fotografías aéreas, ya que combinan la abundancia de los detalles, claridad de imagen y actualidad de la fotografía aérea, con la exactitud planimétrica de un mapa.

Las clases interpretadas sobre las fotografías aéreas pueden ser medidas directamente sobre las mismas fotografías, en mapas planimétricos o mosaicos actualizados. En áreas planas o de relieve moderado, los errores producidos por diferencias de escala y desplazamientos de relieve en la fotografía, no afectan la determinación de superficies en más de un 5% (Prodan, *et al.*, 1997).

La obtención de imágenes de alta resolución en plataformas aéreas tienen como ventajas respecto a las imágenes de satélite, la posibilidad de obtener datos por debajo de la capa de nubes, pueden ser de rápida implementación en el caso de desastres naturales, se dispone con mucha rapidez de los resultados y es independiente de fuentes externas porque a partir de ella se pueden generar nuevos datos (Geerder y Hernández, 2006).

III. ANTECEDENTES

La zona costera del estado de Quintana Roo cuenta con programas de ordenamiento ecológico territorial, cuya finalidad es gestionar y regular el aprovechamiento racional de los recursos naturales y planificar los usos del suelo en la región para impulsar el desarrollo sustentable.

El programa de Ordenamiento Ecológico de la región denominado Corredor Cancún-Tulum decretado el 26 de octubre de 1994, considera que esta zona costera debe propiciar el desarrollo urbano ambientalmente responsable, estableciendo zonas específicas para el crecimiento urbano y turístico mediante la aplicación de criterios de regulación ecológica, prácticas rentables y menos agresivas para el ambiente. Así mismo, cabe mencionar que Quintana Roo fue el primer estado que decretó la primera reserva de la biosfera en el país Sian Ka'an, (1986) como una estrategia de conservación y buen manejo de los recursos costeros del estado principalmente.

Otros trabajos importantes realizados en la región como el de Molina, *et al.*, (1998), analizan la importancia del desarrollo turístico de la zona costera de Quintana Roo, donde consideran que el principal atractivo son los diferentes ecosistemas costeros que ahí se encuentran, además de las aéreas arqueológicas presentes.

La finalidad de este estudio fue servir de guía adecuada en el diseño y la ubicación de la infraestructura costera, con la finalidad de proteger la inversión y sobre todo el entorno natural, utilizando principios teóricos y técnicas que respeten las dinámicas naturales de los ecosistemas costeros del estado.

Miranda (2008), realizó un análisis espacio-temporal del manglar en el corredor turístico Cancún-Tulum, utilizando imágenes de satélite de mediana resolución de los años 1972, 1988, 1990 y 2006. El objetivo fue realizar mapas de uso del suelo, analizar el cambio de cobertura de manglar y cuantificar tasas de deforestación de cada período. Como resultados reportan que el año 1972 los

manglares cubrían una superficie de 165 km², en 1988 disminuyó a 79 km², para el año 1990 incrementó a 158 km² y en el año 2006 se redujo a 140 km². Sin embargo, estiman que pueden existir inconsistencias en estos resultados.

Los manglares de Puerto Morelos fueron estudiados con un análisis que incluyó datos de estructura forestal, composición de especies y estimación de perturbación por Carrillo, *et al.*, (2008). Este estudio concluyó que la composición, estructura y ubicación de las especies de manglar son resultado de un conjunto de factores ambientales, como el micro relieve, la distancia a línea de costa; así como, los distintos tipos de perturbación que afectan al manglar, tal es el caso de los huracanes que generan modificaciones en el patrón de crecimiento del *Rhizophora mangle*, donde la acción del viento en sitios expuestos, promueve su crecimiento achaparrado y extensión reducida del área de la copa.

Por otro lado, la investigación sobre los procesos de erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, realizada por Guido y colaboradores (2009) identifican como causas principales a los factores naturales de perturbación (procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios con la morfología costera) y en sinergia con los factores antropogénicos (ocupación de la duna litoral por particulares, construcción desordenada de obras de protección).

Las soluciones que proponen a la erosión costera las seleccionaron desde una visión integral, a través del análisis de fotografías aéreas y monitoreo de las variables físicas, considerando que es necesario un período de tiempo de 10 años para tener una respuesta más clara de la problemática.

Díaz Gallegos y Acosta Velásquez (2009) analizaron geográficamente la dinámica de uso de suelo y vegetación del santuario del manatí Bahía de Chetumal comparándola entre los años 1990 y 2005. De esta manera cuantificaron las tasas y matrices del cambio para diez clases cartografiadas. Las clases que reportaron con mayor pérdida anual de cobertura son los manglares, selvas bajas y medianas subperennifolias, situación que amenaza la conectividad ecológica y biológica del corredor biológico Mesoamericano, destacando que para

un análisis más detallado de los cambios de uso del suelo en esta zona, es necesario realizar un análisis espacio-temporal en períodos cortos de tiempo y utilizar fuentes de información como fotografías aéreas.

Acosta-Velázquez, *et al.*, (2010) estimaron la distribución y extensión de los manglares en México en los años 2005-2006, a causa de las discrepancias que existían en las estimaciones de la superficie de estos ecosistemas en México, obteniendo como resultados el primer mapa a escala 1:50,000 con una exactitud global de 90% donde se calcula una superficie de 770,057 ha de manglares en México.

Este trabajo destaca que la región Península de Yucatán cuenta con la mayor cantidad de manglares en el país con el 55.02% (423,571 ha), siendo precisamente Campeche, Quintana Roo y Yucatán las tres entidades federativas con más superficie de manglar con 194,190 ha 25.22%, 129,921 ha 16.87% y 99.640 ha, 12.93% respectivamente. Mencionan también que el 54% de la superficie de manglar se encuentra protegida a nivel federal o estatal 68.02% están incluidos en sitios Ramsar o en análisis GAP marino 86.4% sin embargo, es necesario aplicar de manera más efectiva medidas de conservación, manejo y conocer las zonas que así lo requieran.

Hilares-Cota, *et al.*, (2010) estimaron la pérdida de la cobertura de manglar (tasa de deforestación anual) en Mahahual-Xcalak, mediante un análisis cartográfico, utilizando imágenes de satélite del año 1995 y 2007. Reportando pérdidas de 1,070 ha de manglares con una tasa anual de deforestación de - 0.85%, atribuyendo como principal factor de la disminución de la cobertura de los bosques de manglar, a la expansión de los usos antropogénicos del suelo (construcciones de poblados y caminos), sugiriendo implementar programas de conservación y rehabilitación para los manglares principalmente.

IV. HIPÓTESIS

Los ecosistemas costeros de la Riviera Maya presentan las tasas de deforestación más elevadas en México e indicadores de perturbación de manglares muy severos, debido al establecimiento desordenado y sin ninguna regulación integral de las zonas urbanas y de la infraestructura turística a lo largo de esta región costera de gran importancia turística nacional y mundial.

V. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Cuantificar la magnitud de los procesos de transformación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya, utilizando fotografías aéreas digitales de alta resolución e imágenes de satélite Landsat-7 con los sistemas de información geográfica e identificar los factores que desencadenan los procesos de destrucción de estos ecosistemas.

5.2 Objetivos específicos

- ❖ Generar un mosaico de fotografías aéreas digitales de alta resolución de la Riviera Maya del año 2014.
- ❖ Elaborar mapas de uso del suelo y vegetación del año 1988, 2000 y 2014 y mapas de procesos de degradación del período 1988-2000 y 2000-2014, aplicando sistemas de información geográfica.
- ❖ Calcular las tasas y matrices de transformación de los ecosistemas costeros de la zona Maya con respecto a los años de análisis.

VI. ZONA DE ESTUDIO

La Riviera Maya se encuentra ubicada geográficamente entre las coordenadas extremas 20°07´ y 20°53´ de latitud norte y 86°52´ y 87°38´ de longitud oeste (Diario Oficial de la Federación, 2001) en el estado de Quintana Roo, México, al este de la península de Yucatán, dentro de los municipios de Benito Juárez y Solidaridad.

Se extiende a lo largo del litoral, desde el norte de Puerto Morelos, pasando por Playa del Carmen, Puerto Aventuras, Akumal y Tulum en el sur, al este con el mar Caribe y al oeste con Lázaro Cárdenas, cuenta con una extensión de línea de costa de más de 100 km de longitud analizada (Mapa 1).

8.1 Geología

El estado de Quintana Roo está constituido por rocas calizas pertenecientes al Cretácico, cubiertas por una capa de material sedimentario de color claro y con intercalaciones en donde predominan los leptosoles, vertisoles y luvisoles (Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, SEMARNAT-Comisión nacional de áreas protegidas, CONANP, 2005). El desarrollo geomorfológico de esta región se inicia durante el terciario superior que estuvo sujeto a una intensa disolución dando origen a un terreno rocoso caracterizado por la existencia de una compleja red de pozos naturales y cavernas (PDDUT, 2007).

La región está formada geológicamente por una meseta caliza, una roca permeable la cual ha dado lugar a la formación de redes de grutas y galerías subterráneas conocidas como cenotes. Presenta un relieve plano a lo largo de la costa y se caracteriza por tener ensenadas de playas arenosas, puntas rocosas y ocasionalmente caletas con agua dulce y salobre, todos de gran belleza natural (Pozo, *et al.*, 2011).

6.2 Clima

Presenta un clima cálido húmedo con lluvias durante los meses de verano, las temperaturas oscilan entre los 17 y 31°C en invierno y superan los 32°C en verano. La precipitación media anual es alrededor de 1,300 mm aunque puede variar por la presencia de huracanes y tormentas tropicales (SEMARNAT-CONANP, 2005).

Los fenómenos meteorológicos que afectan a la zona son los huracanes, tormentas tropicales y nortes. La temporada de huracanes abarca desde junio a noviembre, siendo el mes de septiembre el más crítico; los nortes se presentan en la época invernal pero principalmente de noviembre a febrero con velocidades de 10 km/h aproximadamente (Miranda, 2008).

6.3 Hidrología

El área de estudio carece de corrientes superficiales principalmente en la porción norte; hacia el sur se manifiestan un drenaje incipiente que desaparece, gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra por fracturas, oquedades y conductos cársticos en las piedras calizas (Miranda, 2008).

La mayoría de las corrientes superficiales son transitorias de bajo caudal, recorrido muy corto y desembocan en depresiones topográficas donde forman lagunas, suelen formar redes simples y manantiales. El régimen de la mayoría de las corrientes, salvo algunas excepciones, es intermitente; muchas de ellas sólo circulan en presencia de pendiente en el suelo (mayor a 1.5%) por lo que al llegar a una zona de ruptura de la pendiente su cauce desaparece en la superficie y continúa en la profundidad (Herrera y Heredia, 2011).

Los flujos de agua son principalmente subterráneos, debido a la presencia de roca caliza con fracturas y oquedades. Se trata de un acuífero de tipo freático, de poca profundidad, con características hidráulicas heterogéneas. La mayor parte de la superficie estatal es de llanuras con notable desarrollo cárstico, que deja al descubierto los cenotes (Herrera y Heredia, 2011).

6.4 Vegetación

La flora comprende una gran variedad de ecosistemas costeros como: vegetación de dunas costeras, vegetación de humedales como manglares y selvas bajas inundables. Bosques de ceibas, cedros, chechén, caoba, chicozapote y palmares.

Quintana Roo y en especial la Riviera Maya tiene playas arenosas rodeadas de una franja de matorrales y zonas de vegetación que se caracteriza por ser halófito, herbáceas rastreras y arbustos muy ramificados de escasa altura que rara vez sobrepasan los 50 cm, la comunidad vegetal se caracteriza por: el frijol de playa (*Canavalia rosea*), el pasto halófito (*Distichlis spicata*), la riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), la margarita de playa (*Ambrosia hispida*), el tronador (*Crotalaria pumila*), el cadillo (*Cenchrus incertus*) y la golondrina (*Chamaesyce densifolia*) (Alvarado, 2003; Miranda, 2008).

La vegetación del matorral se compone por especies arbustivas y arbóreas que miden de 8 a 10 m de altura, se desarrollan sobre suelos arenoso, profundo y con poca acumulación de agua, entre las especies que dominan el estrato arbóreo se encuentran: la palma chit (*Thrinax radiata*), el kanisté (*Pouteria campechiana*) y la uva de playa (*Coccoloba uvifera*); en el arbustivo domina el Hoo'loop (*Bravaisia tubiflora*). El estrato herbáceo se encuentra dominado por la riñonina (*Ipomea pes-caprae*) (Alvarado, 2003).

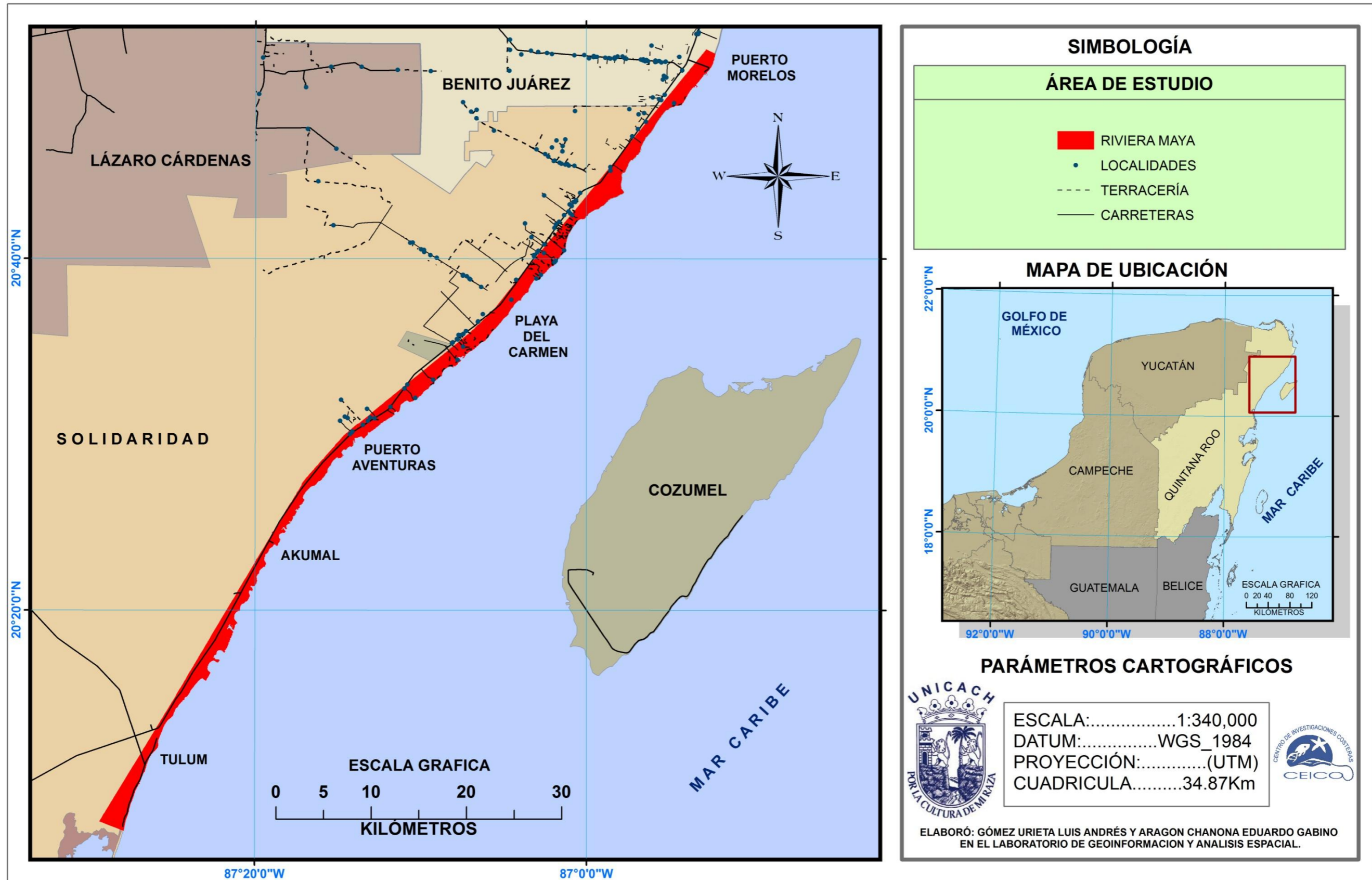
Después del matorral costero se encuentra la comunidad de manglar, distribuyéndose de manera irregular formando manchones entre la vegetación de selva baja y abarcando zonas de 30 a 300 m de ancho. Esta comunidad se distribuye inmediatamente después de la vegetación de cocoteros, se desarrolla principalmente en zonas inundables en diferentes grados, ya sea por agua marina o agua proveniente de la precipitación.

6.5 Fauna

En Quintana Roo habitan 22 especies de anfibios que representan 95.6% de las 23 especies que habitan en la Península de Yucatán y 6% del total nacional. (Calderon y Cedeño, 2011). Quintana Roo tiene 23 familias de reptiles, 72 géneros y 106 especies de las 140 reportadas para la Península de Yucatán (75%), lo cual representa cerca del 13% de la riqueza nacional y 1.3% de la riqueza mundial (Calderon y Cedeño, 2011). De las más representativas se encuentran el Cocodrilo moreleti (*Crocodylus moreleti*), vibora de cascabel (*Crotalus spp*), iguana verde (*Iguana iguana*), garrobo (*Ctenosaura similis*), casquito (*Kinosternon scorpioides*), tortugas marinas caguama (*Caretta caretta*), tigrillo (*Felis wiedii*) y tuza (*Heterogeomys hispidus*).

Quintana Roo cuenta con el registro de 483 especies de aves incluidas dos especies introducidas, de 71 familias que representan 88% de las especies en la Península de Yucatán, 44% en México y 4.8% de aves en el mundo. Entre ellas, 124 son acuáticas y 359 terrestres. Pijiji ala blanca (*Dendrocygna autumnalis*), Cerceta ala azul (*Anas discors*), Codorniz yucateca (*Colinus nigrogularis*), Pelicano blanco (*Pelecanus erythrorhynchos*), Garza tigre mexicana (*Tigrisoma mexicanum*), Flamenco caribeño (*Phoenicopterus ruber*) (Correa y MacKinnon, 2011).

En Quintana Roo habitan 114 especies (spp) de mamíferos terrestres, 96.6% de los registrados en la Península de Yucatán (118 spp), 23.5% de México (485 spp) y 2.5% del mundo (4 509 spp). Escobedo (2011) hace el reporte de jaguar (*Panthera onca*), ocelote (*Leopardus pardalis*), sereque (*Dasyprocata punctata*), tapir (*Tapirus bairdii*), oso hormiguero (*Tamandua mexicana*), mono aullador (*Alouatta pigra*), tejón (*Nasua narica*), zorra gris (*Urocyon cinereoagenteus*), falso vampiro (*Vampyrum spectrum*) (Escobedo, 2011).



Mapa 1. Mapa de distribución y ubicación geoespacial de la Riviera Maya en el estado de Quintana Roo, México.

VII. MÉTODOS

La toma de fotografías aéreas digitales de alta resolución de la Riviera Maya, se realizó a través del diseño y ejecución de un sobrevuelo en el año 2014. Los principios metodológicos implementados por la CONABIO en el año 2009 para la toma de fotografías aéreas nos sirvieron como base, modificándola para adaptarla a nuestro equipo de trabajo y operación con la finalidad de obtener mejores resultados.

Además se tomaron fotografías panorámicas con el propósito de corroborar elementos de interés, tener otra perspectiva y captar zonas que en el mosaico no se registrarían. Esta información es esencial para hacer el análisis y obtener datos actualizados de la modificación, degradación y cambio de uso del suelo a lo largo de toda esta zona. Por lo cual fue necesario elaborar los siguientes procesos.

7.1 Diseño y construcción de la base de la cámara

La base que sirvió de sostén para la cámara se diseñó de tal manera que permitiera el montaje en la aeronave de forma sencilla, segura y óptima para la toma de las fotografías aéreas. La base de la cámara se elaboró con una placa de acero inoxidable con dimensiones de 24 x 26 cm con un doble de 90° de ángulo, quedando entonces la placa en forma de "L" con las medidas de 10 x 24 cm y 16 x 24 cm. Posteriormente se perforó cada uno de los extremos de la misma placa, con la intención de que esta pieza se atornille a la base que se colocó en la aeronave.

Después en la cara más grande de la placa se añadieron cuatro detalles esenciales para un mejor soporte de la cámara sobre la misma, lo cual garantizó una sujeción más segura y apta para la toma de las fotografías aéreas.

El primer detalle fue realizar una perforación en el centro de esa cara de la placa, para ensamblar la cámara por medio de un tornillo allen 3/16, posteriormente se soldaron dos piezas de acero inoxidable, la primera es una lámina de 10 x 3 cm su objetivo es impedir que la cámara se mueva o gire; debajo se colocó la segunda pieza que consistió en un cuerpo rectangular de 10 cm x 5.5 cm x 2 cm que en la parte superior tenga forma de un omega “ Ω ” o medio círculo, que permita que el lente de la cámara repose sobre el mismo, a esta misma pieza se le colocó una abrazadera de acero que la rodea y realiza la función de sujetar el lente y evitar movimientos (Figura 1).

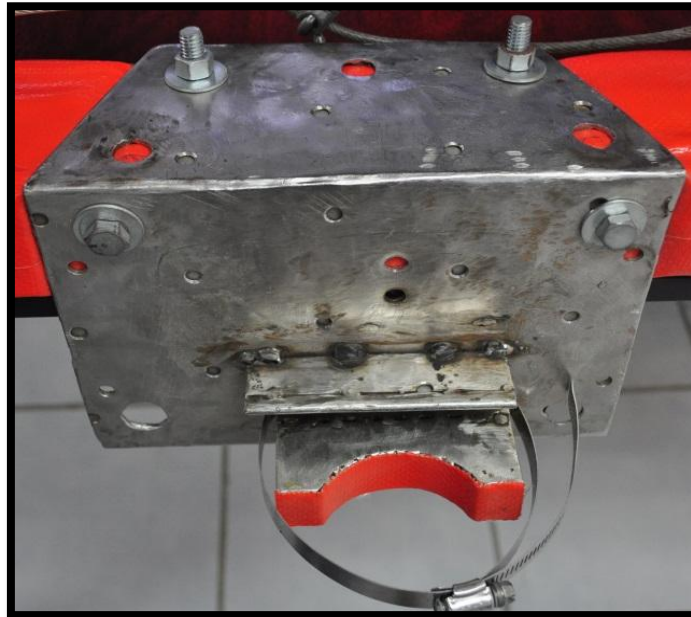


Figura 1. Base de acero inoxidable para montar la cámara fotográfica.

El siguiente paso fue armar un soporte que consiste en un cuerpo rectangular de fierro con las medidas 47 cm x 9 cm x 5 cm, la cual se forró con una capa de neopreno de 1 cm de grosor y a su vez fue revestida con lona y sellada por medio de calor para asegurar que el viento no cause daño sobre el neopreno y no dañar la zona donde se colocó la base en la aeronave.

A esta pieza se le atornilló una estructura tubular galvanizada (manija) que junto con la base formaron un rectángulo de 15 x 42 cm, igualmente esta estructura facilitó el manejo de la pieza completa, a esta pieza se le soldó una

argolla en la parte inferior de cada uno de sus dos extremos, por las cuales pasó un cable acerado forrado que, reforzó la sujeción de la base completa por medio de tensores y nudos para cable (perros) en el interior de la avioneta (estructura de los asientos). Todos los tornillos utilizados se les colocaron rondanas planas, tuercas y se ocultaron a nivel del neopreno para no ocasionar un desnivel.

Teniendo las dos piezas terminadas, se derivó una sola pieza al centrar y atornillar la placa de acero sobre el soporte de fierro con 4 tornillos y sus rondanas planas y tuercas, de igual manera se ocultaron para evitar que la base tenga desniveles (Figura 2).

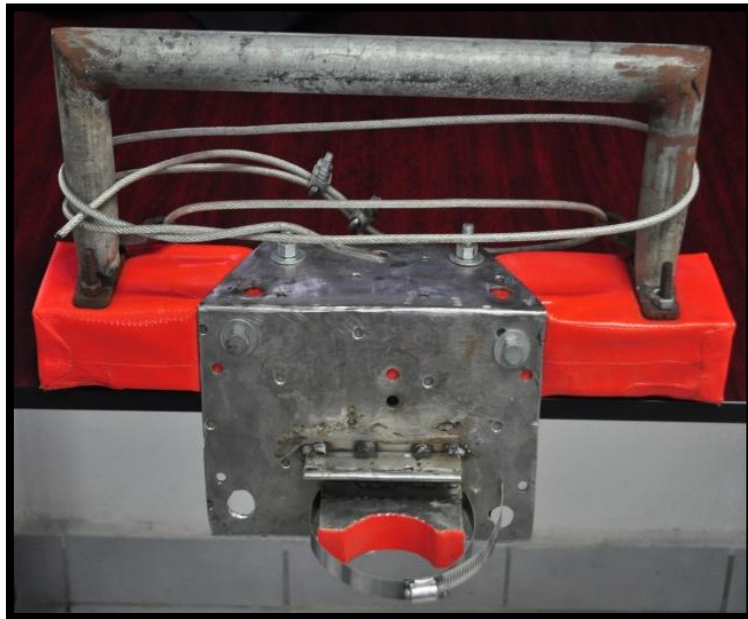


Figura 2. Base y soporte de la cámara fotográfica.

7.2 Diseño del plan y líneas de vuelo

Previo al vuelo se diseñó la ruta del recorrido de la aeronave, en el software Google Earth, con líneas rectas y paralelas sobre el área de estudio desde Puerto Morelos hasta Tulum (Riviera Maya). El recorrido lo dividimos en tres “secciones”, Puerto Morelos-Playa del Carmen, Playa del Carmen-Puerto Aventuras y Puerto Aventuras-Tulum.

A estas “secciones” se les denominó rejillas y cada una de ellas está compuesta por 4 líneas de vuelo, la primera, se colocó sobre la línea de costa y a partir de esta se trazó la segunda línea a una distancia de 400 m hacia el interior del continente y así sucesivamente hasta incluir las 4 líneas de vuelo en cada rejilla.

Se calculó que 400 m entre las líneas sería la distancia indicada para tener un traslape de aproximadamente 30% de cada fotografía, con relación a los 200 km/h de velocidad y los 450 m de altura en que se realizaría el vuelo (Figura 3).

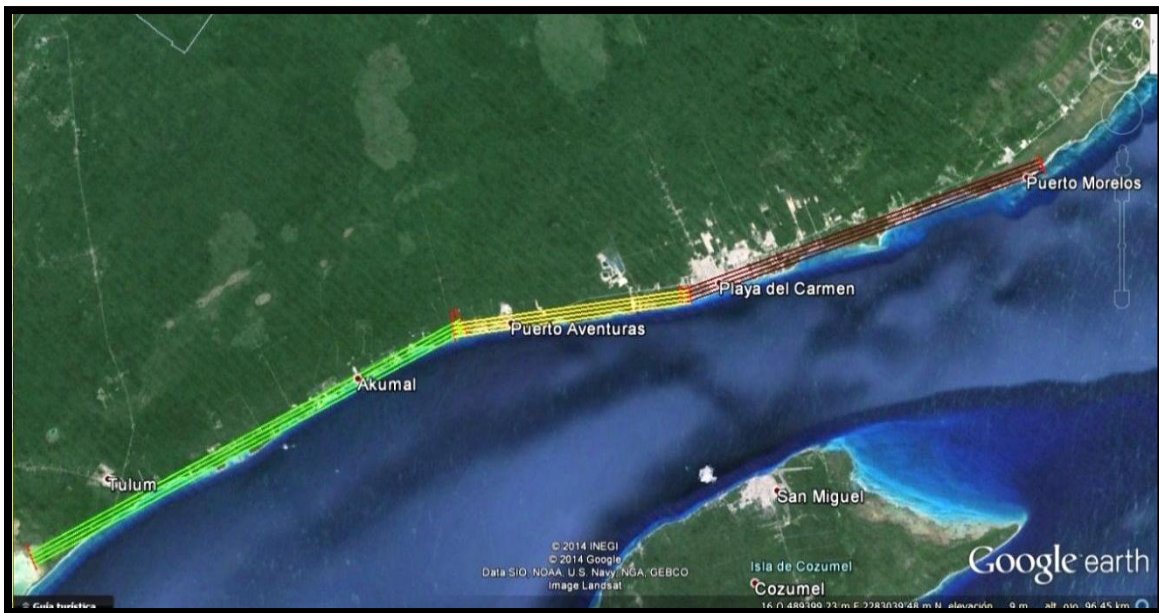


Figura 3. Rejillas que muestran las líneas de vuelo.

El recorrido (rejillas) del sobrevuelo se cargó a un GPS y se realizó en dos días (14 y 15 de abril de 2014) el primer día de vuelo se trabajó en las dos primeras rejillas (Tulum-Puerto Aventuras y Puerto aventuras-Playa del Carmen) con sus respectivas líneas de vuelo y el día 15 de abril culminaron las tomas de fotografías con la rejilla sobrante (Playa del Carmen- Puerto Morelos).

El vuelo se realizó en dos días para asegurar que las baterías de los dispositivos soportaran fácilmente el funcionamiento de los mismos aunado a las condiciones climatológicas predominantes.

7.3 Realización del sobrevuelo

El día 14 de abril de 2014 a las 9:00 am se acudió al aeropuerto internacional de Cancún para reunirnos con el piloto y dirigirnos hacia la aeronave Cessna 206 modelo 78 modificada. Y realizar el vuelo en las rejillas (Playa del Carmen-Puerto Aventuras) y (Puerto Aventuras-Tulum).



Figura 4. Aeronave Cessna 206.

El equipo se montó al costado derecho de la avioneta, se retiró una puerta para aprovechar el espacio y colocar la base de la cámara sobre el borde de la avioneta, de tal manera que la cámara sobresaliera y obturara de forma vertical hacia el suelo (Figura 4).

7.4 Calibración y configuración de la cámara fotográfica

El equipo fotográfico utilizado consistió en una cámara digital profesional marca NIKON, modelo D3X, formato FX, con 24.5 megapíxeles (mp), a la cual se le ensambló un objetivo NIKON ultra gran angular 2.4 x de zoom, formato DX y focal de 10 a 24 mm. Este tipo de lente permite capturar amplias imágenes panorámicas de alta resolución y contraste con una distorsión minimizada, se

utilizó un filtro de la misma marca para el objetivo 10-24 mm, con el propósito de contrarrestar los rayos ultravioletas (UV) y proteger al lente de cualquier impacto de partículas que se remuevan en el momento del despegue (Figura 5).

La calibración de la cámara fotográfica se programó en modo de exposición de forma manual para poder controlar la velocidad de obturación y del diafragma, la apertura del diafragma fue de 10 mm, lo cual ayudó a poder capturar la mayor cobertura posible sin distorsión y con un enfoque programado al infinito “∞” esto es para no tener un objetivo específico y mejorar la calidad de las fotografías.



Figura 5. Equipo Fotográfico utilizado.

La cámara la colocamos sobre un mono pie y tomamos fotografías de prueba, cerciorándonos que las fotografías tuvieran la mejor nitidez posible y los contrastes de colores fueran claros. Los parámetros y propiedades de las fotografías se ajustaron considerando la hora y luz del día. La apertura de diafragma (punto F) se configuró entre el rango de f/5.5 a f/7.1 que realiza la función de captura de luz. El tiempo de exposición se configuró a 1/1000s refiriéndose a la velocidad de obturación y en cuanto a la sensibilidad de la luz se ajustó a ISO-200.

El parámetro de infinito y apertura de diafragma en el lente los fijamos con cinta de aislar, con el fin de que la fuerza del viento durante el vuelo no los desajustaran. Alrededor del lente colocamos una barra de neopreno para reducir vibraciones al estar en contacto con la base, además de no dañar el objetivo al ejercer fuerza con la abrazadera para sujetarlo (Figura 6).



Figura 6. Calibración y fijación de los parámetros de la cámara fotográfica.

El equipo de operación que utilizamos fue un GPS GARMIN 60CSx, conectado a la cámara fotográfica con el dispositivo MC-35 a través de un cable con conexión D-sub (pin) de 9 contactos, que permite grabar información sobre la ubicación geográfica al momento de tomar las fotografías. El funcionamiento se verificó configurando el GPS en modo NMEA. La precisión del GPS aumento con una antena marca GARMIN, la cual se colocó mediante ventosas en el parabrisas de la aeronave logrando una precisión de 2 m durante todo el vuelo.

Las fotografías aéreas digitales se archivaron en una Laptop (HP Pavilion g4 Notebook PC), que se conectó a la cámara fotográfica por medio de un cable USB, y se instaló el programa Camera Control Pro2, con el cual es posible controlar y modificar algunos de los parámetros de la cámara, como el modo de exposición, la velocidad de obturación y la apertura del diafragma. El temporizador de obturación se programó a cada 5 segundos tomando en cuenta los 200 km/h, velocidad en que se realizó el vuelo (Figura 7).



Figura 7. Equipos conectados a la cámara fotográfica durante el vuelo.

7.5 Montaje de equipo y toma de fotografías aéreas

Finalizada la calibración y vinculación de los dispositivos a la computadora se continuó con el ensamblaje de la cámara a la base, atornillándola desde el orificio central con un tornillo allen 3/16, dos rondanas planas y una de goma.

En seguida se sujetó la base con un cable acerado forrado hacia la estructura de los asientos mediante tensores y nudos para cables, reforzándolo con una cinta tensora sujeta desde la manija hacia un mosquetón dentro de la avioneta, y una cuerda amarrada del orificio extremo inferior derecho de la base hacia el patín (reposa pie) de la avioneta, para evitar que el viento mueva al equipo.

La posibilidad de presencia de humedad en la cámara y los dispositivos conectados a ella (GPS Y USB) se minimizó cubriendo el equipo con una película de nylon auto adherente, además de introducirla en una funda especial que se reforzó en las costuras con cinta de ducto (Figura 8).



Figura 8. Montaje del equipo fotográfico en la aeronave.

Con el equipo colocado en la aeronave y listo para operar, se hicieron pruebas de obturación para verificar que la comunicación de la cámara con los demás dispositivos se encontrara activa.

Durante el recorrido aproximadamente a cada 10 minutos se comprobaba que cada una de las fotografías aéreas registraran dentro de sus metadatos (Figura 9) las coordenadas geográficas y que uno de los GPS marcara los tracks (que contiene información acerca de los puntos a lo largo de la ruta, incluyendo el tiempo, posición y altura del vuelo), además que cada una de sus antenas trabajaran correctamente asegurándose que ningún metal interfiriera en la recepción de la señal para aprovechar la máxima precisión.

También se tomaron fotografías panorámicas de las áreas que se consideraban de interés, realizadas con una cámara SONY DSC-WX80. Una vez concluida la toma de fotografías de las dos rejillas (Tulum-Puerto Aventuras) (Puerto Aventuras-Playa del Carmen) se dio por terminado el vuelo a las 2:30 pm.

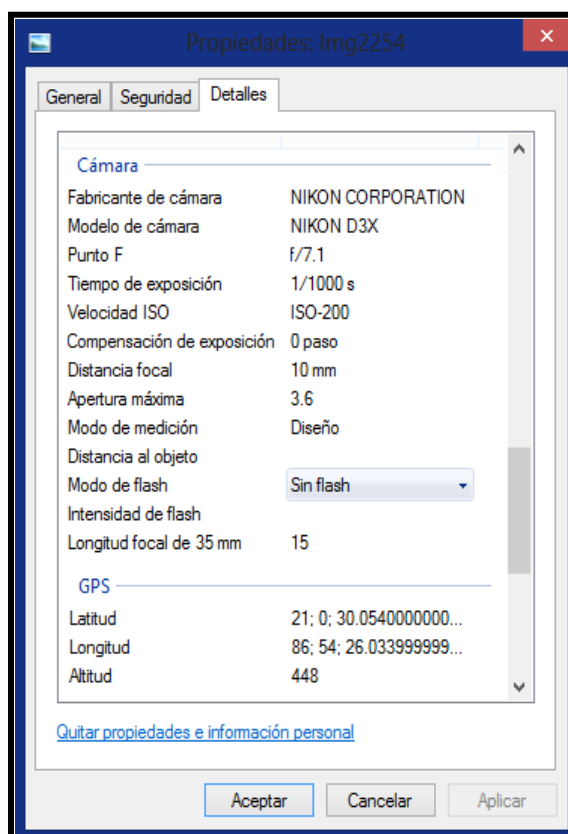


Figura 9. Datos más relevantes contenidos dentro de los detalles de cada fotografía aérea digital.

Este mismo procedimiento se realizó al día siguiente (15 de abril del 2014) en la rejilla (Playa del Carmen–Puerto Morelos) en donde el vuelo dio inicio la 1:00 pm y finalizó a las 2:30 pm. Se fotografió toda la Riviera Maya en 3 horas con 30 minutos. Al dar por terminados los vuelos se guardaron los procesos y se apagaron los equipos.



Figura 10. Equipo y personal de trabajo.

7.6 Trabajo de gabinete

El geoprocésamiento y análisis de las fotografías se realizó con estaciones de trabajo, Workstation Dell T 7500, en el laboratorio de Geoinformación y Análisis Espacial del Centro de Investigaciones Costeras (CEICO) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) sede Tonalá, Chiapas. El análisis consta de la descarga, almacenamiento, procesamiento y análisis de las imágenes de satélite y fotografías aéreas.

7.7 Procesamiento de fotografías aéreas y mosaico fotográfico

Cada una de las fotografías aéreas fueron georeferenciadas para la elaboración del mosaico fotográfico del área de estudio, con el software ArcMap 10.1. Se utilizó el programa SASPLANET del cual se obtuvieron las imágenes que sirvieron de referencia para la georreferenciación de las fotografías aéreas, ya que este programa permite realizar recortes de imágenes que cuentan con un sistema de coordenadas (georeferenciadas) aunque no actualizadas.

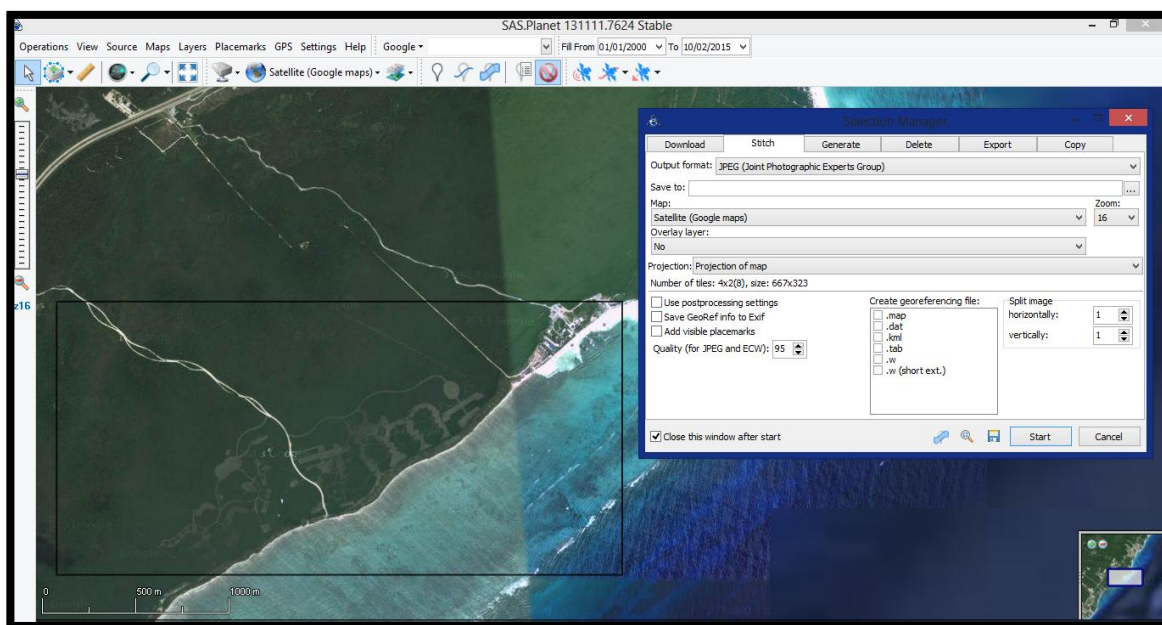


Figura 11. Software SASPLANET proceso de obtención de imágenes de referencia.

El proceso dentro de este programa consiste básicamente en colocarse sobre el área deseada con un zoom de 17% y después seleccionar la opción de “área visible” para realizar el recorte de la zona y recorrer este polígono con un zoom en 20 asegurándose que todas las áreas estén completamente cargadas, bien definidas y sin pixelar. Para concluir se realizó el proceso de guardado del recorte (Figura 11).

El siguiente paso fue abrir el recorte en el software ArcMap e identificar y abrir la fotografía aérea correspondiente a la zona anteriormente recortada, con ayuda de los puntos de referencia central de cada fotografía. Enseguida seleccionamos la opción “Add Control Points” para agregar como mínimo 30 puntos de control sobre la fotografía y luego en el recorte, asegurándose de colocarlos sobre el mismo lugar.

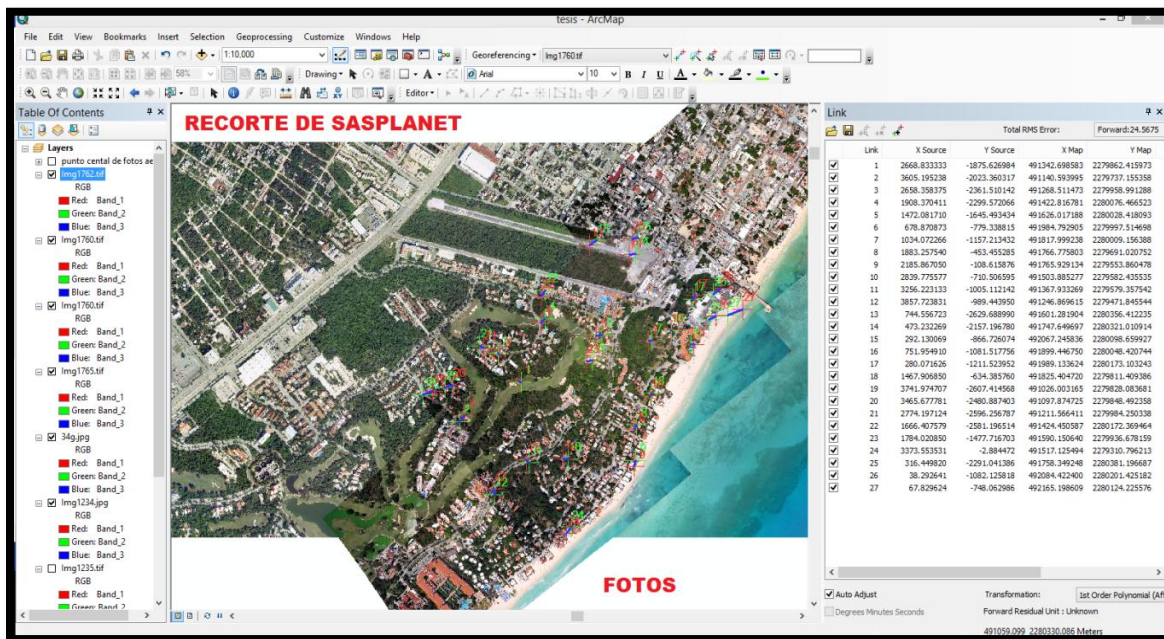


Figura 12. Software ArcMap, proceso de georreferenciación de fotografías aéreas.

Se generó una tabla de puntos de control donde en la opción “Transformation” se seleccionó “Spline” para corregir el error de los puntos, se verificó que el proceso este correcto y se guardo la tabla con el número de la fotografía correspondiente. Como último paso se seleccionó en “georeferencing” la opción “Rectify” y se guardo el nuevo formato en TIFF de la fotografía aérea ya georreferenciada (Figura 12). Para corroborar que el proceso anterior fue realizado correctamente, se hizo la comparación de cada una de las imágenes georreferenciadas con ortofotos del INEGI correspondientes del año 2004.

Con el proceso de georreferenciación de las fotografías aéreas digitales concluido, se continuó con la elaboración del mosaico del área de estudio, para ello en el software ArcMap 10.1 dentro de la ventana de “*catalog*” se creó una ubicación “*geodatabase*”, dentro de esta ubicación se crea un archivo “*mosaic dataset*” que se le asigna nombre, ubicación de guardado y un sistema de coordenadas (WGS1984 zona 16) correspondiente al área de estudio, seguido de agregar todas las fotografías aéreas georeferenciadas “*rasters*” y finalizando con la exportación del nuevo archivo TIFF.

7.8 Procesamiento de imágenes de satélite

El siguiente proceso fue realizar la descarga de las imágenes de satélite del área de estudio, las escenas correspondientes son (1946 “sur”, 1846 “norte”), las cuales se obtuvieron del satélite Landsat-7 del año 2000, adquiridas gratuitamente de la página *Global Land Cover Facility* de la universidad de Maryland. Se prosiguió a desplegarlas en el software ERDAS IMAGINE 11, se hizo un recorte del área de estudio y se guardaron los archivos de cada escena (Figura 13).

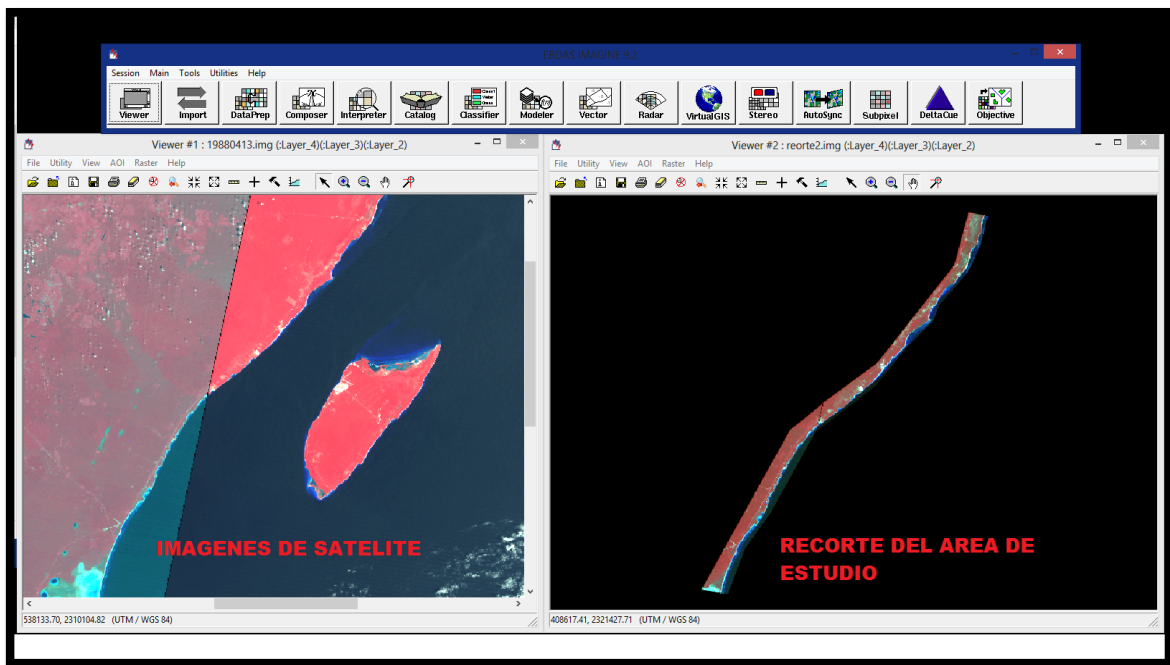


Figura 13. Selección y recorte de imágenes de satélite de la Riviera Maya utilizando el Software Erdas Imagine 11

El proceso de clasificación supervisada se realizó por separado en cada escena y con base en el algoritmo de máxima verosimilitud espectral (Chuvienco, 1996) que consiste en la creación de campos de entrenamiento que se agregaron al “signature editor” que básicamente es la selección de píxeles representantes de patrones, lo cual proporciona mayor precisión, menor confusión y mejor identificación de las clases, posteriormente se guarda un archivo nuevo de clasificación (Figura 14).

La cartografía del INEGI e imágenes de los programas GOOGLE EARTH y SASPLANET, sirvieron de guía para implementar los campos de entrenamiento y así generar la clasificación de los diferentes tipos de vegetación y usos del suelo de la zona de estudio.

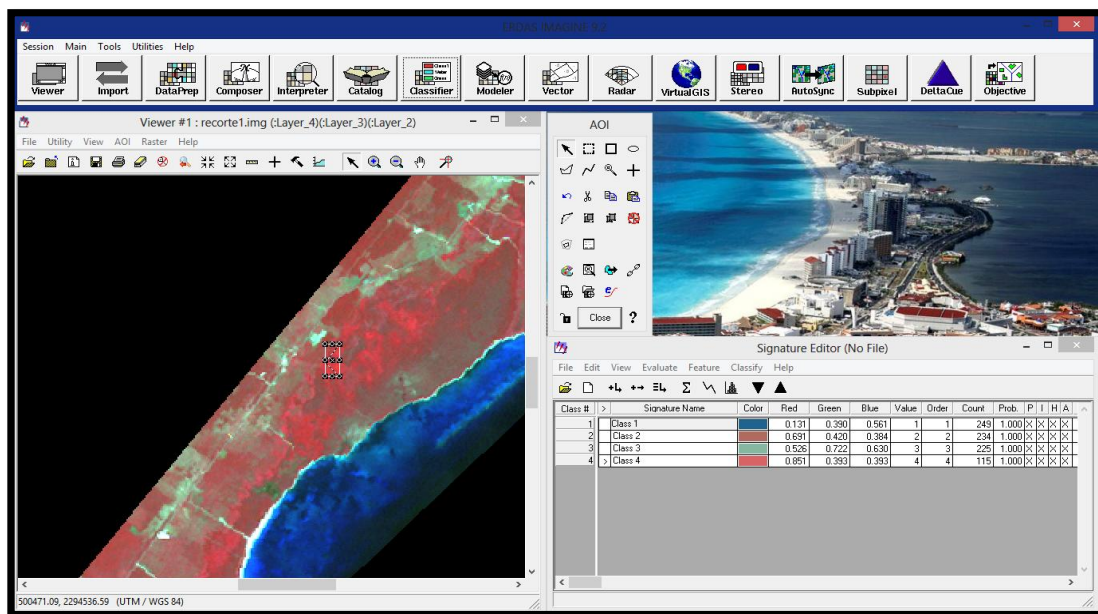


Figura 14. Software Erdas Imagine, proceso de clasificación

7.9 Generación de mapas de usos del suelo y vegetación

Por cuestiones de apreciación y detección de diferencias muy significativas del ritmo de transformación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya, se optó por representar a los mapas en dos secciones, (“norte” de Puerto Morelos a

Puerto Aventuras y “sur” de Puerto aventuras a Tulum). Además se les anexó una tabla de datos referente a las superficies de las clases en hectáreas (Ha) y porcentajes (%) del año y sección representada.

Para generar los mapas del uso del suelo y vegetación de los años de análisis, fue necesario trabajar a partir del método interdependiente de la (FAO, 1996) y en base a los archivos “*raster*” obtenidos de la clasificación supervisada de las imágenes satélite Lansat-7 del año 2000, por contar con la mejor resolución.

En el software ArcMap, la clasificación obtenida del año 2000 se convirtió a polígonos con la opción *conversion tool* “de raster a polígono”, lo cual permite la edición para la modificación de los polígonos y de los atributos de cada uno (nombre de la categoría y área). De esta forma se obtuvieron las capas temáticas de uso del suelo y vegetación del año 2000 (sección norte y sur). posteriormente se crearon dos copias para elaborar la clasificación del año 1988 y 2014.

Para crear las capas temáticas del año 1988, se utilizó como referencia las imágenes del satélite Lansat-7 del mismo año, a la cual se le sobrepuso las primeras copias de los polígonos obtenidos de la clasificación supervisada anteriormente descrita, para editarlos e igualarlos de acuerdo a las imágenes de referencia, finalizando con el recalcu del área de los nuevos polígonos (proceso de desactualización mediante la reclasificación y recodificación de los polígonos).

En la capa temática del año 2014 se utilizó el mosaico de fotografías aéreas digitales tomadas en el mismo año como referencia, a la cual se le sobrepuso las siguientes copias de los polígonos de la clasificación supervisada del año 2000 para editarlos e igualarlos al mosaico, finalizando con el recalcu del área de los polígonos de la nueva capa temática (proceso de actualización mediante la reclasificación y recodificación de los polígonos).

El proceso fue realizado con la opción “*Editor*” en el software ArcMap 10.1. Para evitar posteriores confusiones es necesario referir claramente la sección y el

año que representan esos datos dentro de las tablas de atributos de las capas temáticas.

7.10 Generación de mapas de la degradación de los ecosistemas

Los mapas de degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya, se realizaron a través de la intersección de dos capas temáticas del uso del suelo y vegetación, los años de análisis fueron 1988-2000 y 2000-2014.

En el software ArcMap 10.1 se seleccionan las dos capas temáticas a intersectar, de esta manera se genera una sola tabla de atributos con los datos y polígonos de los dos años anteriormente analizados, generando un archivo tipo dbf que se procesó en el programa Excel, en esta tabla se creó una nueva columna, al que se le ingresó la categorización de todos los procesos de cambio ocurridos en ese transcurso de tiempo, el archivo resultante se guarda y se importa en un nuevo archivo tipo dbf, que reemplazará al archivo original y así ejecutarlo nuevamente en ArcMap, posteriormente se creó otra columna donde se calculó el área en hectáreas.

Finalizando con el diseño de los mapas se asignaron colores a los nombres de las categorías que representan los diferentes tipos de uso de suelo y vegetación o bien los procesos de cambios que se desarrollan a lo largo de toda su superficie, se agregó cartografía del INEGI representativa de localidades, carreteras y terracerías. Un sistema de coordenadas, escala gráfica, símbolo de norte, parámetros cartográficos, mapa de ubicación y la simbología, finalizando con la exportación de los mapas.

7.11 Generación de matrices de confusión

Los mapas terminados fueron sometidos a un proceso de validación, para estimar la confiabilidad temática que consiste en comparar la información del mapa con información de referencia considerada muy confiable. Generalmente se basa en un muestreo de sitios de verificación cuya clasificación se obtiene a partir de

observaciones de campo o del análisis de imágenes más detalladas (Mas, *et al.*, 2003).

En los mapas de uso de suelo y vegetación de esta investigación se verificaron 10 muestras de cada clase, seleccionados aleatoriamente en toda el área de estudio, lo que permitió realizar la comparación entre las capas temáticas (uso del suelo y vegetación) y las referencias (imágenes de satélite o mosaico de fotografías aéreas) de esta manera se generó la matriz de confusión y se calcularon los índices de confiabilidad de los mapas.

Los datos dentro de la diagonal indican muestreos correctamente identificados y los datos fuera de ella corresponden a muestras confundidas. Según la lectura de las líneas o columnas de la matriz de confusión se distinguen dos tipos de error, el de comisión representa a los sitios de verificación cartografiada de cierta clase que en realidad pertenece a otra categoría y el error de omisión se refiere a los sitios de verificación correspondiente a una categoría que fue cartografiada en otra (Aronoff, 1982; Chivieco, 1996; Mas, *et al.*, 2003).

7.12 Cuantificación de cambios

7.12.1 Generación de matriz de detección de cambio

La matriz de detección de cambio nos permite conocer la dinámica de las clases durante los años comparados; se observa la diagonal en color gris oscuro las áreas que se mantuvieron sin cambios en ese período de comparación, mientras que los datos que se encuentran fuera de la diagonal, indican las transiciones de una clase a otra, en forma de ganancia o pérdida de áreas entre las dos fechas de estudio (Congalton y Green, 1999). Según la lectura de las líneas o columnas de la matriz se distinguen el total de cada categoría en la parte inferior y en el extremo derecho de la tabla.

7.12.2 Generación del diagrama de flujo

El diagrama de flujo representa de manera gráfica y sencilla los cambios y transiciones de superficies de los usos del suelo y vegetación ocurridos durante un período de tiempo determinado, se crea apartir de los datos obtenidos de la matriz de detección de cambio de cada período, representandon el área y las transiciones en porcentajes (%).

El flujo de probabilidades de transición de cada uso y cobertura del suelo, indican que dentro de los cuadros se encuentra su porcentaje sin cambio, las líneas punteadas indican recuperación, las permanencias y los intercambios de superficie se representan con líneas y cuadros más gruesos según el grado de importancia (FAO, 1996; Díaz Gallegos, *et al.* 2008), este esquema se puede diseñar a criterio de quien lo construya.

7.12.3 Calculo de las tasas de deforestación

Las tasas de deforestación se calcularon de acuerdo con la ecuación de la FAO (1996) aplicada en cada período analizado 1988-2000 y 2000-2014 (Ecuación 1), para obtener los datos en % el resultado se multiplicó por 100.

$$(Ec. 1) \quad \delta n = \left(\frac{S2}{S1} \right)^{1/t} - 1$$

Donde

S1: superficie de la fecha 1.

S2: superficie de la fecha 2.

t: período de tiempo analizado.

7.12.4 Cálculo de la pérdida anual de superficie

El cálculo de estos datos se hizo en cada tipo de vegetación y en los dos períodos de análisis con la fórmula empleada por la (FAO, 1996; Díaz Gallegos, *et al.* 2008) (Ecuación 2).

$$(Ec. 2) \quad Pa = \frac{(S2-S1)}{t}$$

Donde

S1: superficie de la fecha 1.

S2: superficie de la fecha 2.

t: período de tiempo analizado.

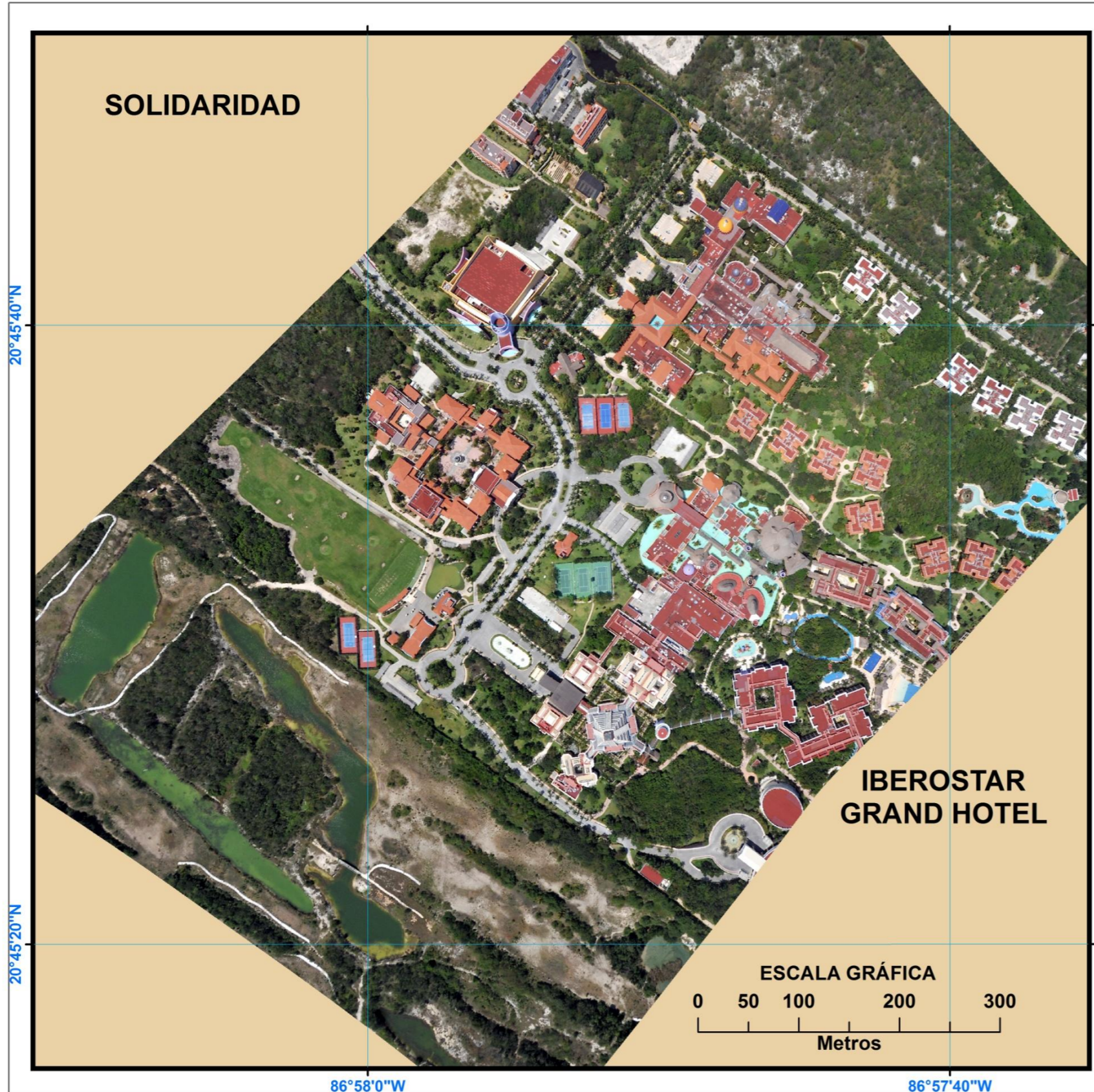
VIII. RESULTADOS

8.1 Mosaico de fotografías aéreas digitales de alta resolución

Las fotografías aéreas digitales de alta resolución se muestra en color verdadero, tiene una resolución espacial de un metro, cubre una superficie de 85 ha y cuenta con un traslape de 30% de su superficie entre las fotografías.

A continuación se muestran los mapas creados con base en la ortofotos del 14 y 15 de abril del año 2014, en el (Mapa 2) se visualiza una ortofoto y se puede observar la calidad, resolución y la capacidad cartografiable con la que cuentan. El (Mapa 3) es un mosaico que consta de tres ortofotos, se observa que no hay desfase en el traslape que existe entre las fotografías y que la distorsión es minimizada.

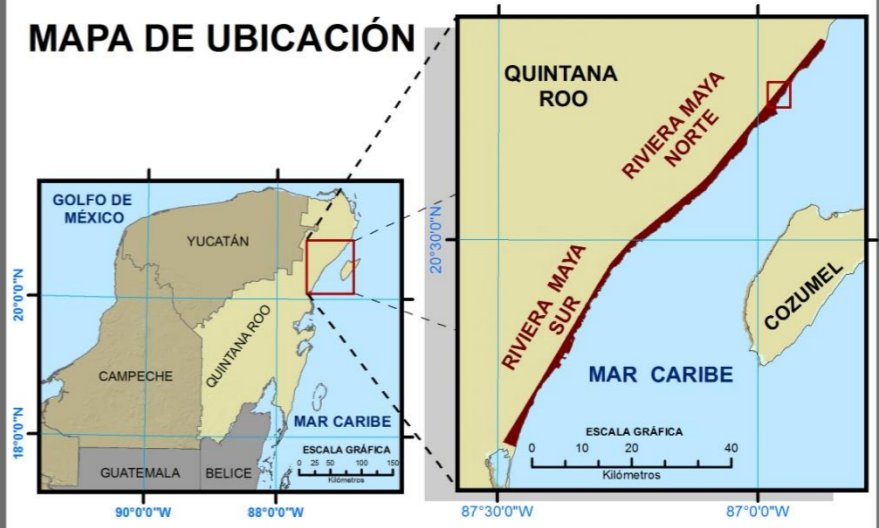
El mosaico general cuenta con 2,300 fotografías aéreas digitales georeferenciadas de alta resolución y sin distorsión significativa, la cobertura superficial del mosaico es de 14,356 ha con 1.7 km de ancho y 100 km de largo (Mapa 4).



SIMBOLOGÍA

FOTOGRAFIA AÉREA DIGITAL
GEORREFERENCIADA
#1958

Coordenada Geográfica
Latitud: 20° 45' 35.97"
Longitud: 86° 57' 47.05"



PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

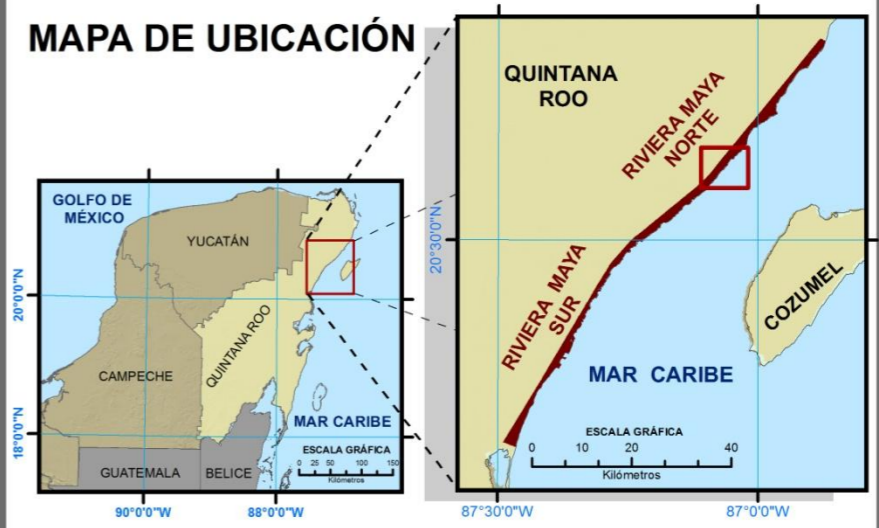
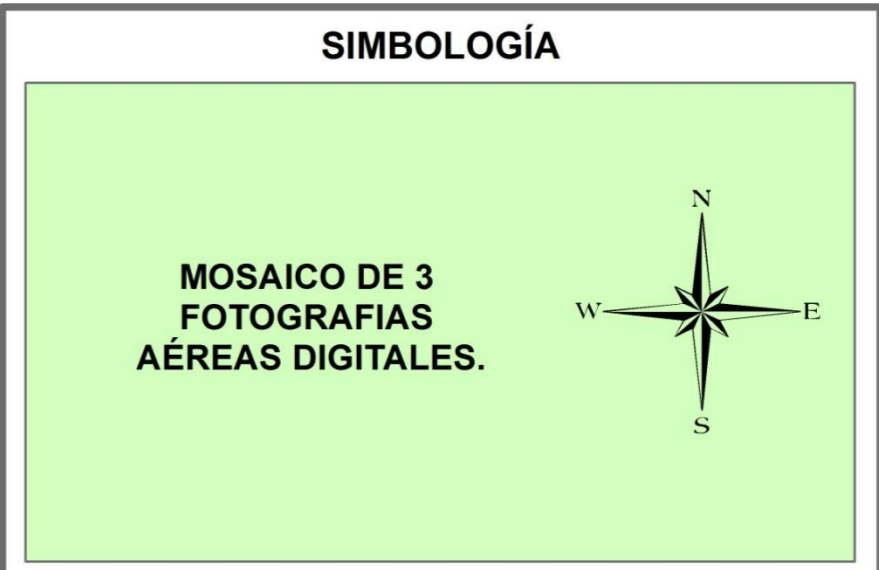
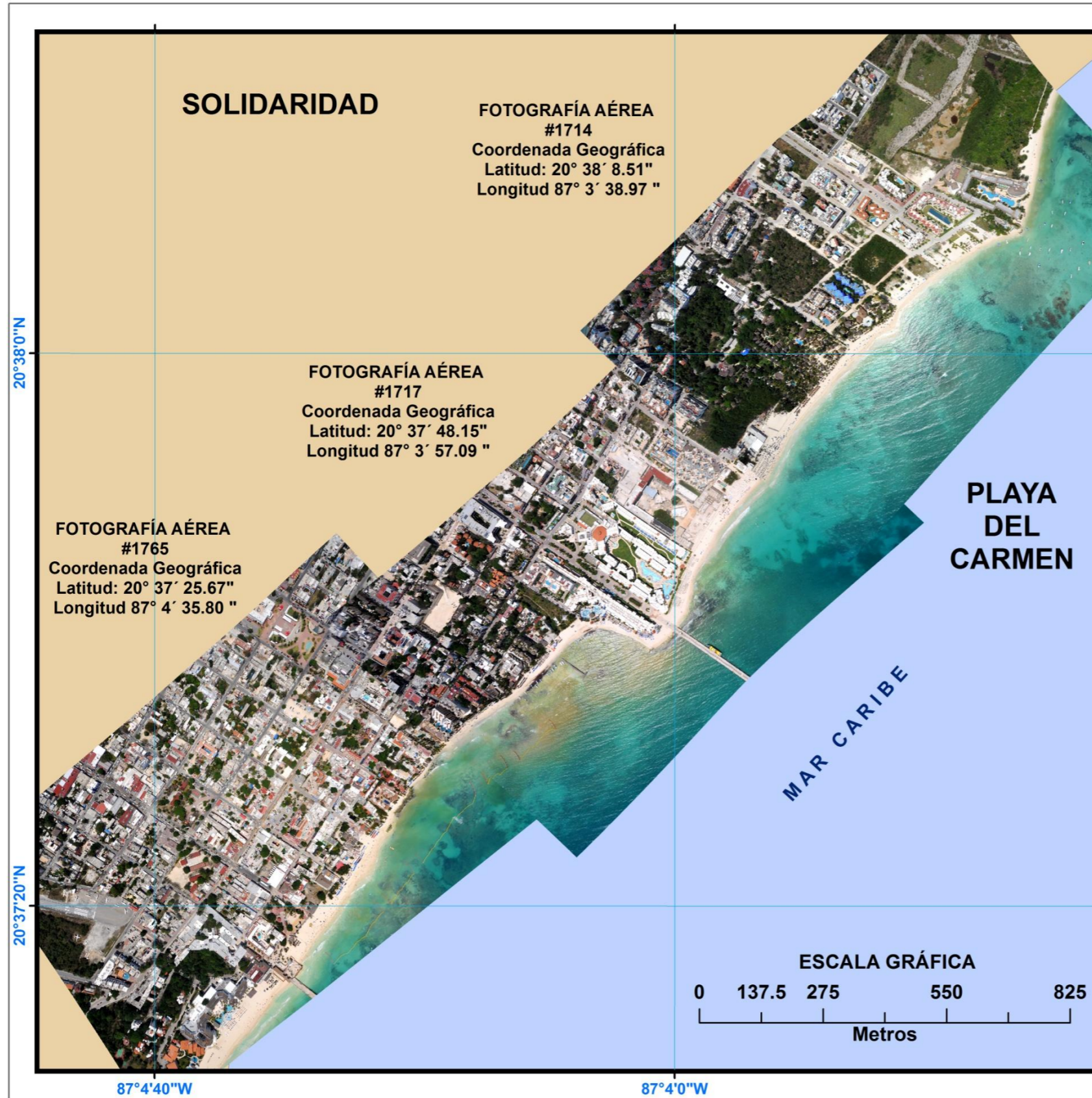
UNICACH
PAR LA CULTURA DE MI RAZA

ESCALA:..... 1:4,000
DATUM:..... WGS_1984
PROYECCIÓN:..... (UTM)
CUADRICULA..... 581 M

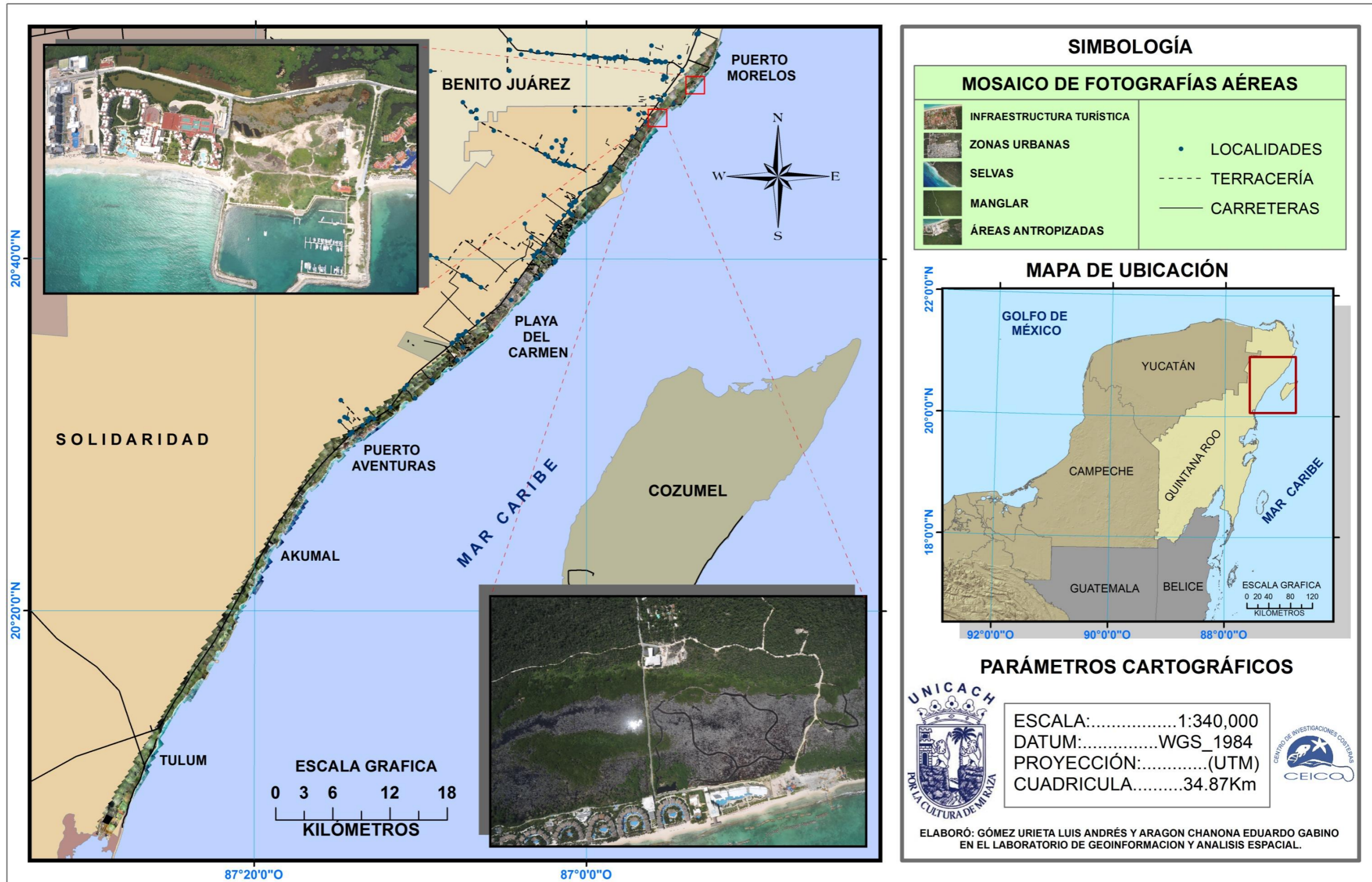
CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS
CEICQ

ELABORÓ: GÓMEZ URIETA LUIS ANDRÉS Y ARAGON CHANONA EDUARDO GABINO
EN EL LABORATORIO DE GEOINFORMACION Y ANALISIS ESPACIAL.

Mapa 2. Fotografía aérea digital georreferenciada #1958 aledaña a Puerto Morelos, Quintana Roo, México.



Mapa 3. Mosaico ilustrativo de 3 fotografías aéreas digitales de alta resolución de la costa de Playa del Carmen, Quintana Roo, México.



Mapa 4. Mosaico de fotografías aéreas digitales de alta resolución del 2014 de la Riviera Maya, Quintana Roo, México.

8.2 Confiabilidad global de los mapas

8.2.1 Matriz de Confusión de los Mapas de Uso del Suelo y Vegetación Sección Norte

La validación del mapa de uso del suelo y vegetación sección norte del año 1988, presenta una confiabilidad global de 95.70%; de 70 muestras totales, 67 sitios fueron correctamente identificados y los 3 restantes confundidos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección norte del año 1988.

		MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (NORTE) DEL AÑO 1988							ERROR DE OMISSION	CONFIABILIDAD DE PRODUCTO
		ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA		
R E F E R E N C I A D E L M A G E N D E	ÁREA ANTROPIZADA	9	0	0	0	0	1	0	10.00	90.00
	HUMEDAL	0	10	0	0	0	0	0	0.00	100.00
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	0	0	10	0	0	0	0	0.00	100.00
	MANGLAR	0	0	0	10	0	0	0	0.00	100.00
	PLAYA	0	0	0	0	10	0	0	0.00	100.00
	SELVA	1	0	0	0	0	9	0	10.00	90.00
	ZONA URBANA	0	0	1	0	0	0	9	10.00	90.00
ERROR DE COSIMSIÓN	10.00	0.00	9.09	0.00	0.00	10.00	0.00			
CONFIABILIDAD DE USUARIO	90.00	100.00	90.90	100.00	100.00	90.00	100.00			

La confiabilidad global del mapa de uso del suelo y vegetación de la sección norte del año 2000 es de 94.20%; de un total de 70 muestras, 66 sitios fueron correctamente identificados y los 4 restantes confundidos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección norte del año 2000.

		MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (NORTE) DEL AÑO 2000							ERROR DE OMISSION	CONFIABILIDAD DE PRODUCTO
		ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA		
R E F E R E N C I A D E L M A G E N D E	ÁREA ANTROPIZADA	8	0	0	0	0	0	2	20.00	80.00
	HUMEDAL	0	10	0	0	0	0	0	0.00	100.00
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	0	0	9	0	0	0	1	10.00	90.00
	MANGLAR	0	0	0	10	0	0	0	0.00	100.00
	PLAYA	0	0	0	0	10	0	0	0.00	100.00
	SELVA	0	0	0	0	0	10	0	0.00	100.00
	ZONA URBANA	0	0	1	0	0	0	9	10.00	90.00
ERROR DE COSIMSIÓN	0.00	0.00	9.09	0.00	0.00	0.00	25.00			
CONFIABILIDAD DE USUARIO	100.00	100.00	90.90	100.00	100.00	100.00	75.00			

A diferencia de los mapas anteriores en la validación del mapa del uso del suelo y vegetación de la sección norte del año 2014, se hicieron 80 muestreos debido a que existe una clase más que fue “manglar degradado”, por lo tanto la confiabilidad global de este mapa fue de 95%, 76 muestras correctamente identificadas y 4 confundidas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección norte del año 2014.

		MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (NORTE) DEL AÑO 2014								ERROR DE OMISIÓN	CONFIABILIDAD DE PRODUCTO
R E F E R E N C I A S M E S U R E S A I S C O	ÁREA	ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	MANGLAR DEGRADADO	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA		
	ÁREA ANTROPIZADA	8	0	0	0	0	0	2	0	20.00	80.00
	HUMEDAL	0	9	0	1	0	0	0	0	10.00	90.00
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	0	0	10	0	0	0	0	0	0.00	100.00
	MANGLAR	0	0	0	10	0	0	0	0	0.00	100.00
	MANGLAR DEGRADADO	0	0	0	0	10	0	0	0	0.00	100.00
	PLAYA	0	0	0	0	0	10	0	0	0.00	100.00
	SELVA	0	0	0	0	0	0	10	0	0.00	100.00
	ZONA URBANA	0	0	1	0	0	0	0	9	10.00	90.00
	ERROR DE COSIMSIÓN	0.00	0.00	9.09	9.09	0.00	0.00	16.66	0.00		
CONFIABILIDAD DE USUARIO	100.00	100.00	90.90	90.90	100.00	100.00	83.33	100.00			

8.2.2 Matriz de Confusión de los Mapas de Uso del Suelo y Vegetación Sección Sur

La validación del mapa de uso del suelo y vegetación sección sur del año 1988, presenta una confiabilidad global de 92.8%, 65 sitios correctamente identificados y los 5 restantes fueron confundidos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección sur del año 1988.

		MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACION (SUR) DEL AÑO 1988							ERROR DE OMISION	CONFIABILIDAD DE PRODUCTO
R E F E R E N C I A S M E S U R E S A I S C O	ÁREA	ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA		
	ÁREA ANTROPIZADA	8	1	0	0	0	0	1	20.00	80.00
	HUMEDAL	0	8	0	1	0	1	0	20.00	80.00
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	0	0	10	0	0	0	0	0.00	100.00
	MANGLAR	0	0	0	9	0	1	0	10.00	90.00
	PLAYA	0	0	0	0	10	0	0	0.00	100.00
	SELVA	0	0	0	0	0	10	0	0.00	100.00
	ZONA URBANA	0	0	0	0	0	0	10	0.00	100.00
	ERROR DE COSIMSIÓN	0.00	11.11	0.00	18.18	0.00	16.66	9.09		
	CONFIABILIDAD DE USUARIO	100.00	88.88	100.00	81.81	100.00	83.33	90.90		

La validación de los mapas del uso del suelo y vegetación sección sur de los años 2000 y 2014, presentaron una confiabilidad global de 91.4%; de un total de 70 muestras en cada mapa, 64 fueron correctamente identificadas y 6 confundidas (Cuadro 6 y 7).

Cuadro 6. Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección sur del año 2000.

		MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACION (SUR) DEL AÑO 2000							ERROR DE OMISSION	CONFIABILIDAD DE PRODUCTO
		ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA		
R E F E R E N C I A D E I M A G E N D A R E G I S T R O	ÁREA ANTROPIZADA	7		0	0	0	1	2	30.00	70.00
	HUMEDAL	0	8	0	1	0	1	0	20.00	80.00
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	0	0	10	0	0	0	0	0.00	100.00
	MANGLAR	0	0	0	10	0	0	0	0.00	100.00
	PLAYA	0	0	0	0	10	0	0	0.00	100.00
	SELVA	0	0	0	0	0	10	0	0.00	100.00
	ZONA URBANA	0	0	1	0	0	0	9	10.00	90.00
	ERROR DE COSIMSION	12.50	0.00	0.00	9.09	0.00	16.66	18.18		
	CONFIABILIDAD DE USUARIO	87.50	100.00	100.00	90.90	100.00	83.33	81.81		

Cuadro 7. Matriz de confusión: uso del suelo y vegetación sección sur del año 2014.

		MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACION (SUR) DEL AÑO 2014							ERROR DE OMISSION	CONFIABILIDAD DE PRODUCTO
		ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA		
R E F E R E N C I A M A S A R E A S	ÁREA ANTROPIZADA	10	0	0	0	0	0	0	0.00	100.00
	HUMEDAL	0	7	0	1	0	2	0	30.00	70.00
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	0	0	10	0	0	0	0	0.00	100.00
	MANGLAR	1	1	0	7	0	1	0	30.00	70.00
	PLAYA	0	0	0	0	10	0	0	0.00	100.00
	SELVA	0	0	0	0	0	10	0	0.00	100.00
	ZONA URBANA	0	0	0	0	0	0	10	0.00	100.00
	ERROR DE COSIMSION	9.09	12.50	0.00	12.50	0.00	23.07	0.00		
	CONFIABILIDAD DE USUARIO	90.91	87.50	100.00	87.50	100.00	76.92	100.00		

8.3 Mapa de uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya del año 1988

Se identificaron siete diferentes clases: áreas antropizadas, zonas urbanas, infraestructura turística, manglares, humedales, playas y selvas. Para diferenciar la clase de área antropizada de infraestructura turística y zonas urbanas se tomó el siguiente criterio:

- ❖ Área antropizada: zonas caracterizadas por presentar deforestación y rellenos.
- ❖ Infraestructura turística: áreas con presencia de desarrollos hoteleros.
- ❖ Zonas urbanas: áreas comerciales, viviendas residenciales y trazos carreteros.

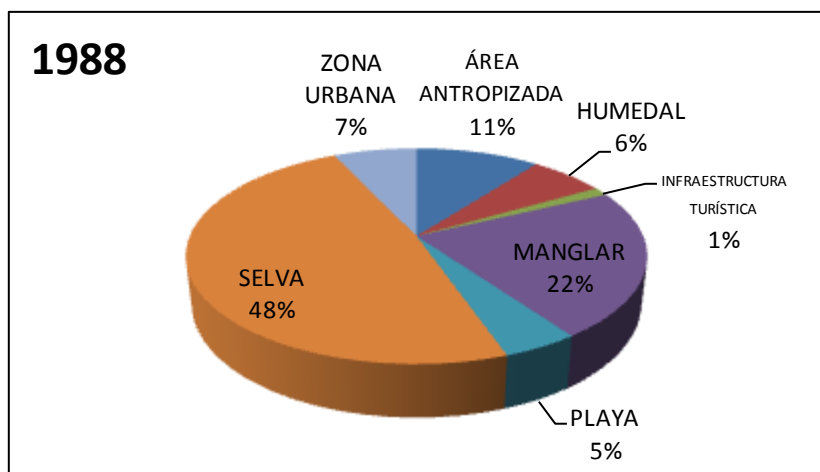
Las clases con mayor extensión fueron las selvas y los manglares y en el caso contrario se observa a los humedales, que se encuentran ubicados principalmente en Puerto Morelos, Tulum; se detectó una fuerte deforestación y pequeños parches de zonas urbanas en las localidades de Puerto Morelos-Playa del Carmen y el inicio del desarrollo de la infraestructura turística en la localidad de Puerto Aventuras, en la sección sur de la localidad de Akumal a Tulum se observan principalmente trazos carreteros y pequeños polígonos de uso urbano.

Las áreas antropizadas y las zonas urbanas ya se presentaban en 1988 con un área de 2,495.28 ha entre las dos clases, mientras que la infraestructura turística empezaba a desarrollarse en la Riviera Maya con apenas 182.06 ha desde ese entonces ya se notaban claras diferencias en el ritmo de transformación de la Riviera Maya, la presión de las actividades antrópicas desde ese momento estaban concentrándose en lugares como Puerto Aventuras, Playa del Carmen y Puerto Morelos.

A continuación se muestran los datos correspondientes al año 1988 en hectáreas y porcentajes de cada una de las clases identificadas, y el área total de la zona de estudio. (Cuadro 8 y Gráfica 1). En los mapas se puede observar una tabla de datos propios del año 1988 de la sección representada (Mapa 3 y 4).

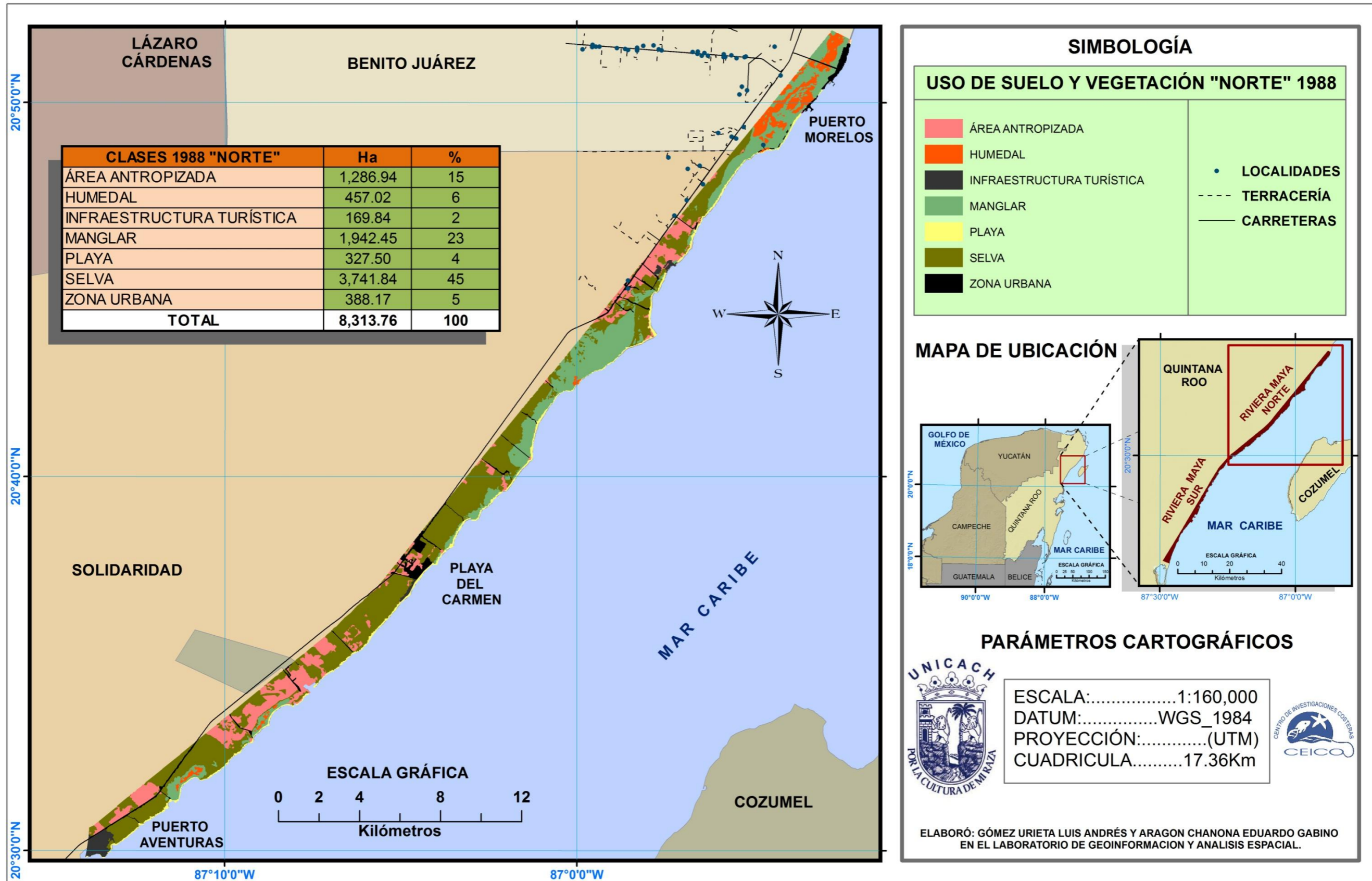
Cuadro 8. Datos de cobertura de superficies del uso del suelo y vegetación del año 1988.

CLASES 1988	Ha	%
ÁREA ANTROPIZADA	1,492.36	11
HUMEDAL	900.01	6
INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	182.06	1
MANGLAR	3,187.85	22
PLAYA	649.48	5
SELVA	6,941.26	48
ZONA URBANA	1,002.92	7
TOTAL	14,355.93	100

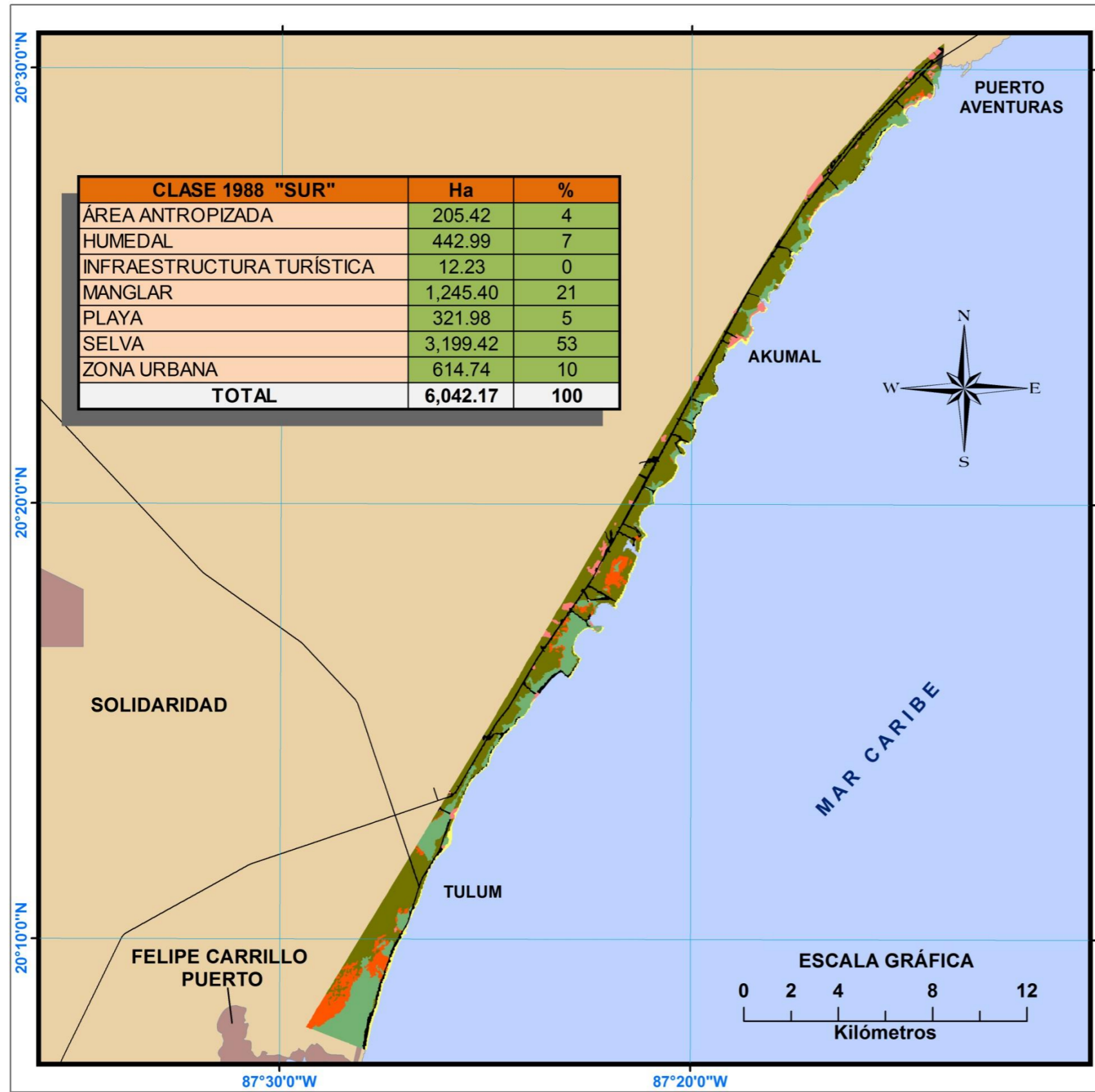


Gráfica 1. Porcentual de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del año 1988.

El área total del año “1988” en comparación con los dos años de análisis más, muestra un pequeño desfase con un faltante de aproximadamente 0.72 ha, a causa de que no se logró identificar el polígono que carece de las dimensiones correctas.



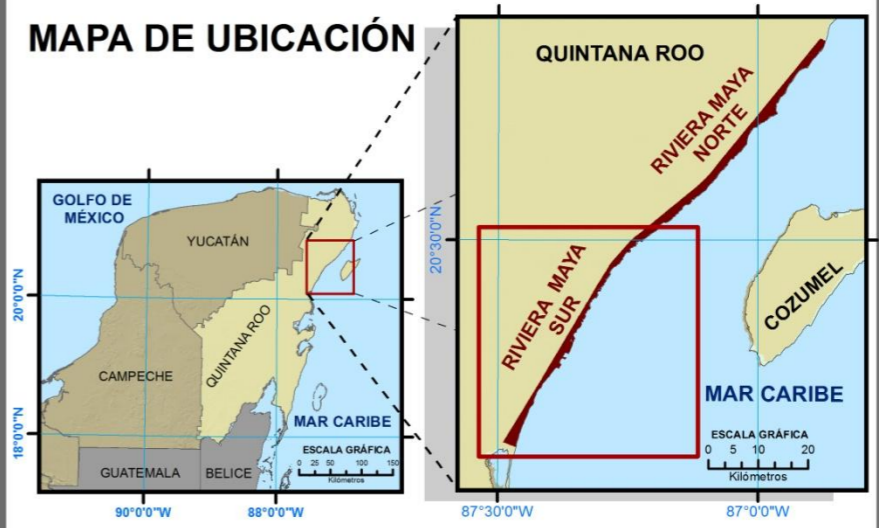
Mapa 5. Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección norte" del año 1988.



SIMBOLOGÍA

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN "SUR" 1988

	ÁREA ANTROPIZADA		LOCALIDADES
	HUMEDAL		TERRACERÍA
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA		CARRETERAS
	MANGLAR		
	PLAYA		
	SELVA		
	ZONA URBANA		



PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

ESCALA:.....1:170,000
 DATUM:.....WGS_1984
 PROYECCIÓN:.....(UTM)
 CUADRICULA.....17.56Km

ELABORÓ: ARAGON CHANONA EDUARDO GABINO Y GÓMEZ URIETA LUIS ANDRÉS
 EN EL LABORATORIO DE GEOINFORMACION Y ANALISIS ESPACIAL.

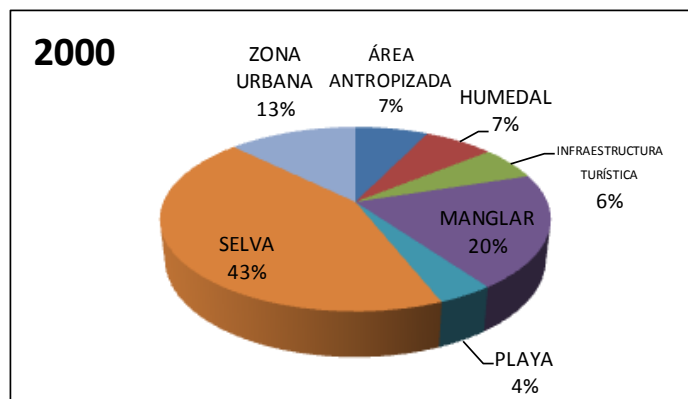
Mapa 6. Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección sur" del año 1988.

8.4 Mapa de uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya del año 2000

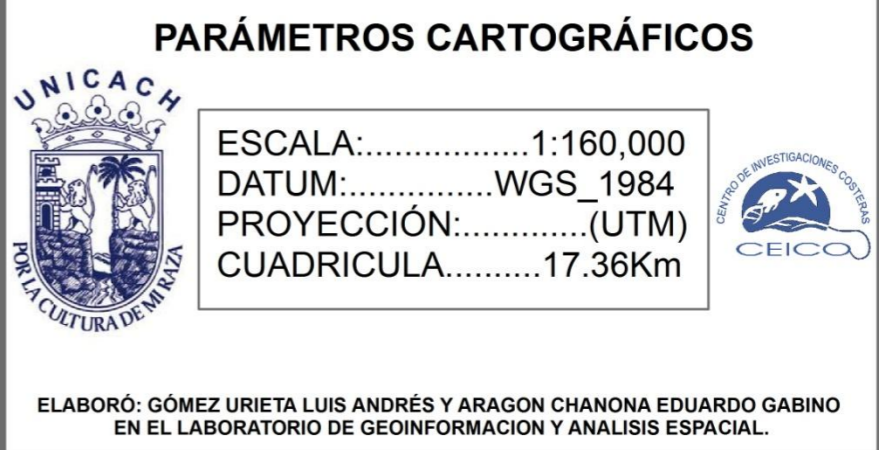
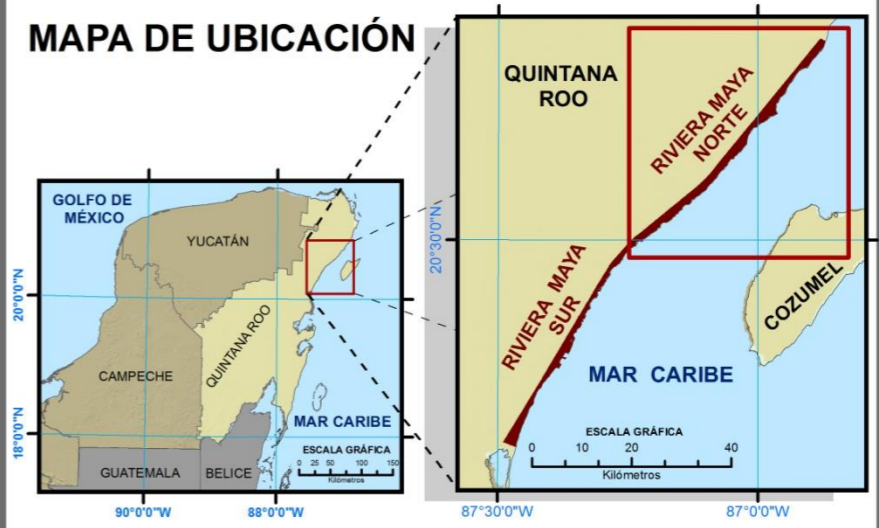
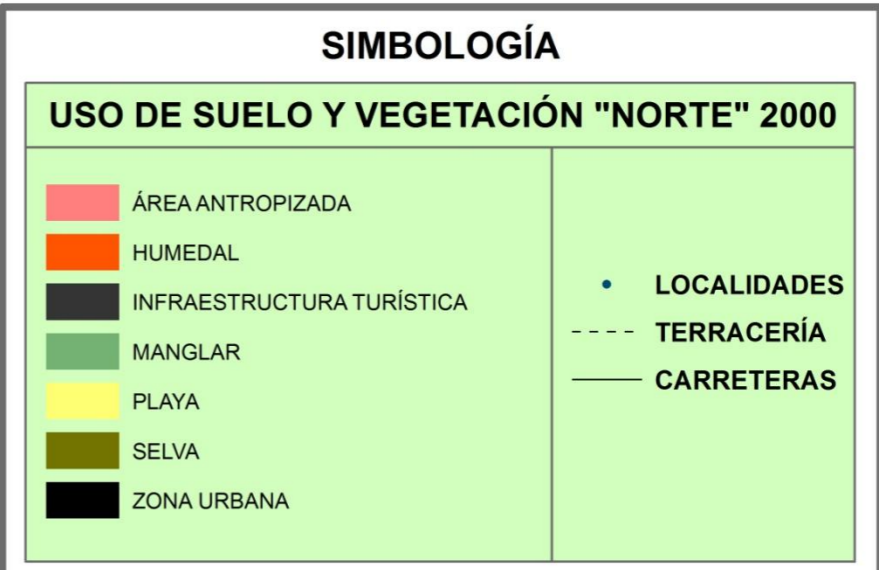
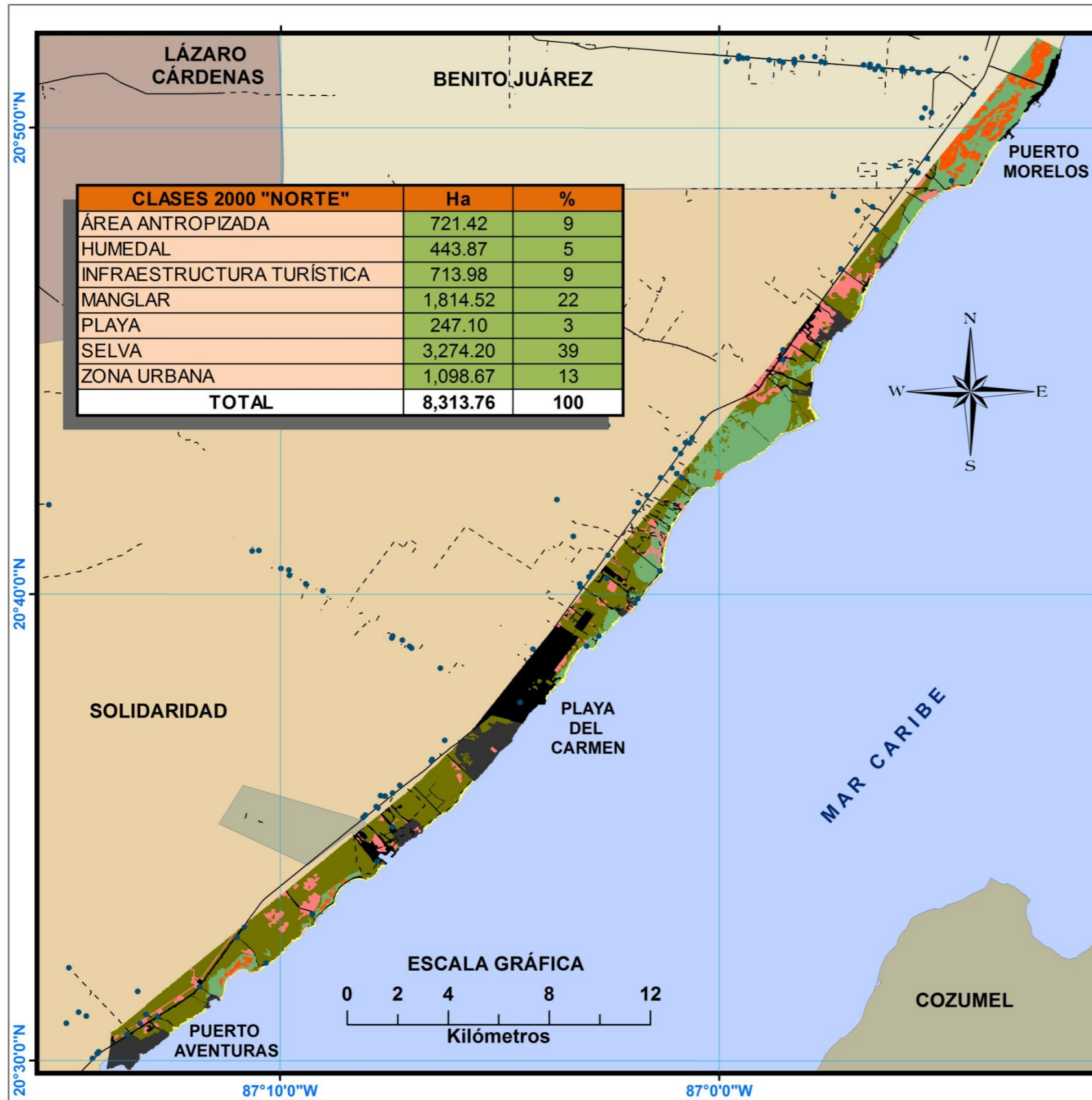
En esta clasificación se cartografiaron las mismas clases del análisis anterior, notando un crecimiento de las zonas urbanas de 821.73 ha más desarrollado en la sección norte del área de estudio y con ello se logra la consolidación de la ciudad de Playa del Carmen, el desarrollo turístico muestra también un incremento extenso de más de cuatro veces su tamaño, precisamente 664.62 ha comprendiendo Puerto Aventuras y nuevos parches aledaños a Puerto Morelos, Playa del Carmen y cercanías de Akumal. El incremento de estas dos categorías se debe en gran medida a que se utilizaron áreas antropizadas para su establecimiento, es por eso que se nota una reducción de 451.84 ha en la superficie total de esta categoría, en el caso de los manglares y selvas presentan una disminución de superficie de 314.24 ha y 719.19 ha respectivamente (Cuadro 9, gráfica 2, Mapa 7 y 8).

Cuadro 9. Datos de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del año 2000.

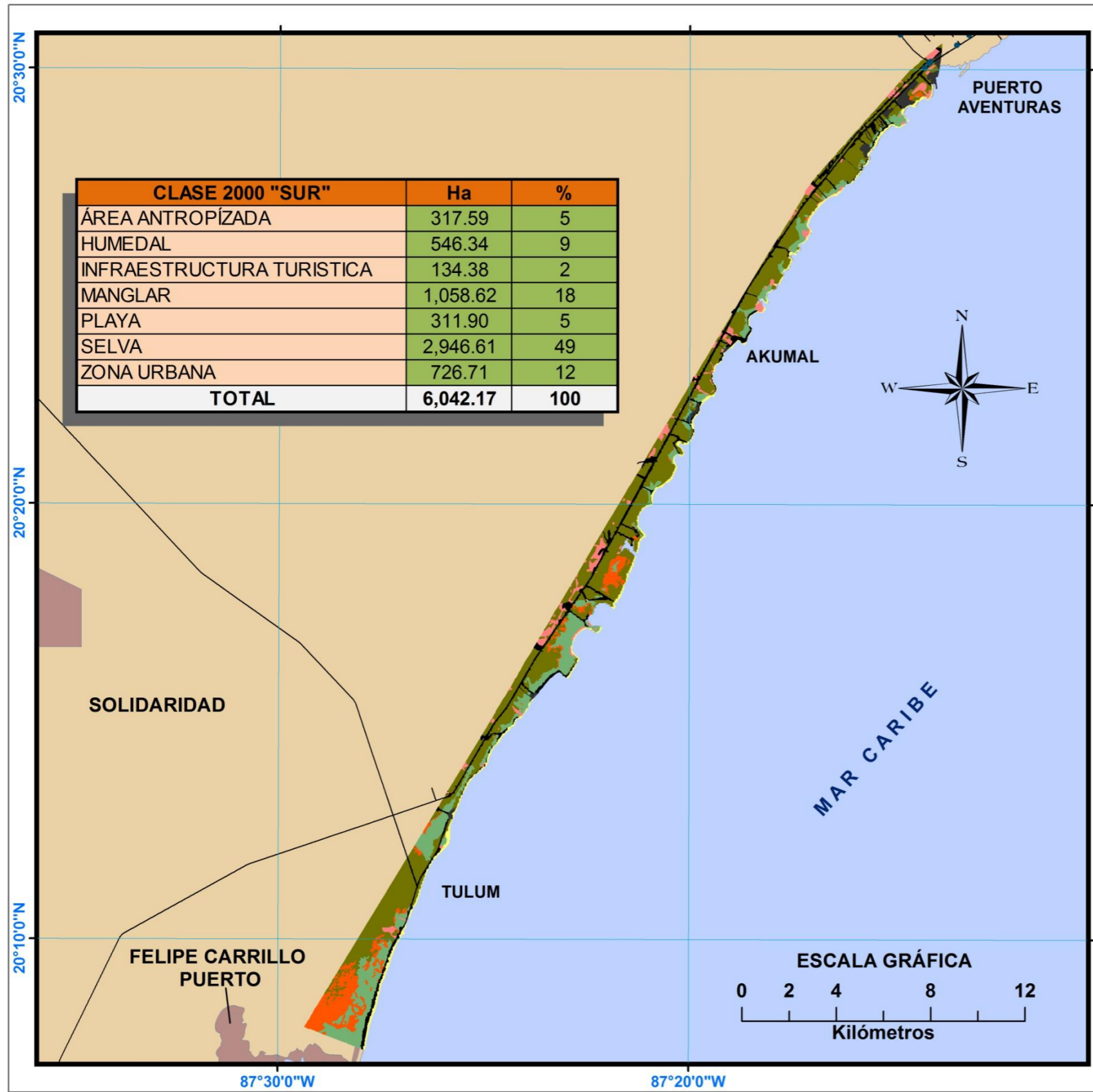
CLASES 2000	Ha	%
ÁREA ANTROPIZADA	1,040.52	7
HUMEDAL	989.95	7
INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	846.68	6
MANGLAR	2,873.61	20
PLAYA	559.19	4
SELVA	6,222.07	43
ZONA URBANA	1,824.65	13
TOTAL	14,356.66	100



Gráfica 2. Porcentual de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del año 2000.



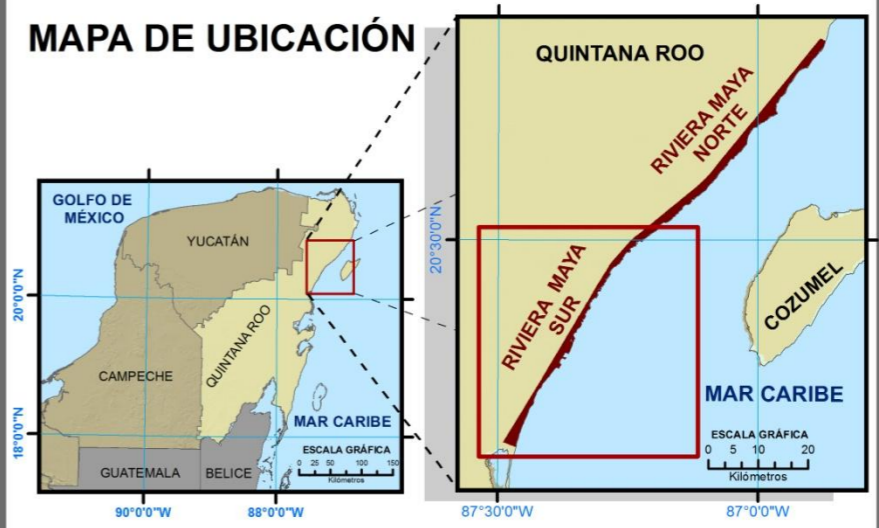
Mapa 7. Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección norte" del año 2000.



SIMBOLOGÍA

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN "SUR" 2000

	ÁREA ANTROPÍZADA		LOCALIDADES
	HUMEDAL		TERRACERÍA
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA		CARRETERAS
	MANGLAR		
	PLAYA		
	SELVA		
	ZONA URBANA		



PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

ESCALA:.....1:170,000
 DATUM:.....WGS_1984
 PROYECCIÓN:.....(UTM)
 CUADRICULA.....17.56Km

ELABORÓ: ARAGON CHANONA EDUARDO GABINO Y GÓMEZ URIETA LUIS ANDRÉS
 EN EL LABORATORIO DE GEOINFORMACION Y ANALISIS ESPACIAL.

Mapa 8. Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección sur" del año 2000.

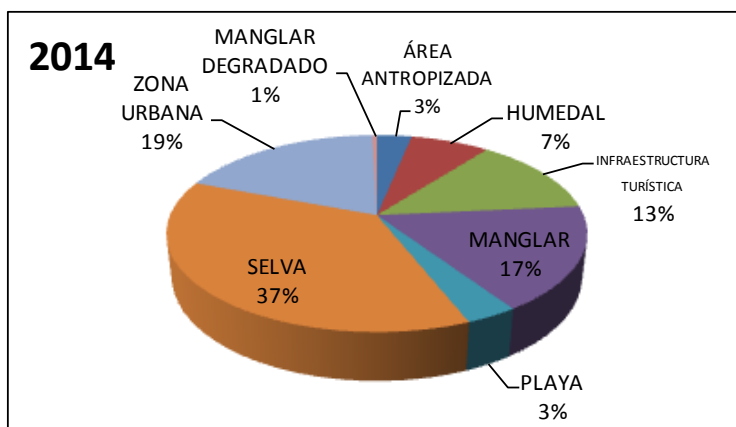
8.5 Mapa de uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya del año 2014

A diferencia de los análisis anteriores, en este año se identificó y cartografió una clase más, que se definió como manglar degradado ocupando una extensión de 62.24 ha ubicándose cerca de la localidad de Puerto Morelos.

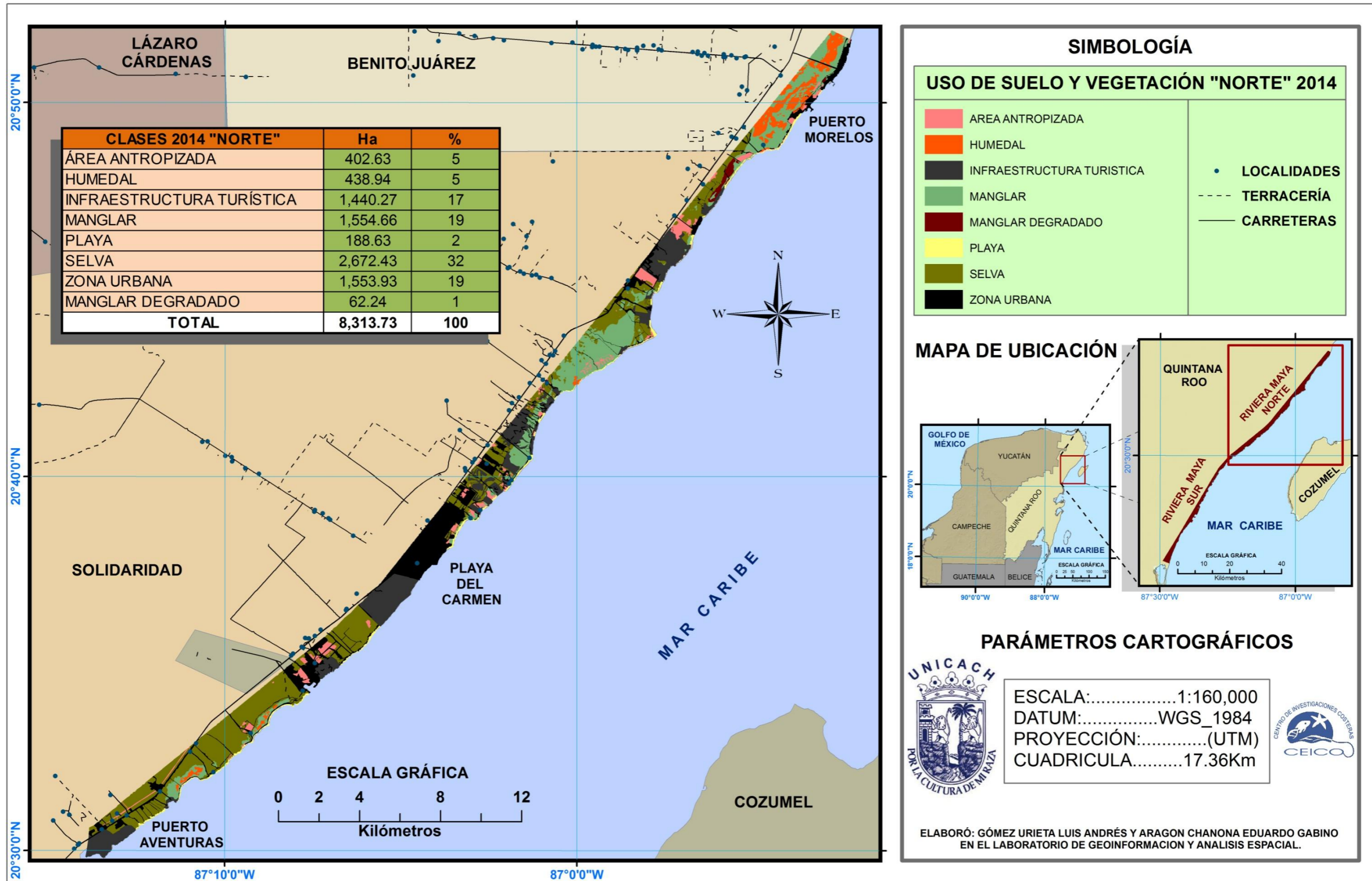
Nuevamente se detectó un incremento de las zonas urbanas de 865.34 ha e infraestructura turística de más del doble 1,024.12 ha que se extendieron de norte a sur entre las localidades de Puerto Aventuras y Akumal y en menor medida hacia Tulum, actualmente se considera como un incremento invasivo ocupando 73.69 ha de playas y absorbiendo grandes áreas de selvas 935.69 ha y manglares 411.8 ha las áreas antropizadas disminuyeron 581.12 ha, afortunadamente están poco presentes en la sección sur, aunque en la sección norte aun ocupan zonas mucho más amplias y la tendencia de la construcción de tramos carreteros sigue en aumento (Cuadro 10, Gráfica 3, Mapa 9 y 10).

Cuadro 10. Datos de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del año 2014.

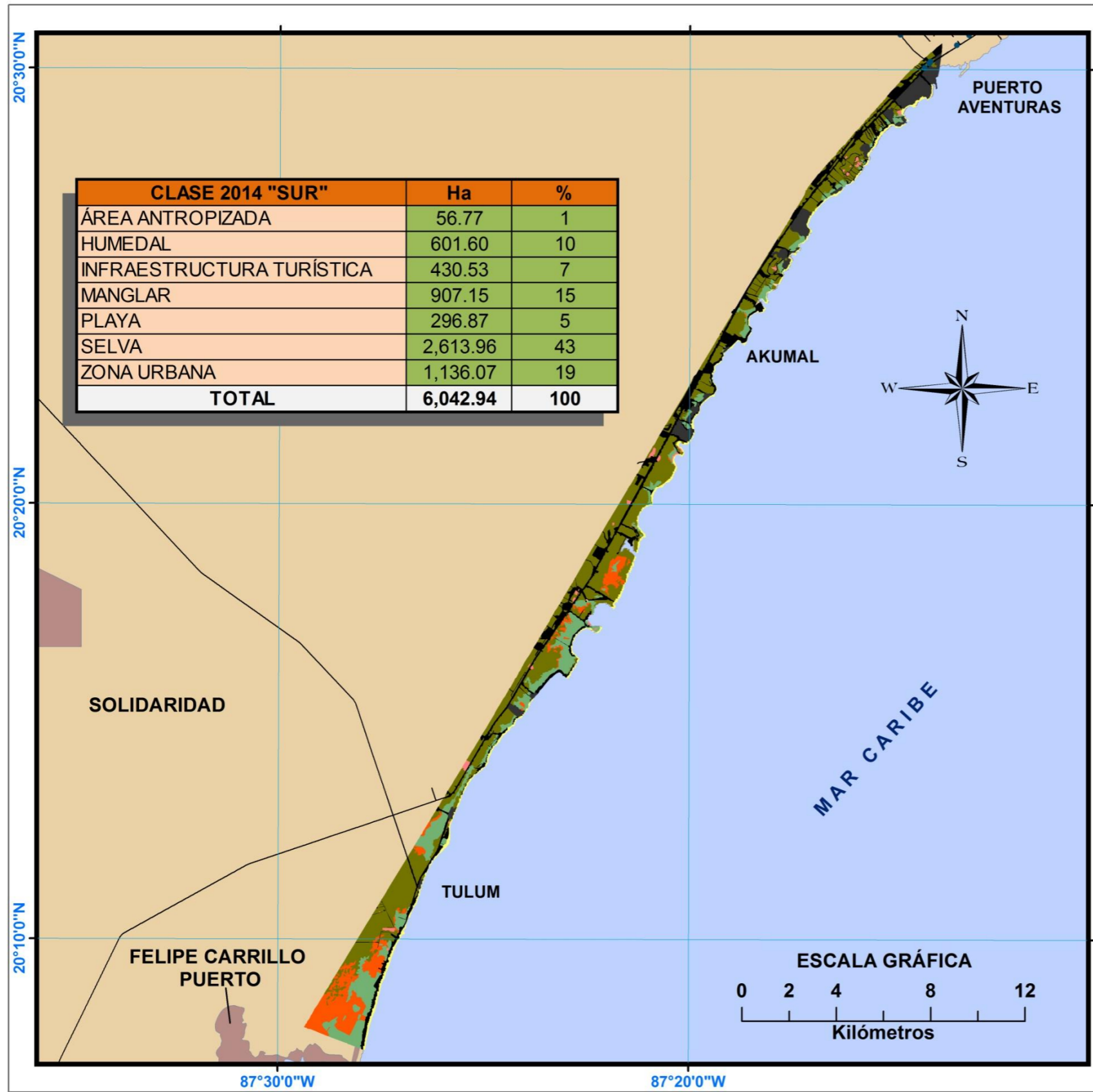
CLASES 2014	Ha	%
ÁREA ANTROPIZADA	459.40	3
HUMEDAL	1,040.54	7
INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	1,870.80	13
MANGLAR	2,461.81	17
PLAYA	485.50	3
SELVA	5,286.38	37
ZONA URBANA	2,689.99	19
MANGLAR DEGRADADO	62.24	1
TOTAL	14,356.66	100



Gráfica 3. Porcentual de cobertura de superficie del uso del suelo y vegetación del



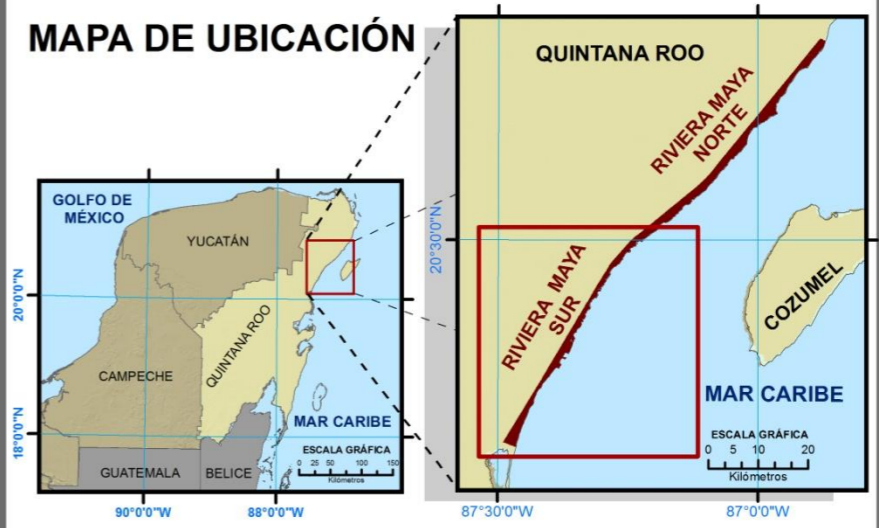
Mapa 9. Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección norte" del año 2014.



SIMBOLOGÍA

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN "SUR" 2014

- ÁREA ANTROPIZADA
- HUMEDAL
- INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA
- MANGLAR
- PLAYA
- SELVA
- ZONA URBANA
- LOCALIDADES
- TERRACERÍA
- CARRETERAS



PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

UNICACH
 ESCALA:.....1:170,000
 DATUM:.....WGS_1984
 PROYECCIÓN:.....(UTM)
 CUADRICULA.....17.56Km

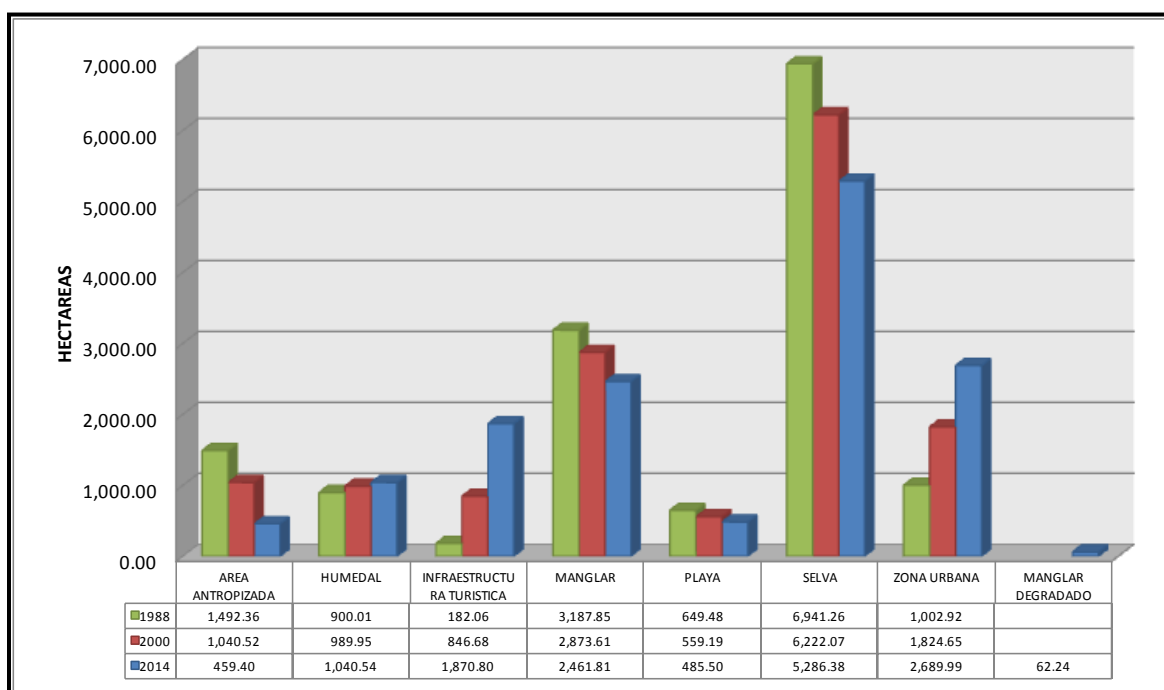
ELABORÓ: ARAGON CHANONA EDUARDO GABINO Y GÓMEZ URIETA LUIS ANDRÉS
 EN EL LABORATORIO DE GEOINFORMACION Y ANALISIS ESPACIAL.

Mapa 10. Uso del suelo y vegetación de la Riviera Maya "sección sur" del año 2014.

8.6 Análisis comparativo del comportamiento de clases y superficies en los tres años de estudio

A continuación se muestra la variación de las diferentes clases en los tres años comparados, observándose las tendencias de incremento y decremento de unas y otras clases.

Las áreas antropizadas presentan disminución gradual de su cobertura, ya que la deforestación masiva que se realizó en un principio están siendo utilizadas para la construcción de infraestructura, lo que da lugar al incremento potencial de zonas urbanas e infraestructura turística y como consecuencia ocasiona la pérdida de las selvas y manglares; también se muestra el poco incremento de los humedales y la disminución de las playas, además de la aparición de la categoría de manglar degradado solo presente en el año 2014 ver (Gráfica 4).



Gráfica 4. Dinámica comparativa de las clases de los años analizados.

8.7 Mapa de degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya período 1988-2000

Se categorizaron 13 diferentes clases, en las que se encuentran los cuatro principales ecosistemas costeros de la zona, los humedales, manglares, selvas y playas, además procesos de cambio que han sufrido estos ecosistemas (Mapa 11 y 12) tal es el caso del:

- ❖ Deforestación de manglar o selva, son áreas que al principio del período mantenían sus características naturales como manglares o selvas y que al final del período se detectaron como zonas que ya habían sido taladas y posteriormente rellenadas.
- ❖ Recuperación de manglar o selva, son áreas que han tenido la capacidad de recuperarse gradualmente a lo largo del período de análisis, después de sufrir deforestación.
- ❖ Degradación de manglar, son zonas que al inicio del período presentan poblaciones de manglares y que al final del período se identificó una grave perturbación de los mismos y no muestran signos de recuperación.
- ❖ Transformación de humedal y playa son áreas no forestales, que al final del período de análisis fueron transformadas en zonas urbanas o infraestructura turística.
- ❖ Cambio antrópico, representa a aquellas áreas que en un principio del período de análisis, se detectó deforestación y rellenos y que al final del período, esas áreas terminaron siendo zonas urbanas o infraestructura turística.
- ❖ Permanencia antrópica, indica zonas urbanas o infraestructura turística que se mantienen igual durante el período de tiempo de comparación.

Las selvas en el año 1988 ocupaban un total de 6,941 ha, de las cuales en el año 2000 perdieron 366 ha a áreas antropizadas, 455 ha a infraestructura turística, 506 ha a zonas urbanas, manteniendo sin cambio 5,612 ha y agregándose la recuperación de 608 ha que en el año 1988 eran áreas antropizadas, calculando que en el año 2000 las selvas redujeron su ocupación a un total de 6,220 ha (Cuadro 11).

Cuadro 11. Matriz de detección de cambio período 1988-2000.

		USO DE SUELO Y VEGETACIÓN 2000							
		ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA	TOTAL
U	ÁREA ANTROPIZADA	563.50		77.47	4.46		608.01	238.91	1,492.36
S	HUMEDAL	2.59	837.58	2.58	55.32			1.94	900.01
V	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA			182.06					182.06
1	MANGLAR	106.17	152.64	66.55	2,813.36			49.13	3,187.85
9	PLAYA			64.53		559.00		25.94	649.48
8	SELVA	366.75		455.17			5,612.80	506.54	6,941.26
8	ZONA URBANA							1,002.92	1,002.92
	TOTAL	1,039.01	990.21	848.36	2,873.14	559.00	6,220.81	1,825.39	14,355.93

Las mayores probabilidades de transición se registraron en las selvas, que perdieron el 7.29% de superficie a zonas urbanas, 6.55% a infraestructura turística y 5.28% a áreas antropizadas (deforestación de selva). Seguido de las áreas antropizadas que recuperaron 40.74% de superficie hacia selvas, 16% a zonas urbanas (cambio antrópico) y 5.19% a infraestructura turística (cambio antrópico). Y los manglares perdiendo superficies y pasando a ser el 1.54% a zonas urbanas, 2.08% a infraestructura turística y 3.33% a áreas antropizadas (deforestación) (Diagrama 1).

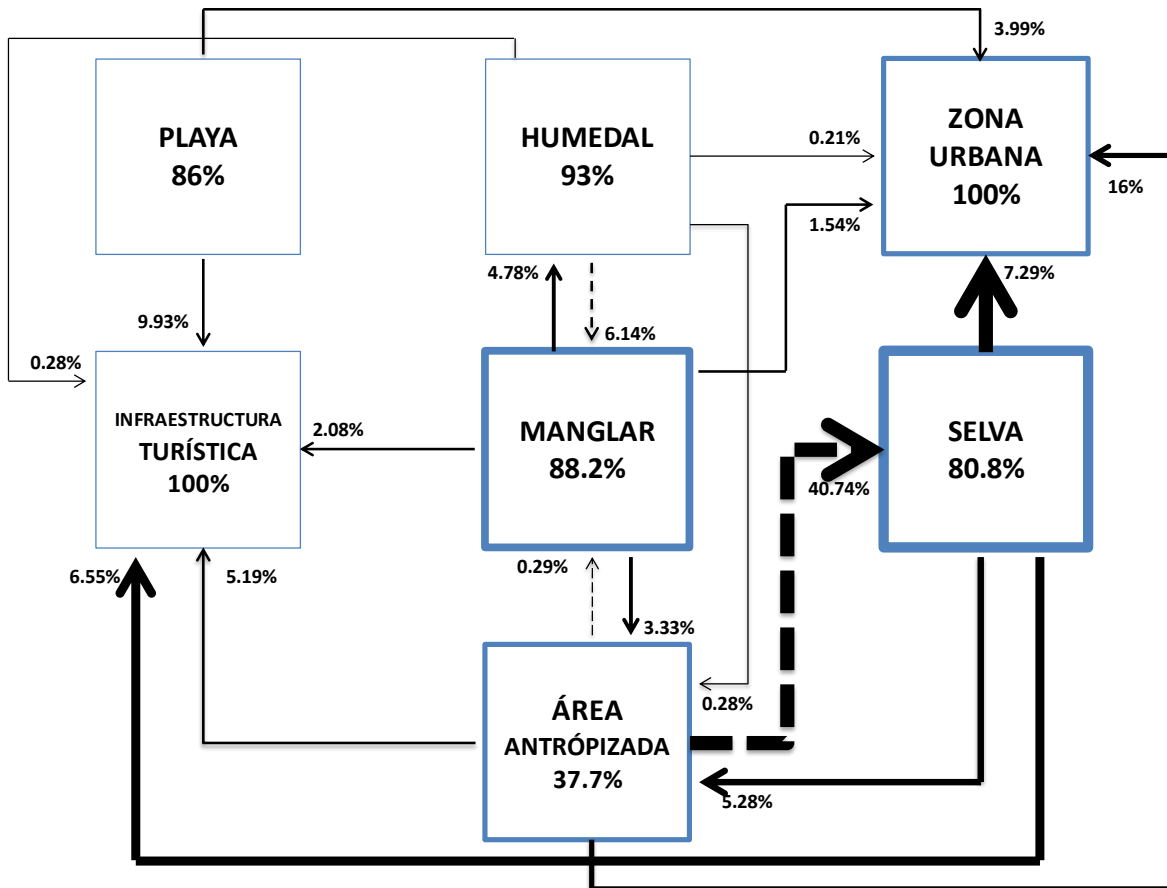
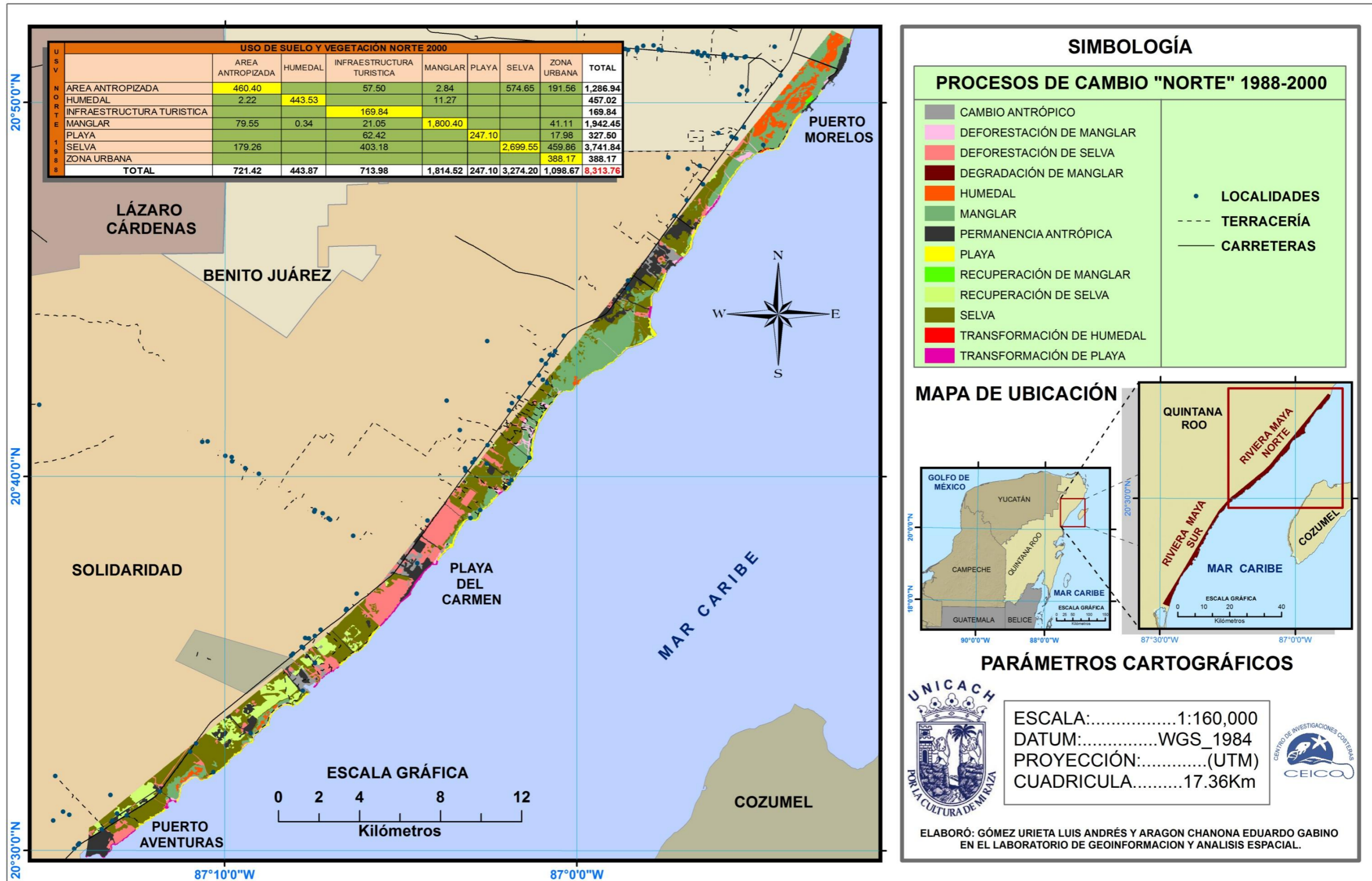
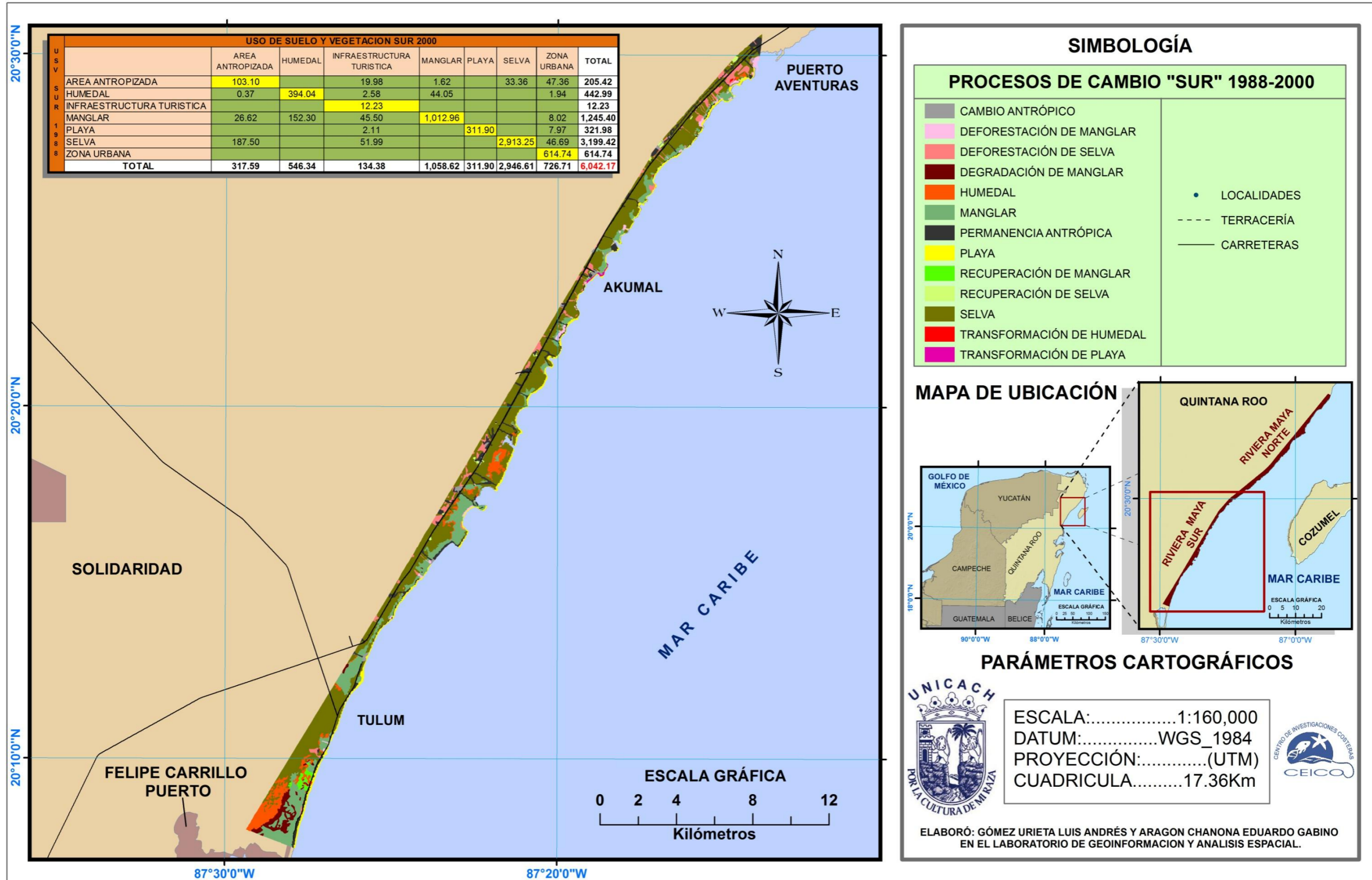


Diagrama 1. Flujo de probabilidades de transición del período 1988-2000.



Mapa 11. Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección norte" período 1988-2000.



Mapa 12. Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección sur" período 1988-2000.

8.8 Mapa de degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya período 2000-2014

En este período de análisis se detectó la mayor extensión de zonas urbanas e infraestructura turística en la localidad Playa del Carmen y aledaño a estos polígonos en la sección sur se encuentran procesos de deforestación de selvas y manglares. El cambio antrópico se desarrolla entre Puerto Morelos y Playa del Carmen, además de polígonos de transformación de playa por infraestructura turística que se encuentran más frecuentemente en la sección norte de la Riviera Maya (Mapa 13 y 14).

Cuadro 12. Matriz de detección de cambio período 2000-2014. La clase de manglar degradado no muestra el dato de superficie sin cambio debido a que en el año 2000 aun no se presentaba degradación en ese ecosistema.

		USO DE SUELO Y VEGETACION 2014								
		ÁREA ANTROPIZADA	HUMEDAL	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	MANGLAR	MANGLAR DEGRADADO	PLAYA	SELVA	ZONA URBANA	TOTAL
U S V 2 0 0	ÁREA ANTROPIZADA	222.22	0.62	211.57	25.27			342.98	237.85	1,040.52
	HUMEDAL	0.05	918.37	9.62	49.46				12.44	989.95
	INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA			846.68						846.68
	MANGLAR	75.62	121.54	147.07	2,387.07	62.24			80.06	2,873.61
	PLAYA			45.79			485.50		27.90	559.19
	SELVA	161.50		610.08				4,943.40	507.09	6,222.07
	ZONA URBANA								1,824.65	1,824.65
TOTAL		459.40	1,040.54	1,870.80	2,461.81	62.24	485.50	5,286.38	2,689.99	14,356.66

Tomando el mismo ejemplo que en el período de análisis anterior, las selvas en el año 2000 ocupaban un área total de 6,220 ha de las cuales se destinaron para el año 2014, 161 ha a áreas antropizadas, 610 ha a infraestructura turística, 507 ha a zona urbana, con una permanencia de 4,943 ha y una recuperación de 342 ha de selvas que en el año 2000 presentaba área antropizada (Cuadro 12).

Las selvas de igual manera que en el período de análisis anterior, siguen con la tendencia de mostrar transiciones hacia las zonas urbanas, infraestructura turística y en menor cantidad hacia áreas antropizadas, en comparación con el período de análisis anterior.

Las áreas antropizadas continúan destinando superficie hacia las zonas urbanas, infraestructura turística y selvas, cabe mencionar que las áreas que se han logrado recuperar han disminuido considerablemente en comparación con el período anterior.

Los manglares además de seguir perdiendo superficie a causa de las zonas urbanas, infraestructura turística y áreas antropizadas, en este período de análisis también pierde superficie a causa del estado de degradación en el que se encuentran algunas zonas (Diagrama 2).

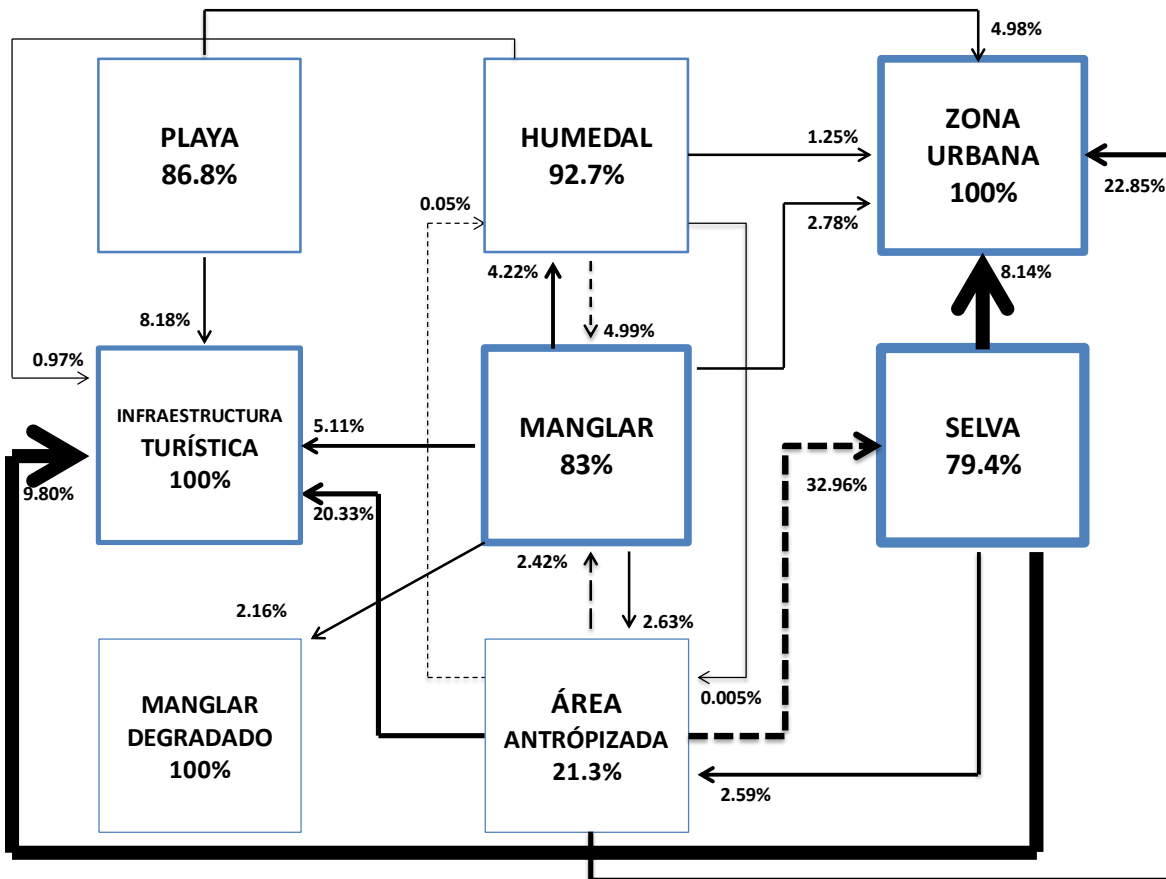
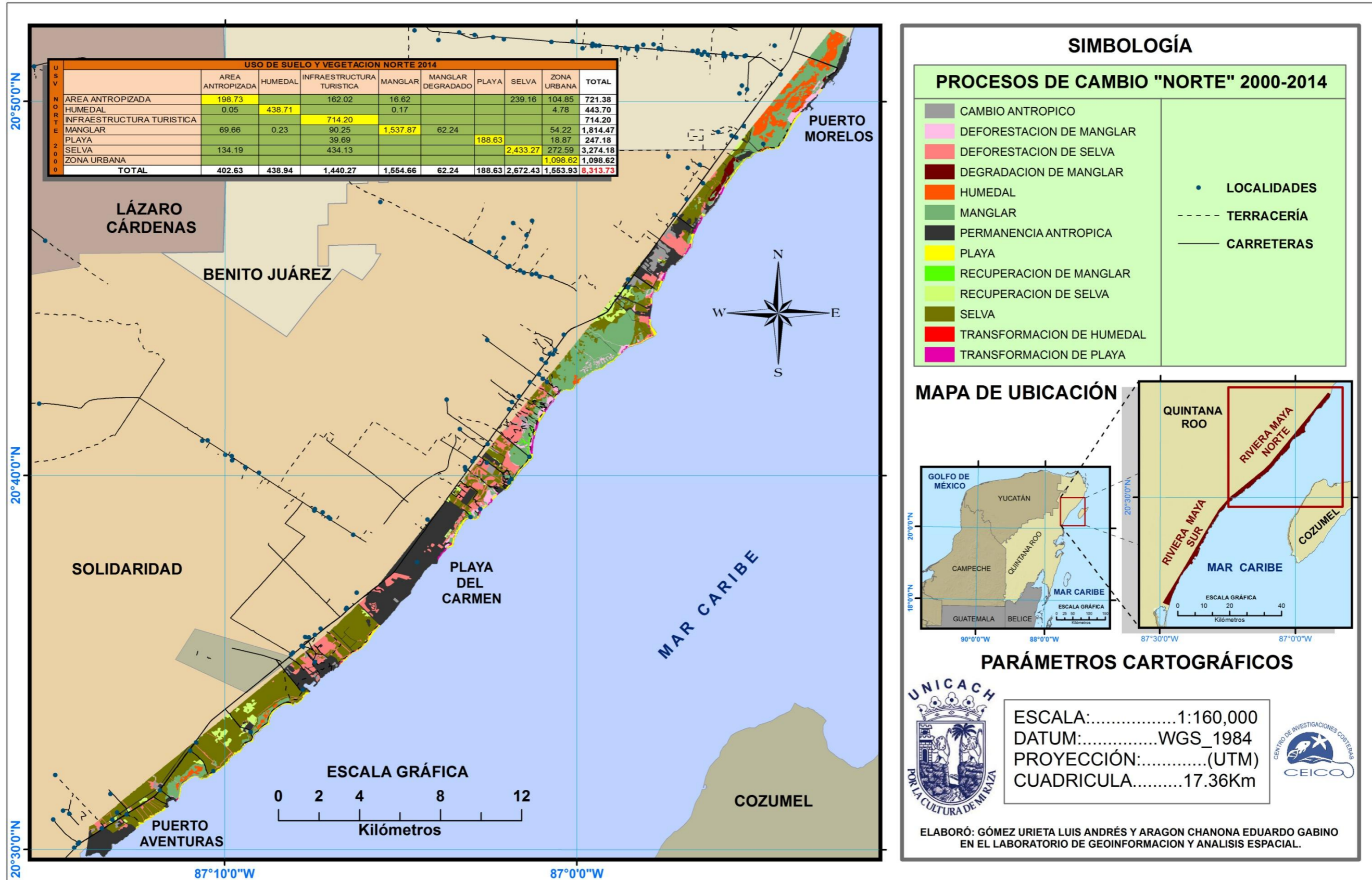
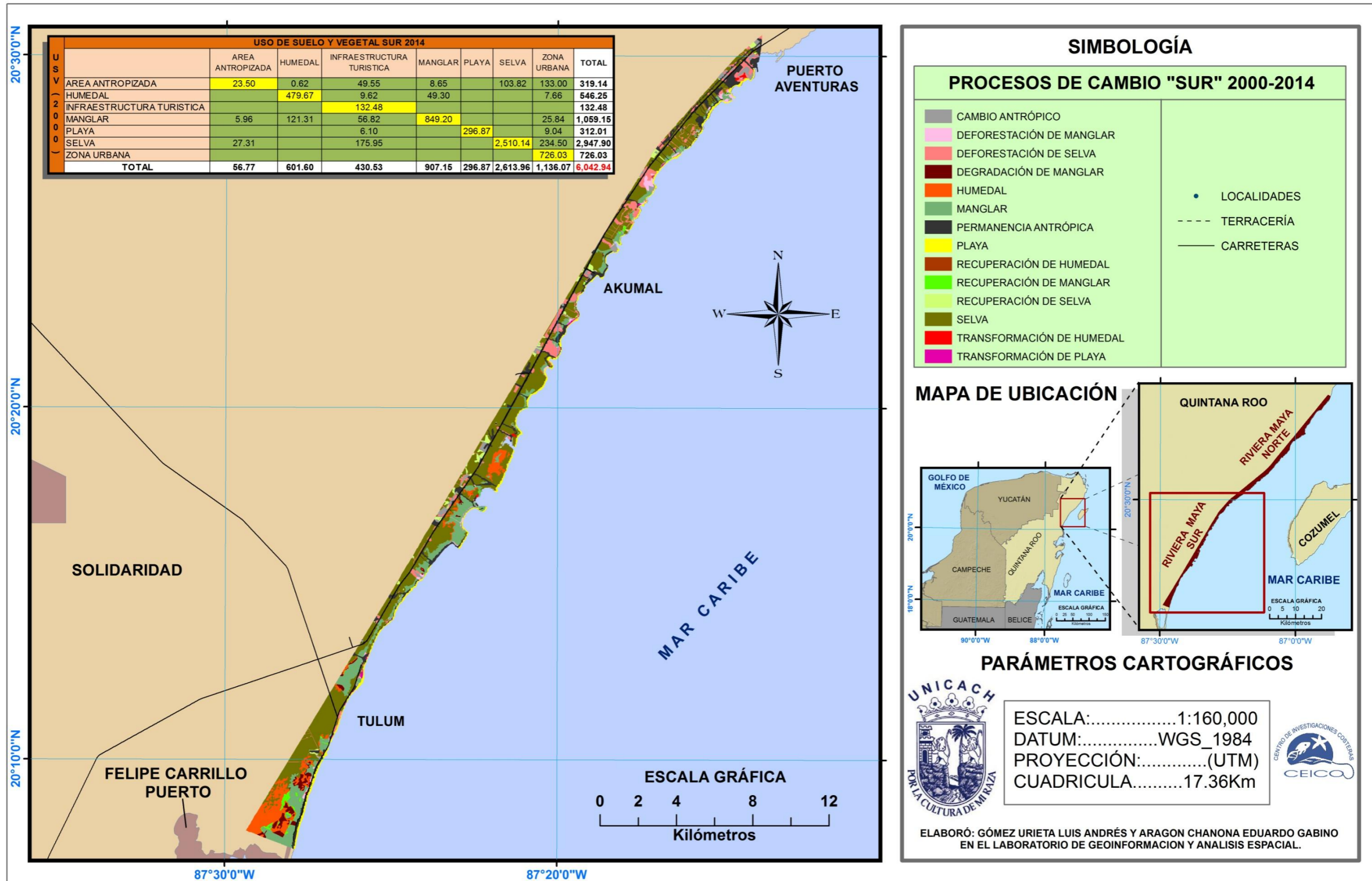


Diagrama 2. Flujo de probabilidades de transición del período 2000-2014.



Mapa 13. Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección norte" período 2000-2014.



Mapa 14. Degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya "sección sur" período 2000-2014.

8.9 Tasa de deforestación

Los manglares presentaron una tasa de deforestación en el primer período de -0.83% y en el siguiente período mostro un incremento de la tasa de deforestación de -1.08%, las selvas tuvieron un comportamiento aun más elevado, en el primer período de -0.87% y en el segundo de 1.13%. Demostrando ser estos los ecosistemas con las tasas de deforestación más altas en la Riviera Maya.

Cuadro 13. Tasa de deforestación porcentual (%).

CLASES	1988-2000	2000-2014
ÁREA ANTROPIZADA	-2.84	-5.56
HUMEDAL	0.76	0.35
INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	13.08	5.71
MANGLAR	-0.83	-1.08
PLAYA	-1.19	-0.98
SELVA	-0.87	-1.13
ZONA URBANA	4.90	2.75

8.10 Pérdida anual de superficie

En los valores de la pérdida anual promedio de superficie se muestran las áreas en hectáreas que perdieron o ganaron según la clase y el período de tiempo analizado; por ejemplo las selvas en el período 1988-2000 perdió 59.93 ha, caso contrario de la infraestructura turística que incrementó 55.38 ha y en el siguiente período 2000-2014 las selvas nuevamente perdieron 66.83 ha y la infraestructura turística volvió a incrementar 73.15 ha.

Cuadro 14. Pérdida anual de superficie en hectáreas, los datos en (-) representan

CLASES	1988-2000	2000-2014
ÁREA ANTROPIZADA	-37.65	-41.51
HUMEDAL	7.50	3.61
INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA	55.38	73.15
MANGLAR	-26.19	-29.41
PLAYA	-7.52	-5.26
SELVA	-59.93	-66.83
ZONA URBANA	68.48	61.81

IX. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se demuestra el cumplimiento de los supuestos planteados, por que se presentan las tasas de deforestación y pérdidas anuales de superficies de manglares y selvas en aumento, comparando los dos períodos de análisis y registrando un incremento de las zonas urbanas e infraestructura turística a lo largo de la Riviera Maya.

Los resultados más relevantes fueron la estimación de una superficie total de 2,461.81 ha de manglares en la Riviera Maya del año 2014, que representa aproximadamente el 1.89% de los 129,921 ha como superficie global del estado de Quintana Roo, que constituye el 16.87% de los 770,057 ha total nacional de superficie de manglares (CONABIO, 2009; Acosta-Velázquez *et al.*, 2010).

En los dos períodos de análisis de esta investigación los manglares presentaron tasas de deforestación aun más elevadas en comparación con (Díaz-Gallegos y Acosta-Velázquez, 2009) que registraron una tasa de cambio anual de -0.65% en el santuario del manatí bahía de Chetumal, destacando ser el ecosistema con el registro más alto en su análisis durante el período 1990-2005, a diferencia de nuestros resultados que indican que son las selvas el ecosistema con la tasa de deforestación más elevadas.

Las tasas de deforestación de manglar en este estudio son similares con las de otros sitios analizados dentro de la República Mexicana, como las que presentó (Díaz-Gallegos, *et al.*, 2012) al registrar en el período 1973-2006, -0.5% en Teacapán Agua Brava marismas nacionales, -0.13% en la Reserva de la Biosfera la Encrucijada, -1.02% en sistema lagunar de Alvarado, Veracruz y -0.13% en la laguna de Términos, Campeche. Sin embargo las tasas de deforestación en la Riviera Maya son aun más elevadas con -1.08%.

Además en el año 2006 (Díaz-Gallegos, *et al.*, 2012) identificaron manglar degradado, registrando 5,487 ha en Teacapán Agua Brava, 56 ha en el sistema lagunar de Alvarado y 44 ha en la laguna de Términos, siendo los dos últimos

datos los más similares al presentado en esta investigación donde se cuantificó una superficie de 62.24 ha en el año 2014.

Las fotografías aéreas digitales de alta resolución, ofrecen al intérprete especialista, la capacidad de realizar una interpretación visual e identificar los diferentes tipos de uso y vegetación existentes en el área de estudio, ya que se toman en cuenta diferentes características y patrones como la localización, tamaño, forma, color, tono, textura; Que minimiza en gran medida errores de confusión, problemáticas de presencia de nubosidad, confusión espectral y errores de origen tales como el bandeo de las imágenes de satélite que se generan por depender solamente de algún método de clasificación semi o automatizado, dando como resultados la sobreestimación de los datos reales, tal como le sucedió a (Miranda, 2008) al registrar tasas de deforestación de -8.7% en la década de los 70's, -8% en los 80's y finalizando con -1.9% en los 90's siendo este último dato el más cercano a las tasas presentadas en los resultados de esta investigación.

En esta investigación se logró optimizar un proceso metodológico de la toma de las fotografías aéreas gracias a la implementación de la aeronave cessna 206 "avioneta" que proporciona gran estabilidad y mínima vibración durante el vuelo y a nuevas tecnologías como la cámara fotográfica de última generación, la implementación de una Laptop y el software Cámara Control Pro 2 que ayudaron a tener un mejor control de la calidad de las fotografías.

Las principales causas del cambio de uso de suelo y vegetación en los trópicos son la expansión de infraestructura turística y la infraestructura de transporte (Montero, 2012). La serie de fotografías aéreas del 2014 nos permitió identificar un gran incremento en la infraestructura turística, zonas urbanas y construcción de tramos carreteros que atraviesan grandes extensiones de vegetación, ocasionando la interrupción del flujo del agua, lo que conlleva a la degradación de los ecosistemas, siendo estos los principales indicadores de destrucción y degradación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya, cumpliendo con los objetivos establecidos en esta investigación.

Por lo tanto se sugiere una regulación y buena planeación en este tipo de construcciones como por ejemplo; tramos carreteros asentados sobre pilares de concreto y no sobre rellenos hechos con materiales de construcción que interrumpen el flujo de agua.

En el Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Solidaridad, Quintana Roo del año 2009, se crearon 19 unidades de gestión ambiental (UGA) en el municipio, de las cuales 4 de ellas se encuentran dentro del área de estudio de esta investigación (Figura 15) denominadas (UGA #10, zona urbana Playa del Carmen), (UGA #15, corredor turístico Paamul-Yalku), (UGA #16, corredor turístico Punta Venado-Paamul) y (UGA #17, corredor turístico Punta Brava-Xcalacoco).

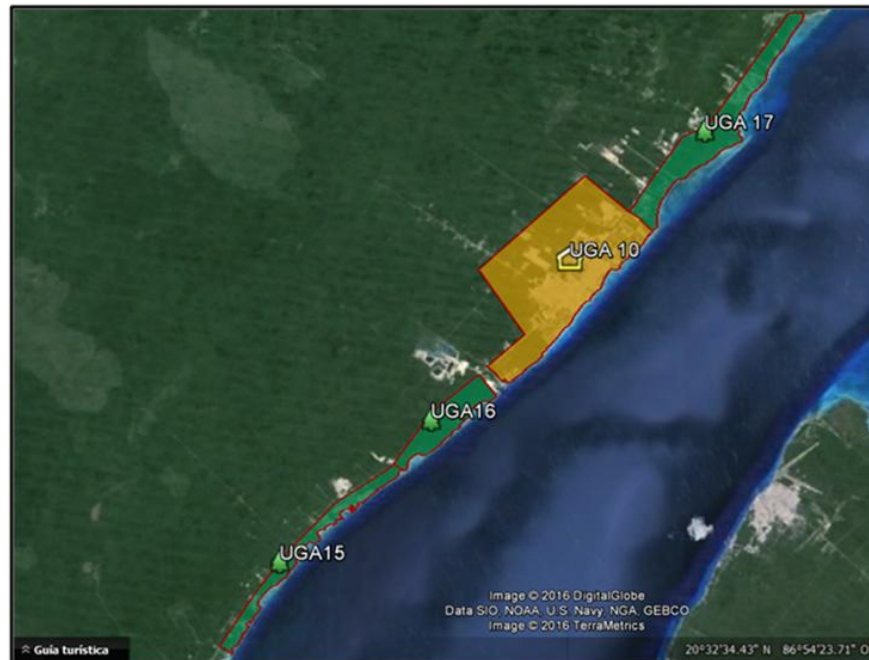


Figura 15. Unidades de gestión ambiental de la localidad de solidaridad.

La Unidad de Gestión Ambiental #10 de la zona urbana Playa del Carmen se encuentra establecida bajo la política ambiental de “Aprovechamiento Urbano”, es decir, es la ocupación del territorio al interior de los centros de población y van de acuerdo con los parámetros de ocupación y usos del suelo establecidos en los planes o programas de desarrollo urbano vigentes.

Como escenario inicial de la UGA #10, la ciudad de Playa del Carmen es el centro urbano con mayor crecimiento del estado, esta afirmación va acorde con las 1,165.76 ha que se identificaron en forma de ganancia de la zona urbana en la sección norte en los 26 años que conforman el período de tiempo analizado en esta investigación, cabe destacar que las zonas urbanas consideradas en la sección norte casi en su totalidad corresponden a Playa del Carmen.

Según los criterios de regulación ecológica de carácter específico del uso del suelo “urbano” CE-103, 104, 105 Y 106 de la UGA #10, se menciona que en los ecosistemas de dunas costeras se deben de seguir ciertos lineamientos con la finalidad de promover la protección de las playas.

Sin embargo en el mosaico de las fotografías aéreas del 2014 se puede observar que estas medidas no se han respetado; actualmente se encuentra infraestructura turística y urbana establecida sobre lo que alguna vez fueron manglares y vegetación de dunas costeras así como directamente en la playa, de tal forma que el oleaje del mar actualmente tiene contacto directo con los muros de esas construcciones (Figura 16), a partir de ello se difiere cuando el lineamiento y las estrategias ambientales de esta UGA dicen que la ciudad de Playa del Carmen presenta un crecimiento ordenado, respetan la zona federal marítimo terrestre y que mantienen la cobertura de manglares.

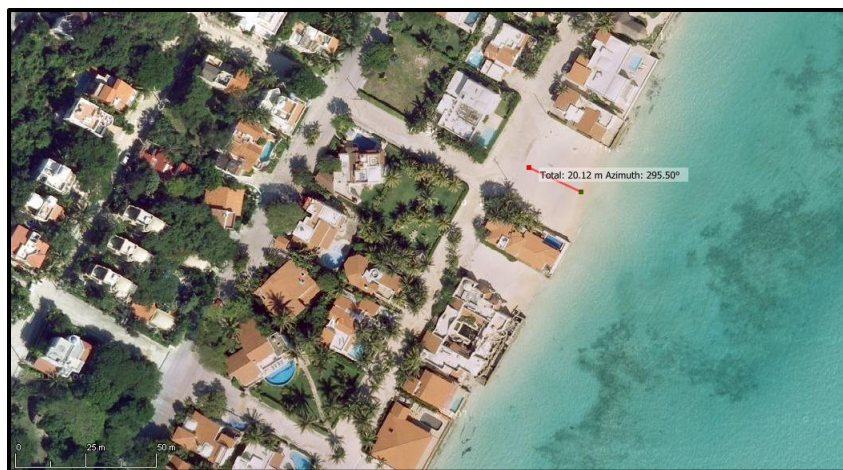


Figura 16. Casos de incumplimientos de las normas que rige la zona federal marítima terrestre. Fotografía aérea digital del año 2014.

Las unidades de gestión ambiental #15, 16 y 17, se encuentran establecidas bajo la política ambiental de “conservación” lo que indica que la permanencia de los elementos de la naturaleza, se lograra mediante la planeación del desarrollo sustentable, a fin de asegurar, para las generaciones presentes y futuras un ambiente propicio para su desarrollo y que los recursos naturales les permitan satisfacer sus necesidades.

Según el programa de ordenamiento del año 2009 las UGAs # 15 y 16 tenían como escenario inicial, un estado natural intacto sin desarrollo turístico y con muy reducidas superficies afectadas, con tendencias hacia desarrollos de baja intensidad.

Respecto a la UGA #15, los datos anteriores no corresponden con lo reportado en los mapas de uso de suelo, el desarrollo residencial-turístico de Puerto Aventuras ya se encontraba constituido desde el año 2000, tiene grandes canales internos artificiales “marinas” que ingresan agua de mar donde anteriormente era suelo firme cubierto por selvas y manglares, también tiene campos de golf y numerosos tramos carreteros, trazados desde la carretera Tulum-Cancún en dirección y hasta la playa (Figura 17).



Figura 17. Canales internos artificiales “Marinas”. Localidad de Puerto Aventuras. Foto obtenida del programa Google Earth, fecha de adquisición 2006.

En común acuerdo a lo mencionado en el escenario inicial de la UGA #16, con los mapas de uso del suelo sección norte 2000 y 2014 esta UGA es un área que ha contado con las características mencionadas en este apartado, desde el día en que entró en vigor esta unidad hasta la actualidad. Cabe mencionar que en el mapa de la sección norte del año 1998 se detectó un fuerte proceso de deforestación de selvas, que gradualmente se ha venido recuperando gracias a que el proyecto no se llevó a cabo y no se ha identificado indicios de que se quiera retomar.

El escenario inicial de la UGA #17, menciona que es un área que presenta amplias áreas de manglares ubicados entre la playa y las selvas, lo que condiciona al desarrollo turístico y que en la actualidad la vegetación se encuentra fragmentada y en ese entonces recientemente afectada por el huracán Wilma y Emily.

El análisis muestra que cada consorcio hotelero está comunicado por tramos carreteros que atraviesan aproximadamente 1.5 km de selvas, desde la carretera Tulum-Cancún en dirección a la playa, establecidos directamente sobre los manglares, como consecuencia de ello es posible encontrar una fuerte degradación de manglar de 59.5 ha localizados en Xcalacoco (Figura 18) y el inicio de la misma problemática en San Miguelito a un costado del hotel Hacienda Tres Ríos (Figura 19).



Figura 18. Degradación de manglar. Comunidad de Xcalacoco. Fotografías aéreas digitales del año 2014.



Figura 19. Degradación de manglar. Comunidad de San Miguelito. Fotografías aéreas digitales del año 2014.

Además existe fragmentación de manglar para delimitación de predios, los propietarios de estos terrenos realizan cortes lineales de esta vegetación de aproximadamente 2 m de ancho en diferentes direcciones, este suceso fue localizado en Punta Brava detrás del hotel Grand Velas Riviera Maya (Figura 20).



Figura 20. Fragmentación de manglares por delimitación de predios en la Riviera Maya. Fotografía aérea digital del año 2014.

Cabe mencionar que entre San Miguelito y Punta Maroma se encuentra las superficies de manglares más extensa de la Riviera Maya, en el año 2000 comprendía 627.23 ha de manglares, en este mismo lugar mediante las fotografías aéreas se identificó y cuantificó 20.33 ha de manglares deforestados claramente destinados para desarrollos hoteleros (Figura 21).



Figura 21. Deforestación de manglar para futuros proyectos hoteleros.

X. CONCLUSIONES

El comportamiento de la sección norte en comparación con la sur, ha tenido un crecimiento más acelerado en cuestión del desarrollo urbano y turístico, debido a ciudades como Cancún y Playa del Carmen que funcionan como polo de atracción de actividades antrópicas turísticas, las cuales causan gran influencia a zonas cercanas a esos polos y a medida que la distancia es mayor las actividades se siguen desarrollando pero a menor escala, por eso en la sección sur el desarrollo del turismo ha venido creciendo moderadamente.

En el transcurso de los últimos 26 años en la Riviera Maya se cuantificaron procesos de cambios derivados del incremento del desarrollo de infraestructura turística, a pesar de que cada una de las localidades cuentan con ordenamientos ecológicos territoriales; no se ha tenido un buen manejo y cuidado, lo que está provocando la destrucción y disminución principalmente humedales, manglares y selvas.

En el año de 1988 entre las localidades de playa del Carmen y Puerto Aventuras se identificaron grandes zonas de selvas deforestadas, destinadas a futuros proyectos de infraestructura turística, que en la actualidad todavía no se han llevado a cabo y que al final de cuentas sufrieron una perturbación grave.

Se ha detectado en los tres años de análisis grandes extensiones de playa que son destinadas al capital privado y al turismo internacional; lo cual provoca la disminución de espacios recreativos y de esparcimiento para los habitantes de la zona.

De seguir con la misma tendencia de transformación y todas las problemáticas que conlleva al deterioro como la deforestación, el relleno, la fragmentación, el crecimiento urbano, turístico y la contaminación de los ecosistemas costeros, aseguran altas probabilidades de aumentar la destrucción de los manglares, por ser ecosistemas altamente sensibles a los cambios hidrológicos y su perturbación.

Las selvas al ser ecosistemas con suelos más estables o firmes, pierden más superficies dirigidas a zonas urbanas o infraestructura turística que cualquier otro ecosistema, debido a ahorro de tiempo y dinero que se emplea en el relleno de suelos inundables como los de manglares y humedales.

Esta metodología servirá como una alternativa para facilitar la obtención y manejo de la información geográfica. Su potencial radica en que el costo puede considerarse accesible, la inversión de las herramientas y equipo de trabajo utilizado es relativamente bajo en comparación con los métodos convencionales, tiene la posibilidad de tomar las fotografías por debajo de la capa de nubes. Es de rápida implementación en el caso de desastres naturales, además se puede disponer con mucha rapidez de los resultados y se tiene independencia de fuentes externas.

Esta investigación es confiable, de vanguardia e innovadora puesto que generó un mosaico de fotografías aéreas digitales de alta resolución, la cual es una tecnología que puede aplicarse en la evaluación de impactos en diferentes tipos de ecosistemas y cualquier región del mundo y que no se ha implementado antes en ninguna tesis de licenciatura.

Con el análisis realizado y al mosaico de fotografías aéreas tomadas se identificaron procesos de relleno de manglares que se denominó “relleno hormiga” el cual está determinado por pequeñas fracciones de manglar deforestado y rellenado, con la finalidad de pasar desapercibidos y con el tiempo la perturbación degrade al manglar hasta eliminarlo.

Esta actividad permite justificar los permisos de grandes proyectos de infraestructura turística. Ejemplo de ello es en la localidad de Puerto Morelos, cuyo proceso de relleno de manglares principalmente se viene realizando desde hace 6 años (Figura 22).

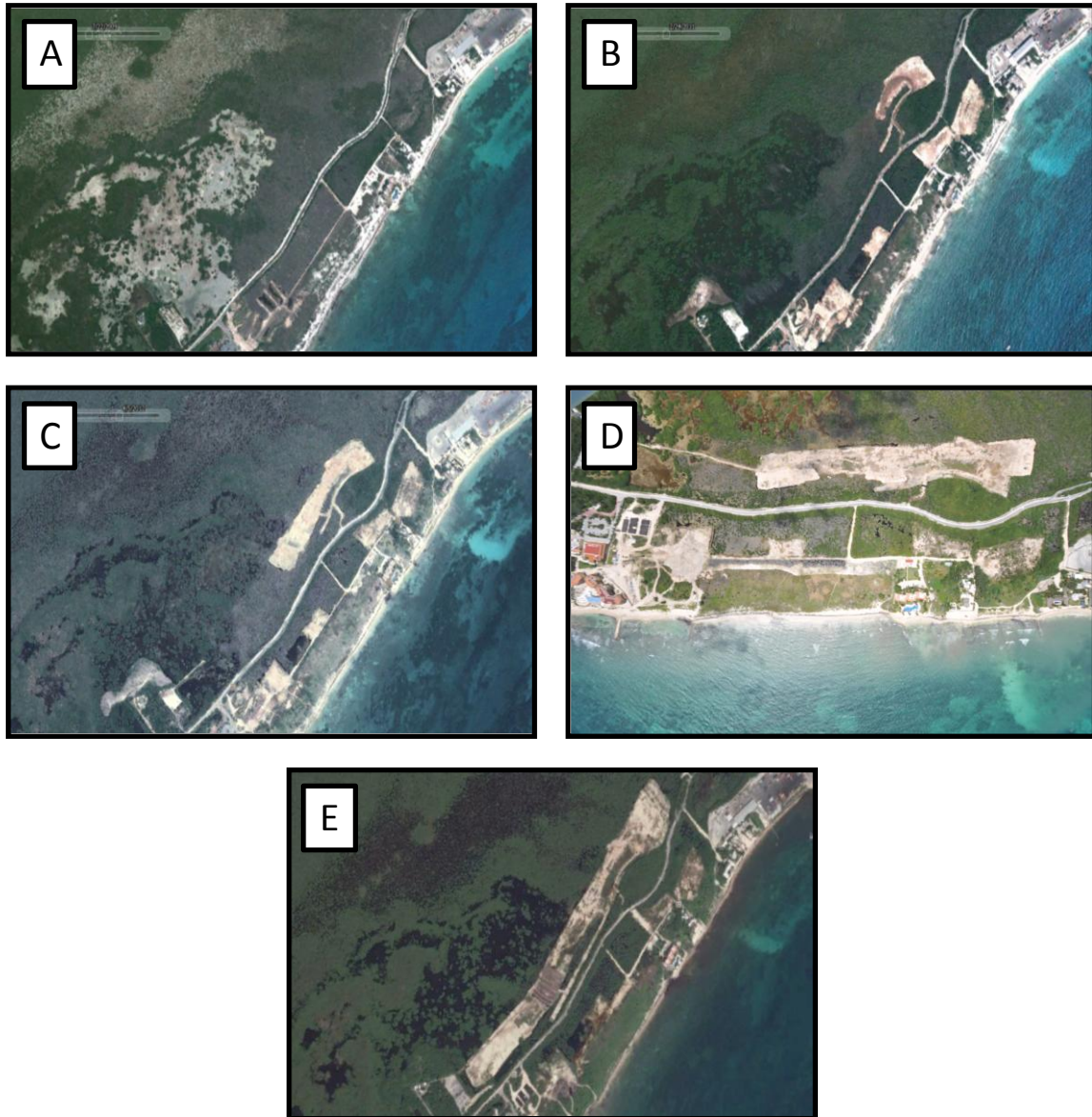


Figura 22. Muestra el proceso de rellanamiento tipo hormiga de ecosistemas costeros de la Riviera Maya (“A” año 2009, “B” año 2011, “C” año 2012, “D” año 2014 y “E” año 2015).

Los planes de desarrollo turístico que se desarrollan actualmente en la Riviera Maya han limitado su cumplimiento con los planes de ordenamiento ecológico que existen, por lo que es necesario encausarlos al desarrollo sustentable. De modo que propicien alternativas de turismo compatible con el medio ambiente, acordes con la gran diversidad y fragilidad de tal manera que se trabaje en conjunto con los ecosistemas de la zona.

Un ejemplo de esto es lo que aconteció en Tajamar Cancún, donde 60 ha de manglar fueron devastadas por grandes consorcios para la implementación de infraestructura turística que a pesar de los ordenamientos y programas de protección se hace caso omiso de estos ya que intervienen fuertes entradas de dinero y corrupción por parte de las autoridades.

Por lo que esta investigación aporta una gran variedad de resultados que pueden aplicarse de manera general en el manejo integral de la Riviera Maya; así como, también de manera municipal o inclusive sobre un área determinada; ya que se tiene información real y actualizada sobre el estado y comportamiento de los ecosistemas costeros de la zona. Así como también la tendencia de crecimiento de las actividades antropogénicas, tasas de deforestación y pérdidas anuales de superficie, con las cuales se puede estimar el comportamiento a futuro de los ecosistemas costeros.

Se sabe que el medio va cambiando con el paso del tiempo y es por ello que se recomienda una actualización de este programa, lo que implicaría un nuevo estudio y análisis sobre el medio, los usos del suelo y vegetación, caracterización de flora, fauna y las diferentes actividades antrópicas que se estén desarrollando en cinco años máximo. De acuerdo con lo anterior establecer los nuevos lineamientos y estrategias para la protección, conservación y desarrollo sustentable de los recursos naturales que proveen los ecosistemas costeros.

Los resultados de esta investigación podrán utilizarse como soporte científico para llevar a cabo un proceso de planeación que conduzca al buen uso y conservación de los ecosistemas costeros de la Riviera Maya:

Manifiesto de impacto ambiental, que son estudios que dan a conocer las consecuencias que generaría o generará una obra o actividad y la forma de evitarlo o atenuarlo.

Programas de prevención de riesgo, son documentos que contienen las acciones proyectadas de una obra o actividad, los riesgos que representan al equilibrio ecológico o al ambiente y en los asentamientos humanos y las medidas técnicas preventivas, correctivas o de seguridad para controlar los efectos adversos al equilibrio ecológico.

Ordenamientos ecológicos territoriales “locales” que son instrumentos de política ambiental que tienen como objetivo lograr la protección, preservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

Programas de desarrollos urbanos, que se encargan de evaluar y definir una adecuada ordenación territorial del sistema de ciudades y centros de población con tendencia a la conservación y mejoramiento del medio ambiente y la calidad de vida de la población.

En materia de catastro se puede generar información de estudios sociográficos, geodésicos del medio físico y los recursos naturales, así como de sus interacciones, su localización geográfica y su representación en los productos cartográficos obtenidos.

XI. RECOMENDACIONES

Antes de realizar el sobrevuelo se recomienda hacer una verificación del pronóstico del clima, para definir el día y hora de vuelo, las características deben ser soleado y con bajas o nulas probabilidades de nubes y lluvia, para obtener la mejor calidad en la toma de las fotografías.

En caso de no contar con una laptop con una autonomía de más de cuatro horas en funcionamiento, se recomienda utilizar el sistema de alimentación ininterrumpida (UPS), o bien el cable de disparo remoto multifuncional MC-36 de la marca NIKON, con el objetivo de prever que el equipo se descargue durante el vuelo. Recomendamos el uso del programa Cámara Control Pro 2, que permite la gestión de forma remota de la configuración de la cámara, brinda la oportunidad de obtener una vista previa de las imágenes recién tomadas y de almacenarlas.

Recomendamos el uso del software SASPLANET, que permite la visualización y descarga de imágenes de satélite georreferenciadas de alta resolución, de diversos servidores y su exportación en diferentes tipos de archivos compatibles con los Sistemas de Información Geográfica.

Es recomendable realizar un proceso de hibridación del método de interpretación visual y el método de clasificación supervisado, el proceso sugiere sobreponer la clasificación de la imagen más reciente sobre la antigua y solamente enfocarse a verificar por interpretación visual los polígonos que no correspondan según la resolución espectral de la clasificación, estos casos pertenecerán a aquellas áreas que han sufrido algún tipo de cambio en su composición en el lapso de tiempo transcurrido entre una y otra imagen.

Se recomienda el uso de la metodología implementada en este trabajo de investigación y sus derivados, como referencia para posteriores tomas de decisiones y asignación de áreas prioritarias en la Riviera Maya, ya que ofrece información actualizada y de calidad con respecto a los ecosistemas costeros y las actividades que se desarrollan dentro de la misma zona.

XII. REFERENCIAS

- Acosta-Velázquez, J., Díaz-Gallegos, J., Rodríguez-Zúñiga, T., Cerdeira-Estrada, S., Troche-Souza, C., Cruz, I., Ressler, R., Jiménez-Rosenberg, R. 2010. Aplicaciones de Percepción Remota en el Inventario y Monitoreo de Ecosistemas Costeros en México. XIV International. SELPER, Symposium. Guanajuato, México. ISBN 978-607-441-100-3
- Alvarado, P. 2003. Ficha informativa de los humedales de Ramsar. Playa tortuguera Xcacel-Xcacelito Ramsar. 13 p.
- Calderon Aguilera, L. y Reyes Bonilla, H. 2005. Arrecifes una interacción de bella complejidad. Ciencia y Desarrollo. 30: 7-11.
- Calderon Mandujano, R. y Cedeño Vazquez, J. 2011. Riqueza biológica de Quintana Roo. Un análisis para su consevación. Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F. 271 p.
- Carrillo Bastos, A., Elizalde Rendon, E., Toscano Valle, N. y Flores Ortiz, G. 2008. Adaptaciones ante disturbios naturales, manglar de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Foresta Veracruzana*. 10: 31- 38.
- Cedeño Vasquez, J. y Calderon Mandujano, R. 2011. Anfibios. En: Pozo, C. (editora). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F. 242-246 pp.
- CENAPRED. 2013. Centro Nacional De Prevención de Desastres: Ciclones Tropicales. México, DF.
<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-hidrometeorologicos/ciclones-tropicales-huracanes> (Consulta: 15 de Febrero 2014).
- Challenger, A. y Soberon, J. 2008. Los ecosistemas terrestres, en capital natural de México. En: CONABIO, Capital natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad. México. Vol.1: 87-108 pp.

- Chuvienco, E. 1985. Aportaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación de suelo. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. 5ª ed. 29-48.
- Chuvienco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial, 3ra. ed., Ediciones RIALP, Madrid, España. 568 p.
- CONABIO. 2009. Manglares de México: extensión y distribución (2º ed.). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. 99 p.
- CONANP. 2006. Los humedales prioritarios de México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. SEMARNAT.
- Conde, C. 2006. México y el cambio climático global. México: Dirección General de Divulgación de la Ciencia Universidad Nacional Autónoma de México. 22 p.
- Congalton, R. y Green, K. 1999. Assesing the accuracy of remotly sends data: Principles and practices. Florida, USA. Lewis Publisher.
- Contreras, F. 2007. Las lagunas costeras Mexicanas. Centro de ecodesarrollo, Secretaria de Pesca. Universidad de Virginia. 263 p.
- Correa Sandoval, J. y MacKinnon H., B. 2011. Aves. En: Pozo, C. (editora). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F. 252-266 pp.
- Day, J., Hall, C., Kemp, W. y Yañez-Arancibia, A. 1988. Estuarine Ecology. Jhon Wiley, New York. 43 p.
- Diario Oficial de la Federación. 2001. Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región denominada Corredor Cancún-Tulum. Chetumal, Quintana Roo. 44 p.
- Díaz-Gallegos, J. y Acosta-Velázquez, J. 2009. Tendencias en la transformación del uso de suelo y vegetación aledaña. En: Espinoza-Avalos, J., Islebe, G. y Hernandez-Arana, H. (eds). El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar Caribe. ECOSUR. 226-237 pp.

- Díaz-Gallegos, J., Acosta-Velázquez, J., Rodríguez-Zuñiga, M., Cruz, I., Vázquez-Lule, A., Troche, C., Jiménez, R. 2012. The mangroves forest of México: transformation, conservation on threats. En. Thangadurai, D., Busso, C., Abarca Arenas, L. y Jayabalan, S. *Frontiers in biodiversity studies*. New Delhi, India: I.K. Internationan publishing house Pvt. Ltd. 258-290 pp.
- Díaz-Gallegos, J., Francois Mas, J. y Velázquez Montes, A. 2008. Monitoreo de los patrones de deforestación en el corredor Biológico Mesoamericano, México. *Interciencia*. 33: 882-890.
- Díaz-Gallegos, J., Francois Mas, J. y Velázquez Montes, A. 2010. Patterns and trends of deforestation of tropical forest in Southeast México. Insituto de Geografía, Universidad Nacional Autonoma de México (UNAM), Unidad Foránea Morelia, Aquiles Serdán, Morelia, Michuacán. 31, 2, 180.
- Ek Díaz, A. 2011. Vegetación. En: Pozo, C. y Armijo Canto, N. (Eds.). *Riqueza Biológica de Quintana Roo, un análisis para su conservación*. Tomo 1. Colegio Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México D.F. 62-77 pp.
- Escobedo Cabrera, E. 2011. Mamíferos. En: Pozo, C. (editora). *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F. 267-271 pp.
- FAO. 1996. *Forest resources assessment 1990*. Forestry paper 130. FAO. Roma, Italia. 153 p.
- Flores-Verdugo, F., Gonzales-Farias, F. y Zaragoza-Araujo, U. 1998. Ecological parameters of the mangroves of semi-arid regions of México: importance for ecosystem managemen, En: Leith, H. y Al-Masoom, A. (eds). *Towards the rational use of high salinity tolerant plants*. *Kliwer Academic Publishers*. 1: 123-132.
- Geerder, P. y Cabrera Hernandez, J. 2006. La fotografía aérea digital a favor de la playa de Varadero. Varadero, Cuba. 5 p.

- GREENPEACE. 2010. México ante el Cambio Climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación. GREENPEACE (Eds). México. 68 p.
- Guido Aldama, P., Ramírez Camperos, A., Godínez Orta, L., Cruz León, S. y Juárez León, A. 2009. Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México. Medellín-Colombia. *Avances en recursos hidráulicos*. 20: 51-56.
- Guillermo García, L. y Romero Gutiérrez, Y. 2005. Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio Benito Juárez, Quintana Roo. Benito Juárez Quintana Roo. 90 p.
- Herrera Sansores, J. 2011. Clima. En: Pozo, C. y Armijo Canto, N. (Eds.). Riqueza Biológica de Quintana Roo, un análisis para su conservación. Tomo 1. Colegio Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones. México D.F. 50-56 pp.
- Herrera Sansores, J. y Heredia Escobedo, J. 2011. Recursos Hídricos, hidrología superficial. En: Pozo, C. y Armijo Canto, N. (Eds.). Riqueza Biológica de Quintana Roo, un análisis para su conservación. Tomo 1. Colegio Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México D.F. 42-49 pp.
- Herrera Silveira, J., Morales Ojeda, S. 2010. Lagunas Costeras. En: Durán García, R. y Méndez González, M (Eds.). Biodiversidad de Desarrollo Humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Mérida, Yucatán. 24-26 pp.
- Hilares-Cota, M., Espinoza-Avalos, J., Schmook, B., Ruiz-Luna, A. y Ramos-Reyes, R. 2010. Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas*. 36 (2): 147-159.
- Houghton, R. 1994. The Worldwide extends of land-use change. *Bioscience*. 44: 305-306.
- INE., SEMARNAP. 2000. Medio ambiente y turismo, logros y retos para el desarrollo sustentable, 1995-2000. 1ª ed. Instituto nacional de ecología, SEMARNAP. México, D.F. 53 p.

- INECC. 2007. Instituto nacional de ecología y cambio climático: Recursos Marinos y Ecosistemas Costeros.
http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/100/cap3_2.html. (Consulta: 15 de febrero 2014).
- INP., SAGARPA. 2006. Sustentabilidad y pesca responsable en México, evaluación y manejo. México, D.F. 544 p.
- IPCC. 2007. Cambio climático. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, Suiza. 104 p.
- Laboratorio Unidad Pacífico Sur CIESAS. 2009. Sistemas de Información Geográfica. <https://langleruben.wordpress.com/about/> (Consulta: 20 de febrero del 2014).
- Lara-Lara, J. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En: CONABIO, Capital natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad. México. Vol. 1: 109-134 pp.
- Mas, J., Díaz-Gallegos, J. y Pérez Vega, A. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. Morelia, Michoacán. Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía UNAM*. 51: 53-72.
- Masera, O. 2002. Bosques y cambio climático en América Latina. Análisis y perspectivas. En: Leff, E., Ezcurra, E., Pizanty, I., Romero, P. (Comps.). La transición hacia el desarrollo sustentable. Perspectiva de América Latina y Caribe. Instituto Nacional de Ecología. México. 211-235 pp.
- Miranda Ramiraz, L. 2008. Análisis espacio-temporal del manglar en el corredor turístico Cancún-Tulum, Quintana Roo, utilizando imágenes de satélite. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. 169 p.
- Molina, C., Rubinoff, P. y Carranza, J. 1998. Normas prácticas para el desarrollo turístico: De la zona costera de Quintana Roo, México. 1ª ed. Amigos de Sian Ka'an. 93 p.
- Montero, J. 2012. Análisis espacial de la deforestación en Quintana Roo, una aproximación a las causas. Universidad de Granada y Universidad Veracruzana. España. 134 p.

- Osborne, P. 2000. Tropical ecosystems and ecological concepts. International center for tropical ecology, university of Missouri-St. Louis. Cambridge university press. 17 p.
- PDDUT. 2007. Actualización del Programa Director de Desarrollo Urbano del Centro de Población Tulum. 2006-2030. Solidaridad, Quintana Roo. 259 p.
- Petit, C., Scudder, T. y Lambin, E. 2001. Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in southeastern Zambia. *International Journal of Remote Sensing*. 22: 3435-3456.
- Pozo, C., Armijo Canto, N. y Calmé, S. (editoras). 2011. Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F. 334 p.
- Prieto Gonzalez, R., Perez Lopez, J. y Sanchez Sesma, J. 2006. Análisis de posibles impactos del cambio climático. Estudio de caso preliminar: Cancún, Quintana Roo. México. 23 p.
- PROARCA. 2004. Conociendo la Naturaleza: Ecosistemas Costeros-Marinos. Manual básico para el guardarecurso Centroamericano. 3a ed. INFOTERRA. 63 p.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. 1997. Mensura Forestal. Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible. San José, Costa Rica. 572 p.
- Rodriguez Chavez, O. y Arredondo Bautista, H. 2005. Manual para el manejo y procesamiento de imagenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicados al estudio de ingenieria civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogota. 230 p.
- Rodríguez-Zúñiga, M., Troche-Souza, C., Vázquez-Lule, A., Márquez-Mendoza, J., Vázquez-Balderas, B., Valderrama-Landeros, L., Velázquez-Salazar, S., Cruz-López, M., Ressler, R., Uribe-Martínez, A., Cerdeira-Estrada, S., Acosta Velázquez, J., Díaz-Gallegos, J., Jiménez-Rosenberg, R., FueyoMac Donald, L. y Galindo-Leal, C. 2013. Manglares de México/Extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. 128 p.

- Rojas García, J. y Vidal Rodríguez, R. 2008. Catálogo tipológico de los humedales lacustres y costeros del estado de Chiapas . México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. 304 p.
- SEMARNAT. 2009. Cambio Climático. Ciencia, evidencia y acciones. México. 93 p.
- SEMARNAT-CONANP. 2005. Estudio previo justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida: Parque Nacional Manglares de Nichupté, Quintana Roo. México, D.F. 147 p.
- Ugalde, J. 2012. Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el municipio de Guelatao de Juárez, Oaxaca, México. Tesis de licenciatura. Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. 61 p.
- Wilkinson, T., Wiken, E., Bezaury Creel, J., Hourigan, T., Agardy, H., Herrmann, L., Janishevski, C., Madden, L., Morgan. y Padilla, M. 2009. Ecorregiones marinas de América del Norte, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal. 200 p.

XIII. ANEXOS

13.1 Colección de fotografías aéreas que muestran los tipos de impactos encontrados en los ecosistemas costeros de la Riviera Maya.

Fotografías aéreas digitales verticales y panorámicas de la Riviera Maya, Quintana Roo, tomadas en abril del 2014, donde se identifican los diferentes impactos antropogénicos sobre los ecosistemas costeros.

- ❖ Deforestación de manglares y selvas.



Foto A. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #1674 coordenadas latitud: 20°43' 1.28", longitud 86°59' 25.04"



Foto B. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #3970.



Foto C. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #3842.



Foto D. Gómez Urieta Luis Andrés/ Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea panorámica #3719.

❖ Ejemplos de relleno posterior a la deforestación



Foto E. CONABIO-SEMAR/José Díaz (2008) fotografía aérea vertical.



Foto F. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #1617 coordenadas latitud: 20°50'18.77, longitud: 86°53'4.08"



Foto G. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #4132.



Foto H. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #3945.



Foto I. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #1933 coordenadas latitud: 20°48'37.77", longitud: 86°55'8.71"

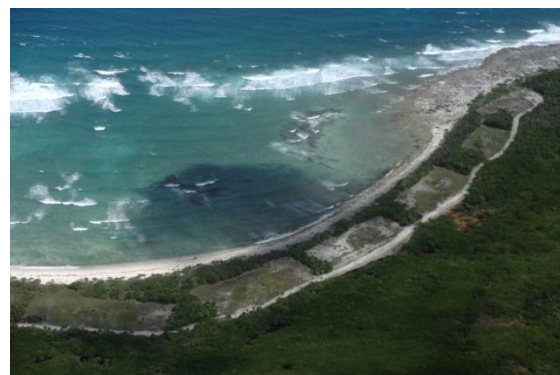


Foto J. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea panorámica #3776

❖ Ampliación del desarrollo turístico y urbano



Foto K. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea panorámica #3665



Foto L. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #1774

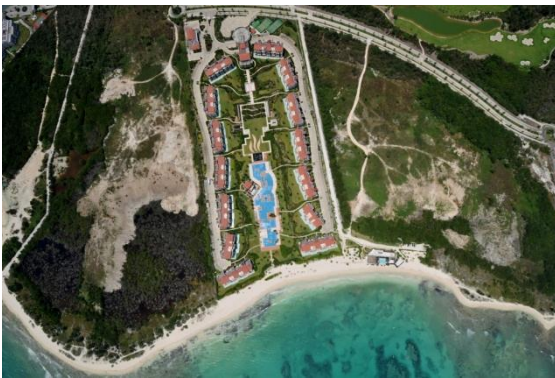


Foto M. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #1706 coordenadas latitud: 20°39'8.80", longitud: 87°2'46.74"



Foto N. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #1959 coordenadas latitud: 20°45'30.26", longitud: 86°57'52.14"



Foto Ñ. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #3802



Foto O. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #3820

❖ Degradación de manglares.



Foto P. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #3861



Foto Q. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #3863



Foto R. CONABIO-SEMAR/José Díaz (2008) fotografía aérea vertical.



Foto S. CONABIO-SEMAR/José Díaz (2008) fotografía aérea vertical.



Foto T. Aragón Chanona Eduardo Gabino/Gómez Urieta Luis Andrés (2014) fotografía aérea panorámica #4087

❖ Fragmentación de los ecosistemas.



Foto U. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #2006 coordenadas latitud: 20°39'54.48", longitud: 87°2'43.72"



Foto V. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea panorámica #3739



Foto W. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #2104 coordenadas latitud: 20°41'24.11", longitud: 87°1'43.12"



Foto X. Gómez Urieta Luis Andrés/Aragón Chanona Eduardo Gabino (2014) fotografía aérea vertical #2283 coordenadas latitud: 21°3'30.97", longitud: 86°53'13.45"