



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

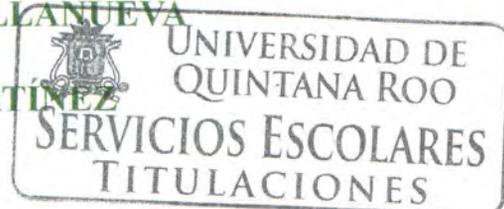
**“ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS SUELOS DE
QUINTANA ROO CON UN ENFOQUE
GEOMORFOEDAFOLÓGICO”**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA
PATRICIA FRAGOSO SERVÓN

DIRECTOR
DR. FRANCISCO BAUTISTA ZÚÑIGA
Co-DIRECTOR
DR. OSCAR FRAUSTO MARTÍNEZ

ASESORES
DR. DAVID VELÁZQUEZ TORRES
DR. MANUEL E. MENDOZA CANTÚ
DRA. LOURDES CASTILLO VILLANUEVA
DR. DAVID J. PALMA LÓPEZ
DR. ADRIÁN CERVANTES MARTÍNEZ





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISION DE CIENCIAS E INGENIERIA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISION DEL COMITÉ
DEL PROGRAMA DE DOCTORADO Y APROBADA COMO
REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN GEOGRAFÍA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:


DR. FRANCISCO BAUTISTA ZÚÑIGA

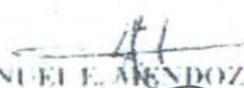
Co-DIRECTOR:


DR. OSCAR FRANCO MARTINEZ

ASESOR:


DR. DAVID PLAZQUEZ TORRES

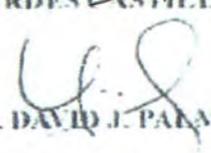
ASESOR:


DR. MANUEL E. ARÉNDIZA CANTÚ

ASESOR:


DRA. LOURDES CASTILLO VILLANUEVA

ASESOR:


DR. DAVID J. PALMA LÓPEZ

ASESOR:


DR. ADRIAN CERVANTES MARTINEZ

CHETUMAL, QUINTANA ROO, MEXICO, FEBRERO DE 2015.



Dedicatoria

Para Alberto, Alejandro y Bárbara

Agradecimientos

Quisiera dar un especial agradecimiento al Dr. Francisco Bautista Zúñiga y al Dr. Oscar Frausto Martínez por su gran apoyo y dirección en la realización de esta investigación.

Al Dr. David Velázquez Torres coordinador del Doctorado en Geografía y tutor por su guía y consejos durante mis estudios.

Al Dr. José Hernández Rodríguez director de la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad por su gran apoyo para asistir a las estancias de investigación así como a los diversos congresos en los cuales presenté avances de los resultados obtenidos en este trabajo.

Al proyecto “Elaboración del programa estatal de acción ante el cambio climático” por la facilidades dadas para el uso de la información cartográfica del estado de Quintana Roo y el apoyo para las salidas de campo. Al proyecto “Diseño del mapa geopedológico de México a escala 1:500000 con ventanas 1:250000 en zonas volcánicas y de karst tropical” así como al M.C. Gonzalo Zapata Buenfil del INIFAP por las facilidades dadas para el uso de la información edafológica.

A la Dra. Yameli Aguilar Duarte por su guía en la primera parte de la investigación; al Dr. Manuel Mendoza Cantú, Dr. David Palma López, Dra. Lourdes Castillo Villanueva y Dr. Adrián Cervantes Martínez por sus observaciones y consejos.

A mi familia por su apoyo incondicional durante estos años.

Contenido

Índice de Figuras.....	iii
Índice de Cuadros.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	4
METODOLOGÍA GENERAL.....	5
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LOS SUELOS EN ZONAS DE KARST . 7	
1.1 EL ENFOQUE GEOMORFOEDAFOLÓGICO.....	7
1.2 EL KARST EN MÉXICO.....	11
1.2.1 <i>Contexto Nacional</i>	13
1.2.2 <i>La Península de Yucatán</i>	13
1.2.3 <i>El estado de Quintana Roo</i>	15
1.3 REFLEXIONES FINALES DEL CAPÍTULO I.....	16
1.4 REFERENCIAS DEL CAPÍTULO I.....	17
CAPÍTULO II. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
2.1 QUINTANA ROO.....	20
2.2 CLIMA.....	23
2.3 GEOLOGÍA.....	24
2.3.1 <i>Formaciones Geológicas</i>	26
2.3.2 <i>Fallas y fracturas</i>	30
2.3.3 <i>Litología superficial</i>	32
2.4 HIDROLOGÍA.....	32
2.5 SUELOS.....	35
2.6 CUBIERTAS VEGETALES.....	39
2.7 USO AGRÍCOLA DEL SUELO.....	44
2.8 REFLEXIONES FINALES DEL CAPÍTULO.....	46
2.9 REFERENCIAS DEL CAPÍTULO II.....	47
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LAS DEPRESIONES KÁRSTICAS (FORMA, TAMAÑO Y DENSIDAD) A ESCALA 1:50,000 Y SUS TIPOS DE INUNDACIÓN EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO.....	49
3.1 INTRODUCCIÓN.....	49
3.2 ÁREA DE ESTUDIO.....	51
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
3.4 RESULTADOS.....	54
3.4.1 <i>Mapa altimétrico</i>	54
3.4.2 <i>Clasificación de depresiones kársticas y su régimen de inundación</i>	55
3.4.3 <i>Densidad de las depresiones kársticas</i>	60
3.5 DISCUSIÓN.....	60
3.6 REFLEXIONES FINALES DEL CAPÍTULO.....	65
3.7 REFERENCIAS DEL CAPÍTULO III.....	66

CAPÍTULO IV. RELACIÓN ENTRE LA GEODIVERSIDAD DE QUINTANA ROO Y SU BIODIVERSIDAD	69
4.1 INTRODUCCIÓN	69
4.2 ZONA DE ESTUDIO	70
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	71
4.4 ANÁLISIS DE GEODIVERSIDAD.....	74
4.5 DIVERSIDAD BIOLÓGICA	80
4.6 PERFILES TOPOGRÁFICOS	80
4.7 GEODIVERSIDAD	86
4.8 DISCUSIÓN.....	88
4.9 REFLEXIONES FINALES DEL CAPÍTULO V.....	93
4.10 REFERENCIAS DEL CAPÍTULO V	94
CAPÍTULO V. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y DESARROLLO DE SUELOS EN ZONAS DE KARST TROPICAL.....	97
5.1 INTRODUCCIÓN	97
5.2 METODOLOGÍA	99
5.3 RESULTADOS.....	103
5.3.1 <i>Modelo espacial de suelos</i>	103
5.3.2 <i>Ambientes Geomorfoedafológicos (AGE)</i>	111
5.4 DISCUSIÓN.....	119
5.5 REFLEXIONES FINALES DEL CAPÍTULO V.....	121
5.6 REFERENCIAS DEL CAPÍTULO V	122
Discusión General	125
Conclusiones Generales	132
APÉNDICE	135
GEODIVERSITY OF A TROPICAL KARST ZONE IN SOUTHEAST MEXICO	135
INTRODUCTION	135
STUDY AREA	136
MATERIALS AND METHODS.....	136
GEOLOGICAL DIVERSITY.....	137
PEDOLOGICAL DIVERSITY	138
DIVERSITY OF RELATIVE HEIGHTS.....	138
DIVERSITY OF THE SURFACE HYDROLOGY	138
GEODIVERSITY	138
DISCUSSION	141
CONCLUSIONS	142
REFERENCES	143
Bibliografía.....	145

Índice de Figuras

1. Diagrama metodológico	6
1.1 Aportes de la Geomorfología a la Edafología	9
1.2 Regiones kársticas del Mundo	12
2.1 Quintana Roo y sus municipios	21
2.2 Dos imágenes de las costas de Quintana Roo Tulum y Xcacel, respectivamente	22
2.3 Climograma de Quintana Roo	23
2.4 Subtipos de clima en el estado de Quintana Roo	25
2.5 Formaciones geológicas en el estado de Quintana Roo	29
2.6 Fallas y densidad de fallas en el estado de Quintana Roo	31
2.7 Material sedimentario del cuaternario en el estado de Quintana Roo	33
2.8 Dirección de flujo a nivel regional en la Península de Yucatán	34
2.9 Hidrología. Cuerpos de agua del estado de Quintana Roo	36
2.10 Distribución de Suelos en el estado de Quintana Roo	38
2.11 Tipos de vegetación en el estado de Quintana Roo	41
2.12 Áreas naturales protegidas en el estado de Quintana Roo	43
2.13 Porcentaje de superficie cultivada por Municipio en el estado de Quintana Roo	44
2.14 Principales cultivos en el estado de Quintana Roo	45
3.1 Pisos altimétricos y curvas de nivel obtenidos para el Estado de Quintana Roo.	56
3.2 Número y área (km ²) ocupada por formas exokársticas negativas	57
3.3 Distribución de depresiones kársticas por régimen de inundación	57
3.4 Distribución de depresiones kársticas en el Estado de Quintana Roo	59
3.5 Densidad de formas exokársticas en el Estado de Quintana Roo	61
3.6 Distribución de dolinas y úvalas de acuerdo a su coeficiente de Gravelius	62
3.7 Polje utilizado con fines recreativos	64
3.8 Forma exokárstica usada para agricultura	65
4.1 Diversidad Geológica	75
4.2 Diversidad Edafológica	77
4.3 Diversidad Altimétrica o enegía del relieve	78
4.4 Diversidad Hidrológica	79
4.5 Diversidad de cobertura vegetal	81
4.6 Perfil topográfico y de unidades de geodiversidad A-B	82
4.7 Perfil topográfico y de unidades de geodiversidad C-D	83
4.8 Perfil topográfico y de unidades de geodiversidad A-E	85
4.9 Geodiversidad y Áreas Naturales Protegidas de Quintana Roo	87
5.1 Dendrograma que muestra el patrón de agrupamiento de polígonos en función de sus atributos	105
5.2 Pruebas de validación Pseudo F, Pseudo T y de Distorsión de Dunn del análisis de agrupamiento	106

5.3	Gráfica que muestra el peso relativo de las variables en la matriz de varianza del ACP	106
5.4	Grupos de suelo asociados en Quintana Roo	110
5.5	Paisaje típico del AGE Litoral	111
5.6	Paisaje del AGE Palustre	114
5.7	Paisaje del AGE Pseudo-palustre	115
6.8	Paisaje del GE Tectokárstico	116
5.9	Paisaje del AGE Kárstico	116
5.10	Paisaje del AGE Karst de yeso	117
	Mapa de ambientes geomorfoedafológicos de Quintana Roo	113

Índice de Cuadros

1.1 Sistema de clasificación taxonómica de geoformas	10
2.1 Número de habitantes por Municipio	22
2.2 Estratigrafía de Quintana Roo	28
2.3 Grupos de suelo	37
2.4 Principales cultivos, superficie y rendimiento en el estado de Quintana Roo	45
2.5 Volumen (m ³) y valor (miles de pesos) de la producción forestal maderable en tres Municipios (2010).	46
3.1 Clasificación de depresiones kársticas (DK) y régimen de inundación	55
4.1 Categorizaciones de la diversidad de los atributos del territorio (diversidades temáticas)	73
5.1 Suelos identificados en Quintana Roo	100
5.2 Variables y sus dominios identificados en la base de datos del análisis geomorfométrico de Quintana Roo	101
5.3 Resultados del análisis de componentes principales	107
5.4 Resultados del análisis de confusión para la clasificación de los polígonos usando todas las variables	108
5.5 Grupos principales de suelos del estado de Quintana Roo	109
5.6 Grupos de suelos asociados a los principales	109
5.7 Ambientes geomorfoedafológicos en Quintana Roo	112
5.8 Superficie ocupada por los diferentes ambientes geomorfoedafológicos	114

INTRODUCCIÓN

Conocer los recursos naturales con los que cuenta una región permite aprovecharlos y conservarlos de manera apropiada, un inventario de suelos que proporcione información confiable y de fácil acceso puede suministrar una valiosa información para la planeación y del uso de las tierras, sus cambios en el tiempo y la evaluación de riesgos ambientales.

El suelo es un recurso natural tridimensional y dinámico producto de cinco factores formadores: relieve, roca madre, clima, vegetación y tiempo. Las funciones de los suelos son muy variadas. Proporcionan soporte y nutrientes a la vegetación, son un filtro natural que influye en la cantidad, calidad, retención y pérdida de agua, es el lugar donde el hombre construye sus viviendas y obtiene alimento, constituye el hábitat de una gran cantidad de organismos, en el suelo se realizan una gran cantidad de ciclos biogeoquímicos necesarios para el reciclaje de los compuestos orgánicos, se estima que el contenido de carbón almacenado en el primer metro del suelo es 1.5 veces mayor a aquél acumulado en la biomasa, constituyendo la tercera fuente más importante de carbón, este "secuestro" de carbón por el suelo, reduce su liberación a la atmósfera como CO₂, uno de los principales gases con efecto invernadero responsables del cambio climático (Cram *et al.*, 2008); además, los suelos son parte de la herencia cultural que contiene tesoros arqueológicos y paleontológicos en Quintana Roo.

El Estado de Quintana Roo se encuentra localizado en una región kárstica con relieve de baja energía en donde el clima y la vegetación han desarrollado diversos tipos de suelos. El uso de las imágenes satelitales, fotografías aéreas y otros productos derivados de técnicas de la percepción remota han facilitado el estudio de la vegetación, los cuerpos superficiales de agua, crecimiento de ciudades. Sin embargo, estas técnicas no son igualmente útiles para caracterizar a los suelos, ya que no están expuestos, por lo que es necesario realizar mucho trabajo de campo para describir los suelos en un área determinada (Siebe, en: Bautista y Palacio 2005).

La geopedología o geomorfoedafología es un enfoque metodológico para estudiar y cartografiar suelos que combina la contribución de la geomorfología y de la edafología (pedología), el prefijo geo se refiere a la superficie de la Tierra y tiene énfasis en la geomorfología como principal factor estructurante, además de nociones de geología y geografía, este enfoque considera al suelo como un cuerpo tridimensional en el paisaje, este enfoque combina los procedimientos de campo con la teledetección para la captura de datos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para su procesamiento (Zinck, 2005).

La presente investigación se inscribe en la línea de la Geografía Física en ella se realiza un estudio geomorfoedafológico del estado de Quintana Roo considerando los aspectos del relieve y de los suelos utilizando la clasificación internacional World Referencial Base of Soils (WRB) 2007 (IUSS, 2007).

Se ha organizado en cinco capítulos, el primero trata sobre el estado del arte en que se encuentran los estudios de suelos en las zonas kársticas. En el segundo capítulo se describen las características físico geográficas de la zona de estudio. El tercero

corresponde al análisis geomorfológico. En el cuarto se analiza la geodiversidad del área de estudio y se relaciona con la biodiversidad. Finalmente en el capítulo cinco se incorporan los datos edafológicos para elaborar el análisis geomorfoedafológico y obtener los diversos ambientes geomorfoedafológico de Quintana Roo.

Justificación

El estado de Quintana Roo es conocido a nivel mundial por la belleza de sus recursos naturales; en el país, se reconoce que es un estado en el que están mejor conservados estos recursos (Chiappy *et al.*, 2000) y, al mismo tiempo, es el Estado con mayor crecimiento poblacional 4.7% (INEGI, 2011). Para hacer compatibles el uso, manejo y conservación de los recursos y atender a las necesidades de la población es necesaria una buena planeación del uso del territorio a través de los Programas de Ordenamiento Territorial, los Programas de Desarrollo Urbano y los Programas de Desarrollo Social. En todos ellos una parte esencial es el inventario de suelos.

En los últimos años, la contaminación, la deforestación, la degradación de suelos, la vulnerabilidad de los ecosistemas, la fragilidad y la pérdida de la biodiversidad han sido temas de investigación, discusión y debate constante a nivel mundial y nacional, y el estado de Quintana Roo no es ajeno a ello, en todos estos temas los suelos juegan un papel relevante. Hoy en día, el conocimiento y explicación del medio natural y social requiere de un enfoque multidisciplinario, la información sobre los suelos es, por tanto, un insumo esencial para la evaluación, manejo y planeación del uso del territorio.

El estado de Quintana Roo es considerado por muchos, como una planicie homogénea (Krasilnikov y Reyna, 2007); sin embargo, esta afirmación no es del todo cierta, en el Estado se presentan planicies onduladas de 1 a 5 m de altura con cobertura vegetal por lo que las fotografías aéreas no son de gran utilidad para definir estas diferencias, en campo se puede observar la gran heterogeneidad espacial en la que se encuentran las unidades de suelo a unos cuantos metros de distancia, además los estudios de suelo en zonas de karst tropical son escasos y de tipo cualitativo (Bautista *et al.* 2003a, 2003b, 2004)

Para la mayor parte del territorio nacional y del estado de Quintana Roo en lo particular, se cuenta con información edafológica elaborada por el INEGI con un enfoque fisiográfico a partir de puntos definidos de perfiles de suelos; sin embargo la información que se puede consultar:

- a) No se encuentra actualizada, la clasificación de suelos ha cambiado a un ritmo acelerado en los últimos años, la cartografía que es consultada y utilizada en la mayoría de los estudios es de los años 70 y 80 (Serie I), con un sistema propuesto por la FAO en 1968. Las actualizaciones que se han elaborado utilizan el sistema WRB 1999 (Serie II) y está en proceso una nueva actualización con el sistema WRB 2006; sin embargo,

aún no está publicada y ya existen otras actualizaciones (2007 y 2014). No podemos seguir trabajando con datos desactualizados.

- b) No se basa en un sustento geomorfológico e integral que tome en cuenta la relación estrecha entre la forma del terreno y los procesos pedogenéticos
- c) No permite, de acuerdo a Cotler (2003), inferir la aptitud de los suelos a partir de las características de diagnóstico establecidas en la clasificación y, además, no permite realizar un seguimiento de la evolución de las propiedades del suelo en el tiempo y bajo distintos usos.

Investigadores como Cotler (2003) y Bautista *et al.* (2003b) indican que los temas relevantes en las nuevas tendencias en las investigaciones edafológicas son:

- El establecimiento de indicadores de calidad del suelo
- La relación existente entre las prácticas de manejo y las características edáficas
- Estudios sobre degradación de suelos
- El suelo como sumidero para almacenar carbón
- Monitoreos edafocológicos multiescalares
- El enfoque morfoedafológico donde la información edáfica y geomorfológica sustenta la cartografía de unidades de paisaje y permite la explicación de la formación de los suelos y la evaluación de la calidad del sitio
- Conocimiento tradicional del suelo

La presente investigación se encuentra dentro de estas nuevas tendencias y necesidades, y pretende la regionalización y generación de un mapa de suelos con un enfoque geomorfopedológico cuya información generada tendría una gran cantidad de aplicaciones (Bautista y Palacio, 2005) en:

- a) La realización de inventarios de recursos naturales, degradación de tierras y cambio ambiental.
- b) El análisis y predicción de riesgos naturales (movimientos en masa, hundimientos del terreno, inundaciones, etc.).
- c) como un instrumento útil en el conocimiento integral de la complejidad de los paisajes a niveles locales.
- b) La selección de los sitios apropiados, desde el punto de vista físico, para la construcción de infraestructura urbana y de comunicaciones.
- d) El ordenamiento de las actividades económicas del territorio.

A pesar de lo arriba expuesto, para la elaboración de los mapas geomorfoedafológicos primero es necesario un mejor conocimiento del relieve. En los mapas geomorfoedafológicos los polígonos representan geformas a partir de la zonificación del relieve y el atributo que se asigna a los polígonos son los suelos asociados a ese espacio en función de sus características.

Preguntas de investigación

¿Qué tipo de relieve kárstico, en que cantidad y cómo se encuentra distribuido a escala 1:50 000?

¿Cuáles son las variaciones de los factores formadores y como se combinan para dar origen a la geodiversidad?

¿Qué factores formadores que tienen mayor influencia sobre el desarrollo y distribución de los suelos a escala 1:500 000?

¿Cuál es el patrón de distribución de suelos resultante de la interacción de los factores formadores a escala 1:250 000?

Objetivo general

Analizar la distribución espacial de los suelos con un enfoque geomorfoedafológico que permita visualizar de manera integral y congruente los factores formadores del suelo y la geodiversidad del Estado de Quintana Roo.

Objetivos específicos

- Analizar las características morfométricas del relieve kárstico que sirva como base para el mapa de suelos
- Analizar de manera integral los factores formadores de suelos para entender la geodiversidad
- Identificar los ambientes geomorfológicos y los suelos a escala 1:500 000
- Analizar la distribución espacial de suelos con base en un análisis integral de los factores formadores utilizando herramientas digitales a escala 1:250 000.

Metodología General

El presente trabajo de investigación se realizó en tres etapas, la primera corresponde al análisis del relieve de la superficie del Estado, la segunda el análisis edafológico y la tercera en la combinación de las dos anteriores para la elaboración del mapa de ambientes geomorfoedafológicos del estado de Quintana Roo (Figura 1).

En la primera etapa, a partir de la base de datos topográfica 1:50000 de INEGI con el apoyo de un Sistema de información Geográfica (SIG) utilizando el software ArcGIS[®] se realizó el análisis morfométrico del relieve kárstico a través de la aplicación de índices morfométricos (altimetría, disección vertical o amplitud del relieve (DV)) y la caracterización morfográfica a partir del análisis de las depresiones, cuerpos de agua y régimen de inundación para generar los mapas de geoformas, de distribución y de densidad de formas kársticas. Al mismo tiempo, a partir de la base de datos vectoriales, se calculó la densidad de fracturas para con ello definir los ambientes geomorfológicos.

En la segunda etapa, a partir de las bases de datos de suelos (análisis físicos y químicos, de perfiles) georreferenciados generadas por el INEGI, el INIFAP, el CIGA y la UQRoo, se identificaron los grupos de suelo de acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) de 2007. Se aplicaron análisis de agrupamiento, de componentes principales y de clasificación para generar en el SIG el Mapa de suelos de Quintana Roo.

En la tercera etapa, se incorporaron a los análisis geomorfológico y edafológico a los datos de clima obtenidos de INEGI serie II (INEGI 2008a) y de vegetación del Inventario Nacional Forestal serie IV de CONAFOR (2011), para definir los Ambientes Geomorfoedafológicos para el Estado.

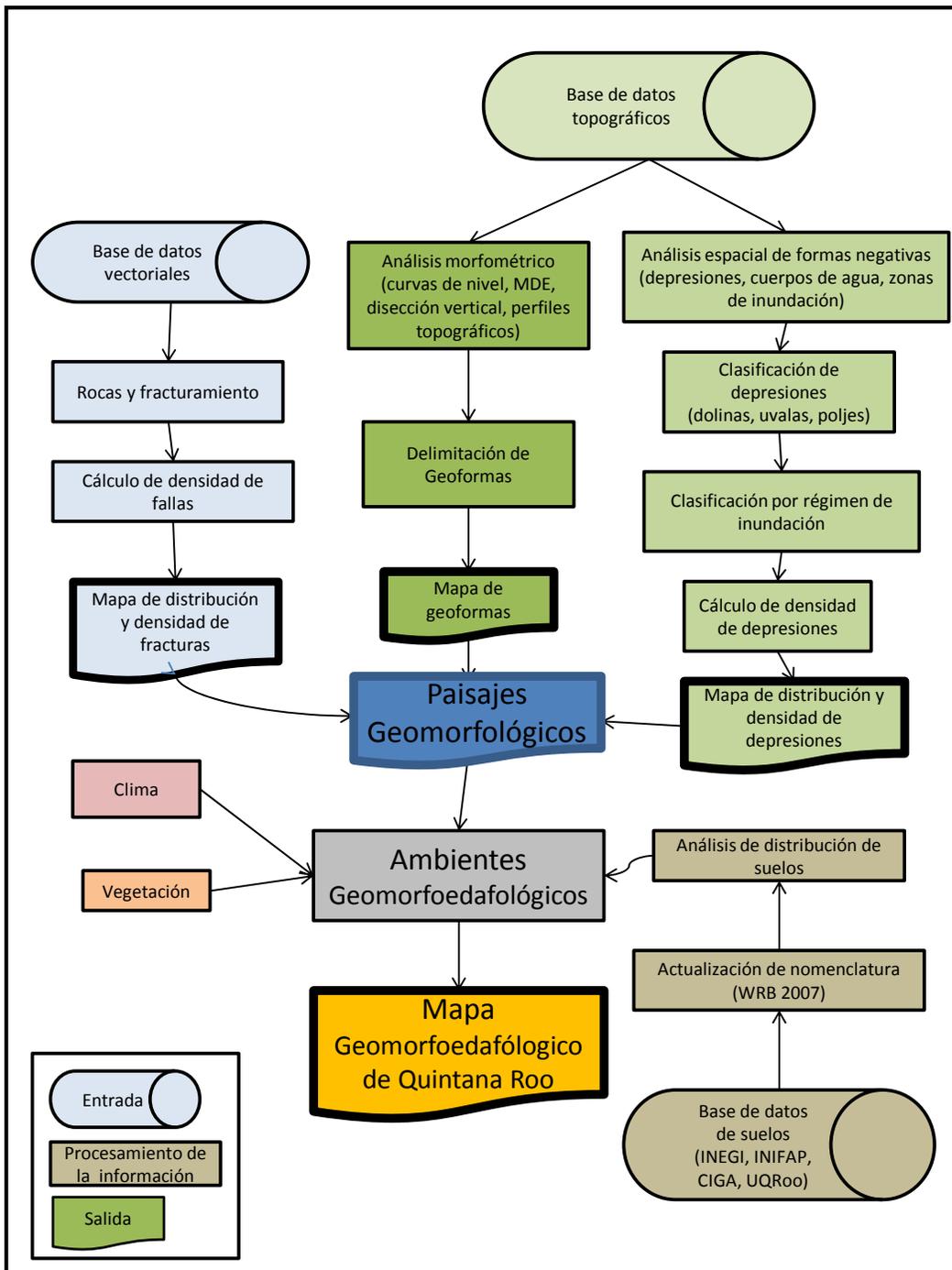


Figura 1. Diagrama metodológico (elaboración propia)

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LOS SUELOS EN ZONAS DE KARST

Resumen

Este capítulo se desarrolla en dos partes, la primera se refiere a conceptos sobre el enfoque geomorfoedafológico utilizado en este trabajo y la segunda sobre el estado del arte en que se encuentra el estudio de las zonas kársticas. En México los inventarios de suelo se han desarrollado principalmente por instituciones gubernamentales con un fin utilitario más que científico, utilizando perfiles de suelo y un enfoque fisiográfico. El enfoque geopedológico desarrollado por Zinck, nace de la necesidad de superar la visión estática y descriptiva del medio natural del enfoque fisiográfico, se basa en la estrecha relación que hay ente la forma del terreno y los procesos morfodinámicos y los procesos pedogenéticos, se centra en el estudio de las relaciones y correspondencia entre las variables geomorfológicas y edáficas y opera a través de un sistema taxonómico de seis categorías.

El Karst es un término que se utiliza para describir zonas que se caracterizan por presentar rocas solubles como la caliza, el mármol y el yeso que forman depresiones cerradas características, hay abundancia de cuevas, una alta y rápida infiltración por lo que el agua se mueve principalmente a nivel subterráneo. En México estas zonas ocupan cerca del 20% del territorio y es la Península de Yucatán en dónde se encuentra la mayor área. El estudio de las zonas kársticas en México y en Quintana Roo, en particular, aún son escasos a pesar de la importancia de estudiar y entender la dinámica de estas zonas considerando que el Karst es la base sobre la cual se desarrollan los suelos. Los estudios sobre esta zona son principalmente de reconocimiento estructural o de reconocimiento puntual, principalmente de tipo espeleológico sobre cuevas, cenotes y ríos subterráneos.

1.1 El enfoque geomorfoedafológico

En las últimas décadas, el rápido aumento poblacional ha generado la cada vez más frecuente necesidad de uso y explotación de los suelos, al mismo tiempo se han generado severos problemas ambientales como la contaminación, la erosión, la deforestación y la pérdida de biodiversidad (Cotler *et al.*, 2007; McBratney *et al.*, 2014). Estos problemas han ocasionado la necesidad de establecer diversos programas de uso, planeación y conservación de los mismos, como los ordenamientos ecológicos, los programas de manejo de áreas naturales, la planeación agrícola, entre otros. En cualquiera de ellos, el punto de partida es el inventario de los recursos.

Para el caso de los suelos, el organismo encargado de elaborar el inventario en México fue la Comisión Nacional de Irrigación en 1927, con un uso principalmente agropecuario; a partir de los años setenta la entonces Comisión para el Estudio del Territorio Nacional (CETENAL) y actualmente Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) inició la generación sistemática de mapas taxonómicos de suelo a diferentes escalas, con base en perfiles de suelos, cuya información fue generalizada y extrapolada utilizando información fisiográfica (Takaki, en Zinck, 1994)

Este tipo de levantamiento de suelos tiene un énfasis utilitario, más que un énfasis científico por entender al suelo como un cuerpo natural, como un componente del paisaje. No se basa en un sustento geomorfológico, a pesar de la estrecha relación que existe entre la forma del terreno, los procesos morfodinámicos y los procesos pedogenéticos (Cotler, 2003).

Autores como Zinck (1989), Bocco *et al.* (2009) y Cotler (2003), entre otros, coinciden en indicar que la base para la elaboración de la cartografía de suelos es el relieve (base geomorfológica) y una regionalización del territorio.

El enfoque geomorfoedafológico nace de la necesidad de superar la visión estática y descriptiva del medio natural que presenta el enfoque fisiográfico. Parte de una concepción del medio físico como un sistema abierto que ocupa el plano de contacto o interface litósfera-atmósfera, su caracterización dependerá del grado de estabilidad de la interface, de tal modo que permite conocer al medio físico, tanto en su descripción como en su dinámica (Toledo y Moguel, 1992).

Este enfoque se basa en la premisa de que la formación y desarrollo de los suelos se encuentra estrechamente ligados al conjunto de fenómenos que modifican el relieve, debido a que los factores formadores que influyen en ellos son los mismos. Así, la edafogénesis se considera a la vez como componente y como resultante de la morfogénesis (Cotler, 2003).

Las relaciones entre geomorfología y edafología pueden analizarse desde varios puntos de vista conceptual, metodológico y operacional. Conceptual, la pedología se basa en relaciones entre geoforma y suelo que se centran en la superficie de la Tierra. Metodológico, se implementa mediante una variedad de modalidades metodológicas que se basan en el concepto tridimensional de paisaje geomorfoedafológico. Se hace operacional en el marco del inventario de suelos, el cuál puede ser representado por un esquema jerárquico de actividades (Zinck, 2012).

Su perspectiva conceptual se centra en el estudio de las relaciones particulares, así como en la correspondencia directa e indirecta entre los elementos que constituyen las variables de la evaluación geomorfológica y edáfica, expresados a través de la distribución de una unidad territorial con una estructura bien definida (Espinosa, 2005).

Para Zinck (1989), los principales aspectos en los que la geomorfología ayuda al estudio de los suelos son:

A. Elaboración de mapas

Para la elaboración de mapas de suelos se necesita, por un lado la identificación de suelos y por el otro su delimitación. La identificación es derivada de la descripción de las características físicas y químicas de los perfiles y la clasificación de los suelos. Para la delimitación de las áreas ocupados por ellos se utilizan la fotointerpretación y el reconocimiento de campo, en esta parte la geomorfología ayuda a la selección de áreas, transectos y recorridos, el trazo de límites sobre la base conceptual de las

relaciones que hay entre las geoformas y los suelos y en la identificación, monitoreo y explicación de la variabilidad en la distribución espacial de los suelos (Figura 1.1).

B. Interpretación de la génesis de los suelos

Los procesos geomorfológicos son factores de formación y evolución de suelos dentro de un marco ambiental. Los procesos geomorfológicos en áreas con pendiente como la erosión y la lixiviación son responsables de la deposición de fragmentos y acumulación de elementos solubles. En áreas planas los procesos geomorfológicos intervienen en la formación de sistemas estructurados de deposición que conducen a una fuerte diferenciación espacial topográfica, hidrológica y litológica. Todos estos procesos junto con el factor tiempo determinan los grados de desarrollo de los suelos

La implementación de este enfoque opera a través de un sistema taxonómico que comprende seis categorías: geoestructura, ambiente morfogenético, paisaje, relieve/modelado, litología/facies y relieve. En el Cuadro 1.1 se presenta la definición de cada uno.

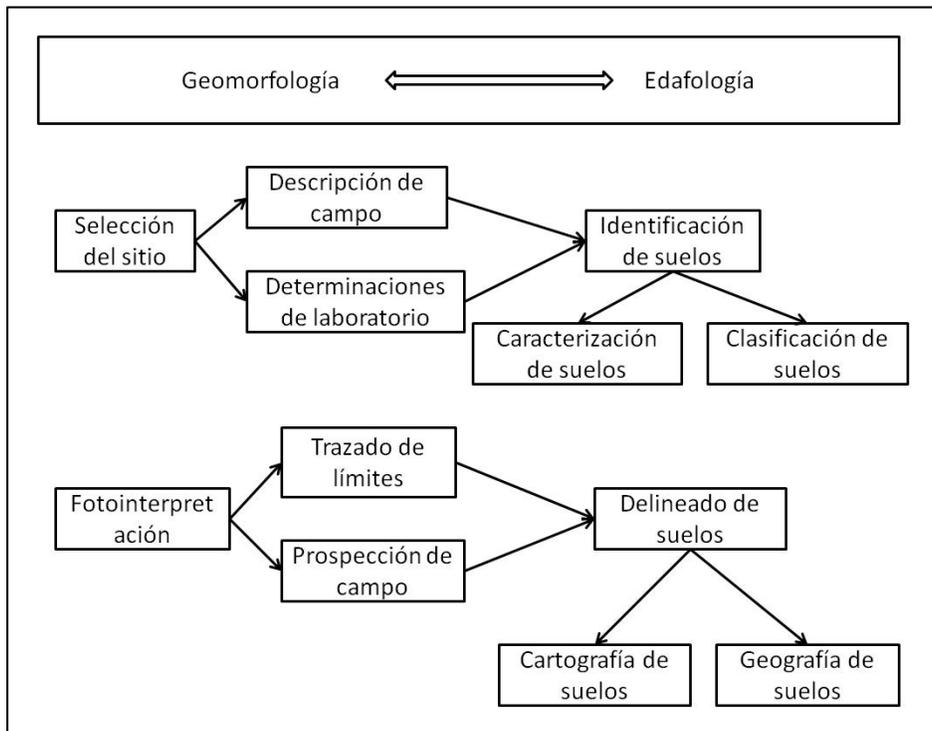


Figura 1.1 Aportes de la Geomorfología a la Edafología. (Modificado de Zinck ,1989)

La implementación de este enfoque opera a través de un sistema taxonómico que comprende seis categorías: geoestructura, ambiente morfogenético, paisaje, relieve/modelado, litología/facies y relieve. En el Cuadro 1.1 se presenta la definición de cada uno.

Cuadro 1.1 Sistema de clasificación taxonómica de geoformas

Concepto	Categoría	Definición	Taxa
Geoestructura	Orden	Es una larga porción continental caracterizada por una estructura geológica. Se representan a escala 1:1000000	Cordillera, escudo, geosinclinal
Ambiente morfogenético	Suborden	Amplio tipo de medio biofísico originado y controlado por un estilo geodinámico interno y/o externo. Se representan a escala 1:500000	Ambiente estructurado, de depósito, erosivo, de disolución, residual y mixtos
Paisaje geomorfológico	Grupo	Gran porción de terreno caracterizado por sus rasgos fisiográficos; corresponde a una repetición de tipos similares de relieve o una asociación de diferentes tipos de relieve. Se representan a escala 1:250000	Valle, planicie, periplanicie, altiplanicie, piedemonte, lomerío, sierra
Relieve/modelado	Subgrupo	El relieve es determinado por una combinación de topografía y estructura geológica y el modelado por condiciones morfoclimáticas específicas o procesos morfogenéticos. Se representan a escala 1:50000	Estructural, erosional, depositacional, disolucional (Karst), etc.
Litología/facies	Familia	La litología se refiere a la naturaleza petrográfica de la roca dura u origen/naturaleza de las formaciones no consolidadas de cobertura. Se representan a escalas 1:50000	Rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas Aluvial, coluvial, lacustre, litoral, diluvial, glacial, periglacial, biogénico, mixto, etc.
Forma del terreno	Subfamilia	Tipo de geoforma básica y conspicua caracterizada por una combinación única de geometría, dinámica e historia. Se representa a escalas mayores a 1:50000	Forma del terreno = Forma topográfica + posición geomórfica + unidad geocronológica = marco de formación de suelos

Fuente: elaboración propia con base en: Zinck (1989, 2012) y Bocco *et al.* (2009).

Los niveles de abstracción y generalización parten de la geoforma (más detalladas) y se incrementa hasta llegar a la geoestructura (más generales), los niveles de concretización y detalle van en dirección contraria (Zinck, 1989).

Esta clasificación jerárquica es fácilmente apreciable o reconocible en el terreno y permite la delimitación de unidades en una regionalización natural del terreno, en la cual los aspectos edáficos y morfológicos tienen una relevancia significativa. Por lo que los atributos son características usadas para la descripción, identificación y clasificación de geoformas. Para Zinck (1989), hay cuatro clases de atributos que pueden ser usados:

1. Atributos morfográficos, describen la geometría de las formas como la topografía y la planimetría
2. Atributos morfométricos, miden las geoformas como la altitud, densidad y la pendiente.
3. Atributos morfogenéticos, determinan el origen y evolución de geoformas como el tipo de roca, la distribución del tamaño de partículas, estructura, consistencia y mineralogía,
4. Atributos morfocronológicos, circunscriben el contexto del tiempo, es decir la historia de las geoformas, a través de la medición de la actividad, edad de las geoformas o la estratigrafía de suelos.

En México aún son pocos, y muy localizados, los estudios que utilizan el enfoque Geomorfoedafológico, se tienen reportes en Michoacán, en la zona volcánica (Espinoza, 2005; Bocco *et al.*, 2001; Mendoza *et al.*, 2009; Mendoza *et al.*, 2010; Mendoza y Bocco, 2010); en la Cuenca del río Tijuana (Chávez, 1996); en el Estado de Yucatán (Bautista *et al.* 2003b, 2004, 2005a, Aguilar, 2014); en Campeche (Palacio *et al.*, 2005); en Tabasco (Jiménez 2013) y ha sido propuesto para ser utilizado en Programas de Ordenamiento Territorial (Bocco *et al.*, 1996). Actualmente, Bautista está realizando el Mapa Geomorfoedafológico de México a escala 1:500000, con ventanas 1:250000 en las zonas volcánicas y de Karst tropical, en el cual este trabajo forma parte.

1.2 El Karst en México

El término Karst o Carst (krs en eslavo; karr en alemán, carso en italiano) es muy antiguo. Según Moreno (1992), De Pedraza (1996), Ford y Williams (2007), y Paviopoulos *et al.* (2009) el Karst es el nombre de la región más septentrional de los Montes Dináricos en la provincia esloveno-croata, donde la palabra significa “campo de piedras”

Karst es un término usado para describir un especial tipo de relieve que se caracteriza por la formación de típicas depresiones cerradas, la presencia de escaso drenaje superficial debido a una alta y rápida infiltración, la abundancia de cuevas y presencia de un sistema subterráneo de agua que se desarrolla sobre rocas, especialmente solubles, como la caliza, el mármol y el yeso.

Se estima que cerca del 12% de las zonas continentales libres de hielo han desarrollado karstificación de rocas y cerca del 20 al 25% de la población global depende de algún modo del agua obtenida de estas zonas (Ford y Williams 2007).

En el mundo existe Karst en todas las latitudes, desde los círculos polares hasta las regiones tropicales, sin embargo su desarrollo y magnitud no es homogéneo, hay más cantidad de zonas kársticas en el hemisferio norte que en el sur (Gutiérrez, 2008).

Las zonas kársticas más importantes del mundo, de acuerdo con Moreno (1992), se presentan en la región Causse al sur de Francia; Andalucía en España; Grecia; Jamaica; norte de Puerto Rico; oeste de Cuba; el gran valle de Virginia y Tennessee en Estados Unidos y la Península de Yucatán, en México.

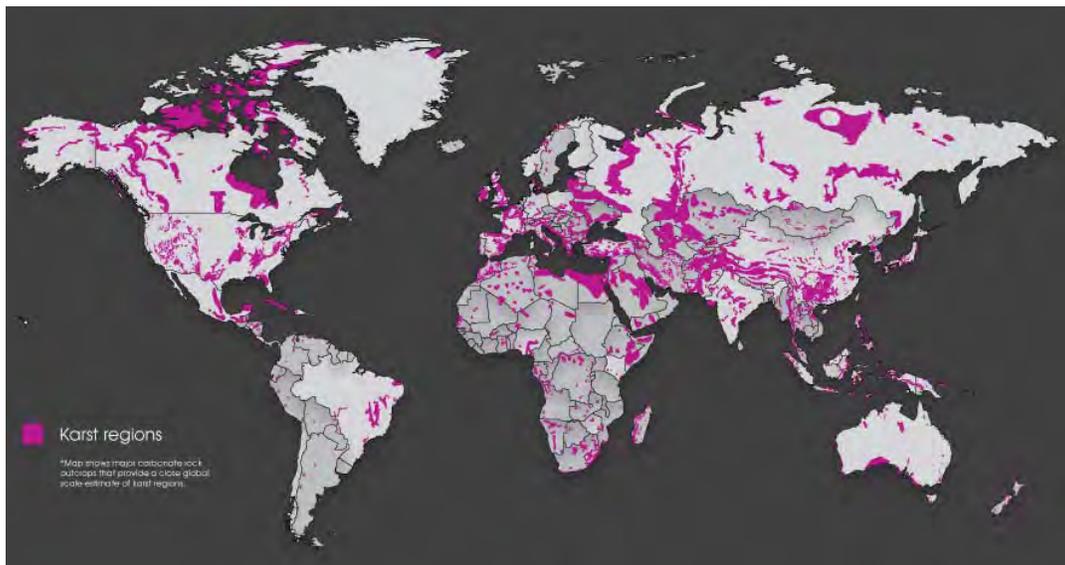


Figura 1.2 Regiones Kársticas del Mundo (tomado de: <http://circleofblue.org>)

Las condiciones básicas para la formación del Karst, de acuerdo a Paviopoulos *et al.* (2009), se deben a cuatro factores: litológico, estructural, climático y tiempo; Blair (1986) incorpora un factor más, la vegetación:

Para Goldscheider y Drew (2007), el primer e indispensable paso en investigaciones del Karst es la caracterización geológica y geomorfológica, ésta generalmente incluye una revisión de la literatura, la interpretación de los mapas existentes, así como de trabajo de campo. La litoestratigrafía y las estructuras geológicas definen los límites externos y la geometría interna del sistema kárstico. La geología también determina si un acuífero de Karst es superficial o profundo, abierto o cerrado y define la extensión de las zonas insaturadas y saturadas. Los deslizamientos locales, las fracturas, las fallas y los plegamientos a menudo determinan la orientación inicial del desarrollo del Karst y del flujo del agua subterránea, aunque cambian durante el tiempo geológico.

1.2.1 Contexto Nacional

En México, el Karst ha sido poco estudiado, a pesar de su importancia por su relación con las aguas subterráneas, la construcción de presas y el desarrollo turístico, aproximadamente el 20% del territorio está ocupado por rocas solubles, principalmente calizas y, en menor proporción, yesos (Gutiérrez, 2008). El Karst se ha desarrollado en dos principales regiones: la primera con sierras sumamente plegadas y falladas distribuidas a lo largo de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur y la Sierra de Chiapas y, la segunda, en condiciones de lomeríos y de planicies en la extensa plataforma calcárea de la Península de Yucatán (Espinasa, 1990; Lugo, 1990).

Las diferencias en estructura geológica y el clima en estas áreas resultan en una gran variedad de formas y tipos kársticos. Espinasa (1990) reporta cuatro tipos, en relación con el clima; el Karst de climas templados o subhúmedo, caracterizado por presentar campos de dolinas que se desarrolla en las partes altas y planas de cerros calcáreos convexos con laderas empinadas; el Karst tropical que se desarrolla en los climas cálidos y húmedos se caracteriza por la presencia de cerros residuales de forma cónica, de cúpula, mogote o torre separados por grandes dolinas o planicies aluviales; el Karst de bosque lluvioso ubicado en las partes más elevadas de las sierras en condiciones climáticas frías y húmedas presenta dolinas separadas por aristas estrechas y afiladas y el Karst alpino desarrollado en regiones periglaciales en zonas calcáreas con más de 3000 msnm, se caracteriza por pequeñas dolinas en forma de embudo.

1.2.2 La Península de Yucatán

El Karst de la Península de Yucatán es el más extenso del país, su origen y evolución ha sido poco estudiado, de acuerdo a Frausto *et al.* (2010), las investigaciones que se han realizado son principalmente de dos tipos: por un lado estudios regionales de carácter prospectivo con énfasis en el reconocimiento de conjuntos estructurales y, por otro, las puntuales de reconocimiento de formas menores centradas en la descripción de la génesis, evolución y dinámica de formas. Dentro de los estudios más antiguos en el área, de acuerdo a Espinasa (1990) y Lugo *et al.* (1992), se encuentran los de Mercer (1986), Cásares (1905), Cole (1910), Robles (1950), Bonet, (1953), Gerstenhauer (1969), Isphording (1975) y Reddell (1977); los estudios más recientes son los de Lugo *et al.* (1992), Héraud Piña (1996), Chiappy *et al.* (2000), Bautista *et al.* (2005b, 2007), Ihl *et al.* (2007), Frausto e Ihl (2008) y Aguilar (2014).

Geológicamente, la Península es una plataforma con estratos carbonatados, con pocos contrastes de altitud y carente de redes fluviales superficiales, el escurrimiento es casi totalmente subterráneo (Lugo *et al.* 1992). Sin embargo, no es una planicie homogénea, por el contrario, a escalas grandes y niveles locales, existe una amplia diversidad de relieve y ecosistemas, encontrándose variaciones horizontales en espacios muy cortos (Bautista *et al.* 2003b; 2004; 2005b; Bautista y Palacio 2005). En el Jurásico Tardío, la Península era

un mar somero e inició su emersión sobre el nivel del mar durante el Oligoceno y Mioceno en la región sur, y el resto del territorio se fue levantando gradualmente, encontrándose la parte más reciente (del Cuaternario) en la parte norte y hacia la periferia (García *et al.*, 2000). En la medida que el relieve se levanta, pasa de planicies a planicies onduladas y finalmente a lomeríos, estos movimientos producen fracturas y favorecen el desarrollo del Karst (Lugo *et al.* 1992).

El modelo de evolución kárstica analizado por Bautista *et al.* (2005b) indican que el Karst se desarrolla sobre estructuras tectónicas mesiformes y se caracteriza por formas de absorción circulares, cavidades de desarrollo vertical, circulación vertical y horizontal y surgencias periféricas. Las planicies denudativas se transforman gradualmente en planicies acumulativas confinadas hasta convertirse en planicies residuales extendidas.

La actividad neotectónica de la Península ha originado levantamientos de forma basculada, en mayor intensidad en el sur y un sistema de fracturas orientado al norte y al noreste; en la porción sur se encuentran las etapas más avanzadas de evolución y en el norte las más recientes, de esta forma, Lugo *et al.* (1992) y Espinasa (1990) definen dos unidades morfológicas principales:

La primera en el norte, es una plataforma recientemente emergida donde predominan las planicies y las rocas sedimentarias neogénicas, está perforada en numerosos lugares por cenotes, depresiones kársticas de paredes verticales que alcanzan el nivel freático local, formados por colapso de galerías subterráneas epifreáticas (Gaona *et al.* 1980). Una serie de depresiones mayores están alineadas hacia el este-noreste, desde la Sierrita de Ticul hasta la costa frente a la isla de Cozumel. Se han encontrado también numerosos cenotes de gran extensión vertical, incluso superior a los 100 metros, particularmente en el centro de la Península en los alrededores de Valladolid (Lazcano 1985). La porción norte (Sierrita de Ticul) no presenta drenaje superficial y todas las precipitaciones son captadas de forma difusa por el lapiaz hacia el acuífero kárstico

La segunda, en el sur, donde las planicies se alternan con lomeríos de hasta 400 msnm en rocas sedimentarias oligocénicas, presentan en su mayor parte un relieve de Karst tropical de cúpulas (kuppenkarst) de hasta 100 m de altura, con los cerros rodeados de planicies, hacia el sur (Sierra de Bolonchén), se encuentran numerosos cauces de arroyos temporales que rápidamente transmiten el agua captada hasta el nivel freático, donde las exploraciones se han detenido frente a pasajes totalmente inundados. Se considera que estas cavidades pudieran representar las formas de captación de los sistemas kársticos que desembocan en la costa de Quintana Roo. En la porción oriental, depresiones alargadas y algunos lagos pudieran haberse desarrollado como poljes asociados a fallamiento normal.

A medida que el proceso kárstico avanza, se va incrementando la cantidad de geoformas y depósitos residuales. En la Península se han desarrollado formas exocársticas (negativas y positivas) y formas endocársticas (Ihl *et al.*, 2007). Debido a que la península se encuentra cubierta por vegetación, el mejor indicador para diferenciar los estadios evolutivos es el

patrón morfológico de geoformas exocársticas, que sintetiza las condiciones que favorecen o inhiben el desarrollo del Karst (Bautista *et al.*, 2005b).

Para Lugo *et al.* (1992) y Bautista *et al.* (2005b) las dolinas son el punto de inicio del Karst en la Península, éstas se unen gradualmente en algunas zonas durante la madurez, hasta formar úvalas y posteriormente poljes en la etapa tardía, los movimientos verticales contribuyen a la aparición de fisuras, fracturas fallas y diaclasas que favorecen el desarrollo del Karst subterráneo incrementándose la disolución de la roca en la superficie.

En su estudio Héraud-Piña (1996), identificó seis tipos de morfología kárstica en función de la altitud y el gradiente altitudinal (diferencia de altitud reportada al nivel de la base de la formación), para la autora estos criterios toman en cuenta el papel de la precipitación y de las variaciones litológicas de las facies carbonatadas. Los tipos son: Karst litoral con cúpulas bajas (0-15); Karst plano con cenotes y dolinas-lagos (0-10); Karst con dolinas y pequeños montículos (10-30 m); Karst de dolina y úvalas con cúpulas grandes (20-60 m); Karst con cúpulas, úvalas y poljes con inundación (10-130 m) y fluvio-Karst con residuos de valles secos o temporales poljes abundantes y cúpulas (30-80 m y 300-400 m).

Por su parte, Bautista *et al.* (2005b, 2011), describen los paisajes geomorfológicos y establecen cuatro sistemas de geoformas: fluvio-palustre ubicado sobre planicies bajas acumulativas, litoral o costero en el borde externo continental, carso-tectónico sobre superficies de estructura tabular y/o subhorizontal y kárstico que abarca grandes extensiones reconocibles por su morfogénesis o expresión morfológica.

1.2.3 El estado de Quintana Roo

La mayor parte de los estudios de Karst en Quintana Roo son de carácter Peninsular, son escasos los estudios específicos en el Estado, entre ellos se encuentran los realizados por García *et al.* (2000), Frausto e Ihl (2008), Frausto *et al.* (2010) y algunos sobre áreas específicas, principalmente espeleológicos sobre cuevas y cenotes como los de Coke (2004), Mecham (2005) y Ordoñez y García (2010) que han llevado al descubrimiento de más de 205 cenotes y 900 km de galerías subterráneas inundadas y cavernas consideradas entre las más grandes del mundo, como Ox Bel Ha, Sac Aktum, Nohoch Nah Chich, Dos ojos y Naranjal, todas en el área de Tulum. Estas cavidades representan las surgencias, en forma de un extenso delta distributivo subterráneo, de un inmenso sistema kárstico, en su mayor parte epifreático, cuya cuenca de captación pudiera extenderse hasta las porciones centrales y sur de la Península (Espinasa, 1990).

Para Lugo *et al.* (1992), haciendo un estudio de los rasgos geomorfológicos de la Península, señalan que en la planicie norte de Quintana Roo el relieve kárstico tiene un desarrollo amplio, sobre todo dolinas formadas por disolución de rocas de hasta 100 m de diámetro y 30 m de profundidad. En el este, desde el nivel del mar hasta los 50 m, el relieve consiste en varios pisos de altitud diferente controlados por fallas, en donde dominan las cuencas alargadas, sin desagüe superficial; son comunes las grandes depresiones con bordes

escarpados, ocupados por lagos entre los cuales destaca Bacalar con más de 30 km de longitud.

Asimismo, García *et al.* (2000) señalan que en Quintana Roo afloran los sedimentos acumulados durante el Paleoceno, formando una plataforma caliza con un marcado control estructural de sistema de líneas de debilidad tectónica (fallas y fracturas) y valles kársticos que alcanzan 40 km de longitud y 5 km de ancho, drenados por corrientes superficiales intermitentes o son superficies de captación de escurrimientos y escorrentías, por lo que domina la infiltración, formando zonas de recarga de acuíferos subterráneos. Identifican tres unidades terrestres o geosistemas principales: uno al norte donde dominan las planicies estructurales altamente permeables con una ligera inclinación al norte y un sistema de fallas dirección NO-SE; otro al sur, donde se alternan planicies internas con mesas de desarrollo kárstico y, la tercera, al oriente en la proximidad de la línea de costa formado por bloques de hundimiento donde abundan depósitos detríticos, eólicos, litorales, lacustres y palustres.

Por su parte, Frausto e Ihl (2008), indican que el norte de Quintana Roo se caracteriza por ser una planicie ligeramente inclinada en dirección sureste-noreste con altitudes máximas de 40 m, el Karst tienen un desarrollo amplio las dolinas formadas por disolución que alcanzan hasta 100 m de diámetro y 30 m de profundidad y se desarrollan cuevas de hasta 10 km de túneles; hacia el oeste se han desarrollan planicies y lomeríos y hacia el sur se alternan planicies internas con lomeríos y colinas redondeadas desde los 100 hasta los 380 m de altura, que corresponden a la parte más antigua. En esta zona se presentan lutitas de color verde con abundante yeso (García *et al.*, 2000).

Conjuntamente, García *et al.* (2000) reconocen las siguientes unidades geomorfológicas: mesas kársticas, planicies intermontanas, planicies estructurales, valles kársticos, valles fluviales, superficies de acumulación temporal y permanente, superficies de acumulación marina y residuos de erosión diferencial, dominando las mesas de desarrollo kárstico.

Finalmente, Bautista *et al.* (2005b, 2010), trabajando a nivel peninsular, indican que los controles estructurales asociados a la margen activa del centro del Estado, son especialmente favorables para la formación de úvalas y poljes, e identifican cuatro ambientes geomorfológicos en Quintana Roo: La región costera, la región fluvio-palustre, la región tectono-kárstica y la región kárstica e indican que la identificación de estas regiones es importante debido a que estos ambientes geomorfológicos influyen en el desarrollo y distribución de los suelos en el área.

1.3 Reflexiones finales del capítulo I

El enfoque Geopedológico desarrollado por Zinck en 1989 y 2012 se basa en la premisa de que “la formación y desarrollo de los suelos se encuentran estrechamente ligados al conjunto de fenómenos que modifican el relieve, debido a que los factores formadores que influyen en ellos son los mismos”, esto permite una delimitación de unidades en una regionalización natural del terreno, los atributos que describen, identifican y clasifican a las geoformas son morfográficos, morfométricos, morfogenéticos y morfocronológicos.

Uno de los grandes aportes de este método, es que permite obtener un conocimiento integral del medio natural y un diagnóstico de la complejidad del ambiente, detectar los principales problemas de manejo y conservación de suelos y aporta elementos sólidos para la toma de decisiones.

Si bien el Karst ocupa cerca del 20% del territorio nacional, es notable la escasez de información e investigaciones al respecto, a pesar de la importancia que tiene desde el punto de vista hidrológico, económico, turístico y cultural. En Quintana Roo el Karst ha sido estudiado con fines espeleológicos o turísticos, principalmente, son muy pocos los trabajos que describen la geomorfología, su dinámica y su relación con los otros componentes del paisaje como los suelos.

En esta investigación se pretende analizar cuál es la relación que hay entre la geomorfología kárstica del Estado y la distribución espacial de los suelos utilizando el enfoque desarrollado por Zinck y elaborar una regionalización geomorfoedafológica de Quintana Roo basada en este enfoque, para lo cual, en el siguiente capítulo, se describen las características físico geográficas de Quintana Roo.

1.4 Referencias del capítulo I.

- Bautista, F., Aguilar, Y., Rivas, H., Paez, R. 2007a. Los suelos del estado de Yucatán. Importancia del binomio suelo-materia orgánica en el desarrollo sostenible. Martínez M, Cabañas D editores. Agencia Española de Cooperación Internacional y el Centro de Edafología y Biología Aplicada de Segura de Murcia, España 13–42.
- Bautista, F., Díaz, S., Castillo, M., Zinck, J.A. 2005b. Spatial heterogeneity of the soil cover in the Yucatan Karst: Comparison of Mayan, WRB, and Numerical Classifications. *Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie* 38, S81.
- Bautista, F., Estrada, H., Jiménez, J.J., González, J.A. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. *Terra Latinoamericana* 22, 243–254.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135, 308–321.
- Bautista, F., Palacio, G. 2005. Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche : Universidad Autónoma de Yucatán : Instituto Nacional de Ecología, Campeche; Yucatán, México.
- Bautista, F., Sampedro, E., Pérez, M., Aponte, G., González, M. 2003b. Geoformas, agua y suelo en la Península de Yucatán. *Naturaleza y Sociedad en el área Maya. Pasado, presente y futuro*, Academia Mexicana de Ciencias, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, México 21–35.
- Bautista, F., Zinck, J.A. 2010. Construction of an Yucatec Maya soil classification and comparison with the WRB framework. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine* 6, 4269–6.
- Blair, R.W., 1986. Karst landforms and lakes. *Geomorphology from space: A global overview of regional landforms*. NASA Special Publication, SP-486, Washington DC 402–446.
- Bocco, G., Mendoza, M.E., Velázquez, A., Torres, A., Torres, M.A. 1996. Regionalización ecológica del estado de Michoacán. Informe Técnico. DERN. Morelia, Michoacán.

- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, A., Burgos, A. 2009. La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales : Instituto Nacional de Ecología : Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, México, D.F.
- Chávez, G. 1996. Geomorfología de la Cuenca del Río Tijuana aplicada al análisis de uso de suelo a nivel regional. Tesis Maestría en Ciencias (Geología). División de Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. México.
- Chiappy, C., Gama, L., Giddings, L., Rico, V., Velázquez, A. 2000. Caracterización de los paisajes terrestres actuales de la península de Yucatán. *Investigaciones Geográficas (Mx)* 28–39.
- Coke, J. 2004. Geography of caves in Quintana Roo. *Association for Mexican Cave Studies Activities Newsletter* 27, 93–97.
- Cotler, H. 2003. El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta ecológica* 33–42.
- De Pedraza, G.J. 1996. Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones. Rueda, España.
- Espinasa, P.R. 1990. Carso. In: Atlas Nacional de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Espinoza, L.M. 2005. Morfoedafogénesis: un concepto renovado en el estudio del paisaje. *Ciencia Ergo Sum* 12, 162–166.
- Ford, D.C., Williams, P. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons.
- Frausto, O., Ihl, T. 2008. Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. Estudio Geohidrológico Del Norte De Quintana Roo, México.
- Frausto, O., Ihl, T., Giese, S., Cervantes, A., Gutiérrez, M. 2010. Vulnerabilidad a la inundación en las formas exocársticas del noreste de la Península de Yucatán. VI Seminario Latino-Americano de Geografía Física II Seminario Ibero-Americano de Geografía Física Universidad de Coimbra. Portugal.
- Gaona, S.T., de Anda, G., Villasuso, M. 1980. Cenotes, karst característico: mecanismo de formación. *Inst. Geol. Rev* 4, 32–36.
- García, G., Padilla, J., Salazar, E. 2000. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico del estado de Quintana Roo. In: Vester, F.M.H. (Ed.), *Influencias de Huracanes En El Paisaje de Yucatán Consideraciones Para El Diseño de Corredores Biológicos Y Su Monitoreo*. Reporte de trabajo, CICY, UQROO, UNAM, ECOSUR, pp. 32–53.
- Goldscheider, N., Drew, D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*, 26. Psychology Press.
- Gutiérrez, M. 2008. Geomorfología. Pearson, Madrid.
- Héraud-Piña, M. 1996. *Le Karst du Yucatan: Pays des Mayas*. Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux.
- Ihl, T., Frausto, O., Rojas, J., Giese, S., Goldacker, S., Bautista, F., Bocco, G. 2007. Identification of geodisasters in the state of Yucatán, Mexico. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen* 246, 299–311.
- Jiménez, R. 2013. Clasificación y caracterización de los suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico (Maestría en Ciencias). Colegio de Posgraduados, Cárdenas, Tabasco.
- Lazcano, C. 1985. The deep cenotes: Association for mexican cave studies. *Activitites newsletter* 15, 70–75.
- Lugo, J. 1990. El relieve de la República Mexicana. *Instituto de Geología* 9, 82–111.
- Lugo, J., Aceves, J., Espinasa, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología. UNAM* 101, 143–150.
- Mecham, 2005. Quintana Roo Speleological Survey [www Documento]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrss.htm> (acceso 12.19.13).
- Mendoza, M., Bocco, G. 1998. La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica. *Serie Varia* 17, 25–55.
- Moreno, C., 1992. *Fundamentos de Geomorfología*. Trillas, México.
- Ordoñez, I., García, M. 2010. Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *Revista Electrónica de Medioambiente* 15–35.

- Palacio, G., Medina, V., Bautista, F. 2005. Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: enfoques geomorfológico, pedológico y geopedológico. En: Caracterización Y Manejo de Suelos En La Península de Yucatán. UACAM-UADY-INE, México.
- Paviopoulos, K., Evelpidou, N., Vassilopoulos, A. 2009. Mapping geomorphological environments. Springer, New York.
- Toledo, V.M., Moguel, P. 1992. Ecología, geografía y producción rural: El problema de la conceptualización de la naturaleza. Relaciones 12, 7–22.
- Zinck, J.A. 1989. Physiography and Soils. ITC, Netherlands.
- Zinck, J.A. 1994. Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century. FAO-ITC, Enschede, Netherlands.
- Zinck, J.A. 2012. Geopedología. ITC, Enschede, Netherlands.

CAPÍTULO II. ÁREA DE ESTUDIO

Resumen

El estado de Quintana Roo se ubica en la porción este de la Península de Yucatán, tiene una extensión de 50 843 km² y una población reportada en el 2011 de 1 253 578 habitantes. Predomina el relieve de baja altura, presenta clima cálido con lluvias principalmente en verano, una temperatura media anual de 27.6°C y una precipitación media de 1263.3 mm anuales. Se encuentra sobre una estructura de origen sedimentario del Terciario y del Cuaternario, compuesta principalmente por calcita, dolomía y en menor proporción yeso. Son pocos los ríos superficiales, la mayor parte del agua se mueve a nivel subterráneo y son abundantes los cenotes. Los grupos de suelo más abundante son los Leptosoles (77%), Phaeozems (7.3%), Vertisoles (6.7%) y Gleysoles (4.5%), sobre ellos se ha desarrollado vegetación de selva mediana y baja principalmente. La actividad agrícola ocupa menos del 20% de la superficie estatal, el maíz y la caña de azúcar los principales cultivos y hacia el sur la producción forestal maderable.

2.1 Quintana Roo

En 1902 surge el estado de Quintana Roo como Territorio bajo decreto constitucional del presidente Porfirio Díaz y es decretado como Estado Libre y Soberano el 8 de octubre de 1974. Se encuentra ubicado en la provincia fisiográfica XI, conocida como Península de Yucatán, al sureste de la República Mexicana, entre los paralelos 17°49' y 21°36' y los meridianos 86° 44' y 89°24'52". Presenta límites nacionales con los estados de Yucatán y Campeche al oeste, límites internacionales al sur con Belice y Guatemala, al este y norte sus costas son bañadas por el Mar Caribe y el Golfo de México, respectivamente. Tiene una extensión territorial de 50 843 km², que representa el 2.5 % de la superficie del país y cuenta con 865 km de litorales que son el 7.46 % del total nacional (UQRoo, 2004a).

Frente a las costas del Estado se encuentran varias islas, entre ellas destacan en la costa del Golfo de México la Isla de Holbox, con población principalmente pesquera, sobre el mar Caribe se encuentran de norte a sur las islas Contoy, hoy área natural protegida, Isla Mujeres centro poblacional y turístico, isla Cancún donde se encuentra el principal desarrollo turístico del norte, Isla Cozumel, la mayor de todas, con una extensión de 477 km² destaca como centro turístico, Isla Tamalcab frente a la Bahía de Chetumal y Banco Chinchorro, que es un arrecife de formación coralina (Aguirre *et al.*, 2010).

El Estado se encuentra dividido en 10 municipios siendo de norte a sur Isla Mujeres, Lázaro Cárdenas, Benito Juárez, Solidaridad, Cozumel, Tulum, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos, Bacalar (formado en 2011) y Othón P. Blanco, la capital es Chetumal y se ubica en la parte sur del Estado (Figura 2.1).

Quintana Roo tiene una población de 1 253 578 habitantes (el 1.1% del país) y un índice de crecimiento poblacional de 3.1%, uno de los más altos del país (COESPO, 2011), desarrollado a partir de la década de los 80's, periodo en el que inicia el crecimiento de la actividad turística en el Estado (Cuadro 2.1).

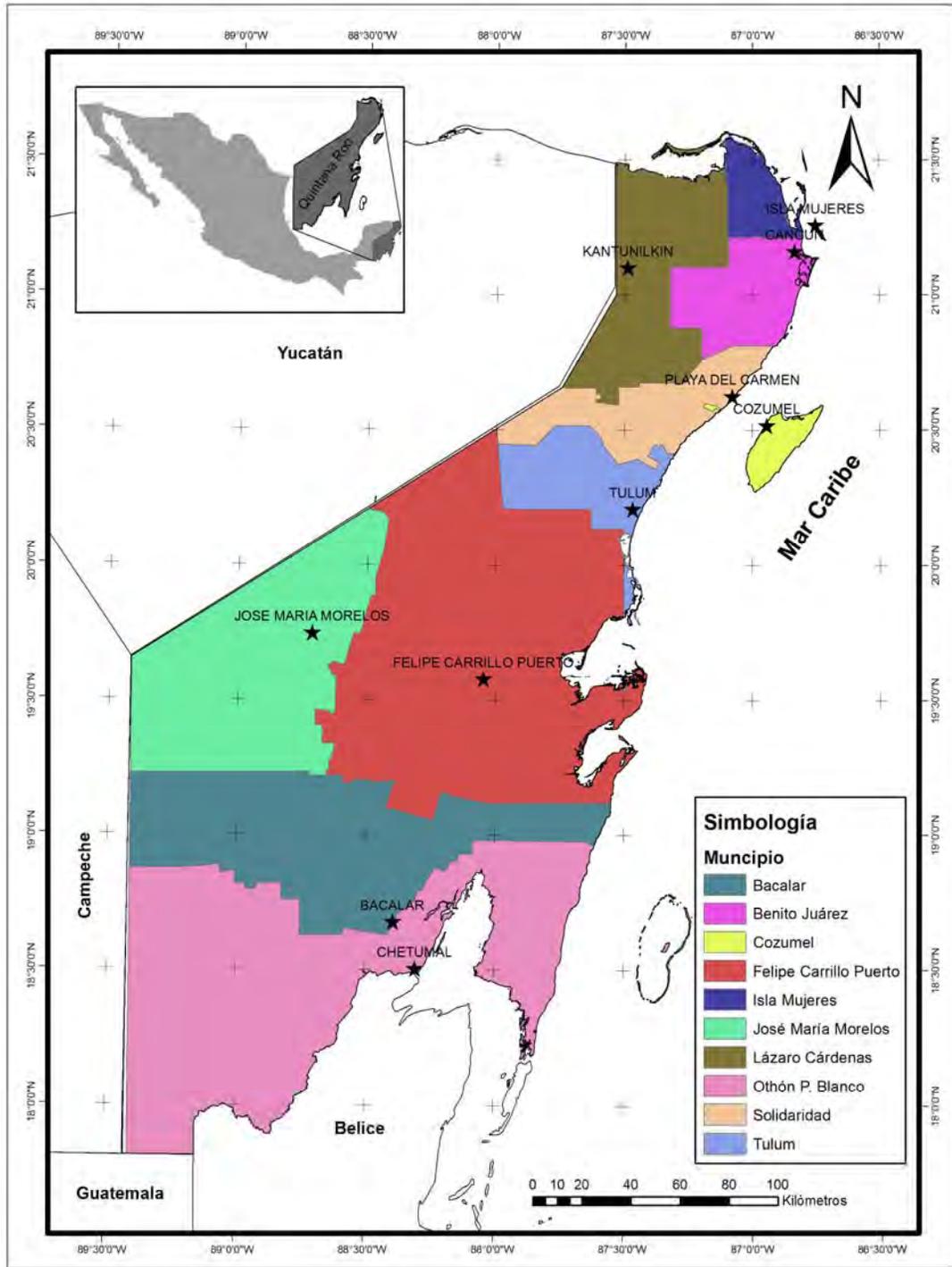


Figura 2.1 Quintana Roo y sus municipios
 Fuente: Tomado de Pereira *et al.* (2013).

Cuadro 2.1 Número de habitantes por Municipio

Municipio	Población	Porcentaje
Isla Mujeres	16 184	1.2
Lázaro Cárdenas	25 391	1.9
Tulum	28 263	2.1
Bacalar	38 741	2.9
José María Morelos	42 251	3.1
Felipe Carrillo Puerto	78 395	5.8
Cozumel	79 535	5.9
Solidaridad	159 541	11.8
Othón P. Blanco	223 572	16.5
Benito Juárez	661 186	48.9
Total	1 353 059	100.0

Fuente: Coespo, 2011.

La Provincia fisiográfica XI Península de Yucatán se divide en tres subprovincias, las tres tocan el territorio de Quintana Roo: el Karst Yucateco, se ubica en la parte norte y centro del Estado, se caracteriza por ser una llanura con piso rocoso o cementado y con hondonadas someras; el Karst y Lomeríos de Campeche, en la parte oeste se compone de lomeríos bajos con hondonadas y la Costa Baja de Quintana Roo al este, se define como una llanura inundable con piso cementado y salino (Cervantes *et al.*, 1990).

En el norte y oriente del Estado predomina el relieve plano y hacia el oeste predominan planicies y mesetas kársticas escalonadas, al sur, en los límites con Campeche y Guatemala se localizan las mayores elevaciones, encontrándose altitudes de hasta 380 msnm; al oeste en los límites con Yucatán se presentan alturas menores de 140 msnm y va disminuyendo hasta llegar a cero conforme se aproxima la costa (UQRoo, 2004a).

Las costas de Quintana Roo se caracterizan por presentar aguas muy claras de poca profundidad sobre rocas calcáreas de origen biogénico que produce colores de azul a verde, arena de color blanco con textura fina que han convertido al Estado en un importante centro turístico (Figura 2.2).



Figura 2.2. Dos imágenes de las costas de Quintana Roo Tulum y Xcacel, respectivamente.

2.2 Clima

De acuerdo a los datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2012), la temperatura media anual para todo el Estado es de 25.8°C, el mes más caliente es junio con 27.6°C y el mes más frío enero con 23.2°C. La precipitación media anual es de 1263.3 mm, siendo el mes con mayor precipitación septiembre con 207.5 mm y el de menos marzo con 32.2 mm (Figura 2.3).

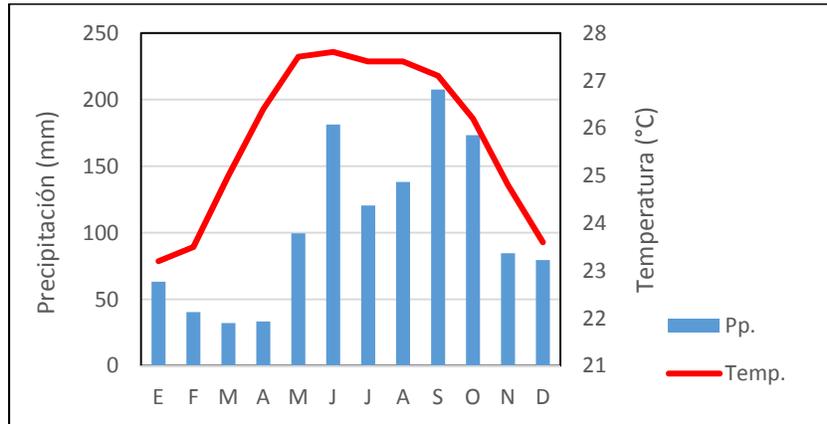


Figura 2.3. Climograma de Quintana Roo

Fuente: elaboración propia con datos de CNA (2012).

En el Estado existen 38 estaciones meteorológicas registradas, pertenecientes a la CNA, de las cuales 12 están automatizadas, de acuerdo con los datos climáticos de 1945 a 2005 y basados en la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (García, 1983), el Estado de Quintana Roo presenta los siguientes tipos de clima (Figura 2.4):

- Am (f) i Cálido húmedo con lluvias todo el año, isotermal es decir la diferencia de temperaturas entre el mes más caliente y el más frío es menor a 5°C. Se presenta solo en la isla de Cozumel.
- Aw₂(x') i w'' Cálido subhúmedo, con lluvias en verano es el más húmedo dentro de esta categoría, más de 10.2 mm de lluvia invernal, es isotermal con presencia de sequía intraestival (canícula). Se distribuye en la franja costera occidental, desde Puerto Morelos hasta Xcalak y en el extremo sur en los límites con Belice y Guatemala.
- Aw₁(x') i w'' Cálido subhúmedo, con lluvias en verano, régimen de humedad con más de 10.2 mm de lluvia invernal, es isotermal con presencia de sequía intraestival. Este clima se ubica al norte y al sur del tipo w₂.
- Aw₁ i w'' Cálido subhúmedo, con lluvias en verano, régimen de humedad intermedio, entre 5 y 10.2 mm de lluvia invernal, isotermal con presencia de sequía intraestival. Es el tipo que ocupa la mayor extensión del Estado, se presenta al oeste y se prolonga hacia los estados de Campeche y Yucatán.
- Aw₀(x') i w'' Cálido subhúmedo, es el menos húmedo de dentro de esta categoría, con más de 10.2 mm de lluvia invernal, es isotermal con presencia de sequía

intraestival. Está presente en el extremo norte del Estado, entre Puerto Morelos y Chiquilá; y en otras dos pequeñas zonas, una localizada al oeste de Felipe Carrillo Puerto y la otra, al oeste de la laguna de Bacalar.

Aw₀ i w” Cálido subhúmedo, el menos húmedo entre los húmedos, lluvias de verano, entre 5 y 10.2 mm de lluvia invernal, isotermal y con sequía intraestival. Se ubica en el centro oeste del Estado que corresponde al centro de la Península de Yucatán

En el Estado, la precipitación pluvial anual varía de 900 a 1500 mm como promedio anual, las zonas con mayor precipitación se encuentran junto a la costa, en la parte centro-este, en el extremo sur y en Cozumel; a partir de estos puntos va disminuyendo hacia el norte y hacia el sur, la menor precipitación se ubica en el extremo norte con 913 mm anuales.

La evaporación media anual varía entre los 1100 mm y los 1500 mm, llegando en ocasiones a superar la precipitación. Se reporta para el Estado una evapotranspiración muy alta (mayor al 85%) y una evapotranspiración potencial de 1600 mm (García *et al.*, 2000).

Los vientos dominantes son los alisios que se presentan casi todo el año con dirección del este al oeste o suroeste. De mayo a noviembre es la temporada de huracanes, las costas del Estado se han visto azotadas por una gran cantidad de huracanes, se destacan en los últimos años por su magnitud Emily, Stan y Wilma en 2005 categoría cinco de acuerdo a la escala Saffir-Simpson; Dean categoría cinco en 2007; Dolly categoría dos, en 2008 y, en 2009, pasó a 80 km de Cancún el huracán Ida categoría dos (CNA, 2012).

2.3 Geología

La Península de Yucatán y, por lo tanto Quintana Roo, es una estructura de origen sedimentario, se remonta a las formaciones del Mesozoico, sobre las cuales se depositaron arenas y estructuras de origen orgánico marino durante el Terciario, dando forma a una planicie compuesta principalmente de rocas calizas que descansan sobre un basamento platafórmico del paleozoico con profundidad mayor a los 2000 m (Ordoñez y García, 2010). Los tipos de calizas sedimentarias que se encuentran son principalmente de tipo boundstone, grainstone y wackstone, dependiendo de las proporciones entre los elementos componentes y la velocidad de deposición (Bonet y Butterlin, 1962; Butterlin y Bonet, 1963).

La formación empezó a ascender a pausas y retrocesos durante toda la era Cenozoica. Este proceso continuo de emersión y sumersión, permitió el afloramiento por procesos erosivos de los sedimentos del Paleoceno que conforman la plataforma básica de la península, la cual consiste principalmente en evaporitas, areniscas y carbonatos que dieron origen a las rocas caliza, dolomitas y yeso (Lopez-Ramos, 1975). Durante el Eoceno se presentaron una serie de eventos geológicos que plegaron los recién formados estratos de calizas dando origen a un relieve ondulado, definiendo las geoformas actuales al sur (Bautista *et al.*, 2005a).

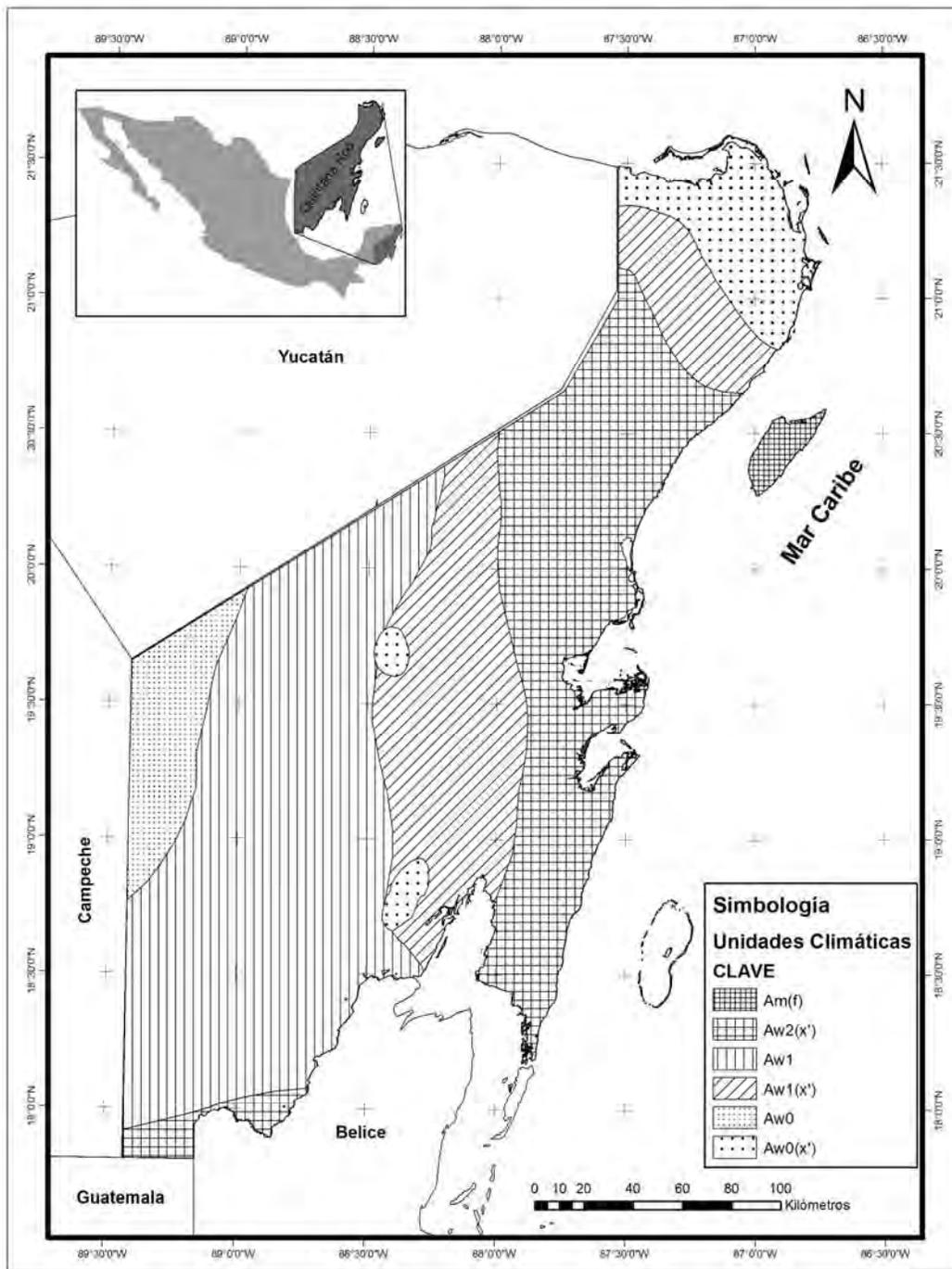


Figura 2.4 Subtipos de clima en el estado de Quintana Roo
Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2008a).

La plataforma calcárea tal como la conocemos hoy, inicio su emersión sobre el nivel del mar durante el Oligoceno y Mioceno en la parte sur, el resto se levantó gradualmente a partir del Plioceno y en el Cuaternario el ascenso continuó al norte y hacia la periferia (Bonet y Butterlin; 1962; López, 1975; Lugo *et al.*, 1992). En este periodo se originaron dos sistemas de fracturas de acuerdo a Bautista *et al.* (2005a), una con orientación noreste–suroeste a lo largo del cauce del río Hondo y otra orientada al noroeste–sureste a lo largo de la “Sierrita de Ticul”.

Durante el Holoceno, el nivel del mar disminuyó por debajo del nivel actual, comenzando el depósito de sedimentos carbonatados del Cuaternario en las áreas costeras actuales. Hoy en día la emersión de esta placa continúa, en parte por la misma dinámica de las placas tectónicas, en particular la placa Caribe y en parte por la continua deposición de materiales sobre la misma, este efecto es más claramente visible en la zona Norte del Estado.

En el Programa Estatal de Ordenamiento Territorial (UQRoo, 2004a) señala que en la superficie de Quintana Roo se observan cuatro unidades o geosistemas principales:

1. Al norte, una planicie estructural altamente permeable con una ligera inclinación al norte y con un sistema de fallas dirección (NO-SE) el drenaje superficial es típicamente kárstico debido a la naturaleza suave y porosa de los sedimentos que conforman la estructura, domina una planicie con lomeríos de poca altura y se manifiesta una ausencia total de escurrimientos superficiales dificultando la delimitación de cuencas o subsistemas en la región.
2. Al sur, alternan planicies internas con mesetas de desarrollo kárstico que alcanzan los 380 msnm, en ésta región se pueden observar diversas unidades litológicas de origen sedimentario con depósitos calcáreos y detríticos de diferentes edades, es posible encontrar expuestos algunos afloramientos del terciario inferior que presentan en su base lutitas de color verde con abundantes formaciones yesosas.
3. Al este, sobre la línea de costa se aprecia un geosistema conformado por bloques de hundimiento producto de actividad tectónica en el que abundan los depósitos detríticos, eólicos, litoral, lacustre y palustre, la conformación principal está dada por materiales ligeros sedimentados, arena con conchas, lodo calcáreo, arcilla y arena.
4. En la región Oeste y sur del Estado, dominan rocas calizas del Paleoceno, son calizas arcillosas, parcialmente silicificadas, de color café amarillento, con presencia de nódulos de pedernal y microfauna mal preservada. Normalmente se encuentran cubiertas por una capa de caliche y por arenas margosas. Estas rocas forman los afloramientos más antiguos del área.

2.3.1 Formaciones Geológicas

De acuerdo al estudio de Prospección Geológico Petrográfica de la Península de Yucatán elaborada por (PEMEX, 1967) y (López-Ramos, 1981) la roca más abundante en la entidad es la sedimentaria, tanto del Terciario (89.5%) como del Cuaternario (10.1%). La

composición geológica de Quintana Roo puede resumirse en tres estratos fundamentales en términos de su edad y sirven de basamento para su estructura geomorfológica:

I. Formaciones antiguas.- se localizan en la región sur y oeste del Estado.

- Formación Calizas del Petén. Es una capa que se caracteriza por la escasez de fósiles. Contiene fundamentalmente calizas compactas y cristalinas de colores amarillo, crema y blanco, su textura va del grano más fino a granos gruesos. Se encuentran fundamentalmente en las regiones centro y sureste del municipio de Othón P. Blanco.
- Formación Icaiché. Su composición es semejante a la anterior, se distingue por la presencia de capas yesosas que rompen la continuidad de la estructura caliza. Se encuentra en la zona de los límites de Quintana Roo con Campeche.
- Formación Chichén-Itzá. Esta formación contiene rocas calizas de colores blanco, amarillo y gris con impurezas, se encuentran abundantes inclusiones ya sea aisladas o en capas delgadas de tipo cristalino macizo, muy probablemente de origen aluvial.

II. Formaciones intermedias.- forman el cuerpo principal del Estado en extensión.

- Formación Bacalar. Está constituida por calizas de tipo cretoso de color blanco-amarillentas y blandas. Forma estructuras hemisféricas en los estratos superiores en tanto que se constituye en láminas arcillosas en sus niveles inferiores (sahcab, saskab), pueden observarse algunas inclusiones laminares de yeso y de esferoides calizos de color amarillento. Sobre éstas rocas se forman láminas duras de color gris oscuro a negro. Se pueden encontrar en las cercanías de la Laguna Bacalar, de donde toma su nombre.
- Formación Estero Franco. Esta formación se compone fundamentalmente de masas de rocas calizas del Valle del Río Hondo, con carbonatos amarillo en capas regulares delgadas y muy cristalinas semejando el aspecto de la aragonita. En los niveles superiores las capas son macizas de color blanco o rosa, tiene un espesor calculado de aproximadamente 100 m. Se ubica en el sureste de la fractura que da origen al Río Hondo penetrando en territorio Beliceño.
- Formación Carrillo Puerto. Se caracteriza porque en los niveles inferiores de sus losas existen capas de conchillas cementadas (coquinas) recubiertas por calizas duras de color amarillento con restos de moluscos y madréporas incluidos. Encima de estas losas hay calizas arenosas impuras y no cementadas de colores amarillo, rojizo y blanco. Se extiende desde la población de Pedro Antonio de los Santos hacia el norte del estado por la parte oriental hasta unos kilómetros al norte de Cancún y por toda la costa de la Bahía de Chetumal hacia el sur hasta la desembocadura de Bacalar Chico.

III. Formaciones recientes (Cuaternario).- comprende una sola formación la cual puede separarse en varias capas desde el punto de vista fosilífero pero geológicamente constituye una sola capa que puede llamarse actual o superficial.

- Formación Holoceno - Pleistoceno. Se caracteriza por estar formada de capas de coquinas de color crema con grandes cantidades de conchas de moluscos, se puede

identificar una franja de aproximadamente 15 Km de ancho en toda la zona Norte del Estado.

En el Cuadro 2.2 y en la Figura 2.5 pueden apreciarse las formaciones geológicas antes mencionadas.

Cuadro 2.2 Estratigrafía de Quintana Roo.

Cronoestratigrafía			Formación	Tipo de Roca
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno - Pleistoceno 0 a 1.8 Ma	Holoceno - Pleistoceno	Calizas, coquinas color crema con grandes cantidades de moluscos. Arenas. Depósitos aluviales, eólicos, lacustres, litorales y palustres
		Terciario	Plioceno 1.8 a 5 Ma	Carrillo Puerto
	Mioceno - Oligoceno 5 a 36 Ma	Estero Franco	Calizas de color amarillo, cristalinas y calizas blanco o rosa	
		Bacalar	Lutitas y calizas cretosas de color gris y blanco con coquinas	
	Eoceno 36 a 55 Ma	Chichen Itzá	Calizas blancas, amarillo y gris microcristalinas con impurezas, en el sur cristalinas, macizas y de aspecto marmoleado	
	Paleoceno 55-67 Ma	Icaiché	Calizas compactas de color blanco a crema con capas yesosas que rompen la continuidad de la estructura caliza con inclusiones de pedernal negro secundario	
Mesozoico	Cretácico	Superior 67 a 99 Ma	Petén	Calizas y dolomías con una delgada capa de arenisca

Ma: millones de años

Fuente: Modificado de López-Ramos (1975), UQRoo (2004a), Ordoñez y García (2010).

Priego *et al.* (2010) señala al relieve como el principal factor de diferenciación preliminar y a grandes rasgos de los paisajes, de acuerdo a Lugo *et al.* (1992), en la Península la estructura general del relieve tiene una gran relación con la estructura geológica, el levantamiento a partir del Mioceno en la parte sur del Estado, que continuó en el Pleistoceno y en el Cuaternario en dirección noreste está afectado en mayor grado por una erosión diferencial que origina un relieve de lomas y planicies, en la parte norte se produce un relieve muy joven de planicies basculadas formado por rocas muy resistentes y una disección en el subsuelo controlada por la fractura de rocas dando como resultado un sistema complejo de formas cársticas.

La morfología del relieve en el Estado es el resultado de un intenso intemperismo que actúa sobre las rocas calcáreas del Terciario, las que debido a la intensa precipitación, al clima y

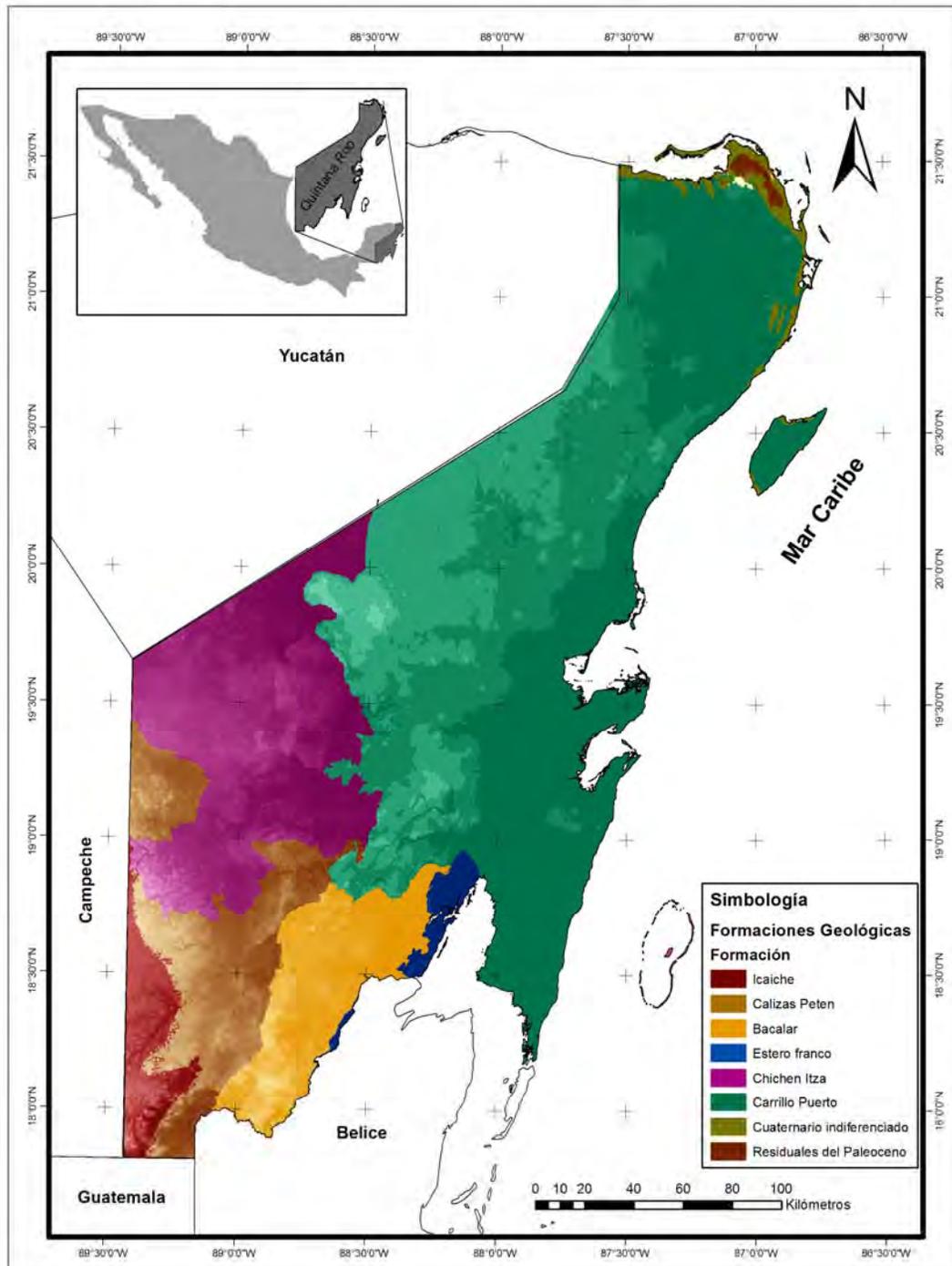


Figura 2.5 Formaciones geológicas en el estado de Quintana Roo
 Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2000a).

a su posición estructural sufren una intensa disolución ocasionando una superficie rocosa cárstica ligeramente ondulada; en donde el relieve más marcado se encuentra en la parte suroeste del Estado, predominando el relieve kárstico, con modificaciones causadas por la disolución, alteración de las rocas y por la acumulación en las partes bajas de arcillas de descalcificación. En la parte centro-este y norte del litoral la planicie calcárea fue modelada por una intensa disolución, manifestada por la presencia de rasgos de disolución: dolinas, acumulación de arcillas de descalcificación y cenotes. Durante el Cuaternario esta planicie fue modificada por la formación de pantanos y lagunas, así como por la acumulación de abundantes depósitos de litoral, litificación de depósitos eólicos y por la formación reciente de dunas arenosas.

2.3.2 Fallas y fracturas

La Península de Yucatán no ha dejado de emerger, la actividad neotectónica ha provocado un levantamiento basculado principalmente en el sur, junto con un desplazamiento a favor de las manecillas del reloj (Lugo *et al.* 1992; Morales, 2009), lo que ha originado un sistema de fracturas orientados al norte y al noreste; los mismos autores señalan que las fisuras, fracturas, fallas y diaclasas sobre las rocas son los elementos que controlan la posición de las formas cársticas debido a que en ellas se produce la disolución en mayor intensidad.

Las fallas que se manifiestan como depresiones alargadas de 10 a 20 m de profundidad y varios centenares de metros de ancho, al llenarse con escurrimientos de agua de las zonas más altas o con afloramientos de manantiales subterráneos forman lagunas interiores que son características en el sur de Quintana Roo como Bacalar, Guerrero y Milagros o en cuencas escalonadas forman cenotes (Morales, 2009). Así, desde el punto de vista de la formación del Karst, las fisuras y fracturas de las rocas juegan un papel destacado (Perry *et al.*, 2002).

La distribución de fallas en Quintana Roo no es homogénea, por el contrario, a pesar de que se encuentran repartidas en la mayor parte del Estado, tienden a concentrarse más en algunos sitios por tal razón con la información de fracturas y fallamientos, disponibles en las coberturas del INEGI 1:250000, se calculó en Arc Gis su densidad y se clasificó en tres categorías: alta, media y baja; como un elemento adicional necesario para los análisis posteriores, la información resultante aparece en la Figura 2.6.

Se observan los valores densidad de fallas más altos en la parte central del Estado, en Carrillo Puerto; en el extremo norte del territorio; en la costa este, en Majahual y en el extremo sur. Las zonas con densidades menos altas abarcan áreas bien definidas y distribuidas rodeando a las zonas de más alta densidad, además de las áreas cercanas a la costa al oeste y en el sur, a lo largo del Río Hondo y el sistema de lagunas de Bacalar. En la parte centro-oeste del Estado, en José María Morelos al igual que en el extremo noreste se observan áreas con las densidades de fallamientos más bajas en donde la información cartográfica reporta escasa cantidad de fallas.

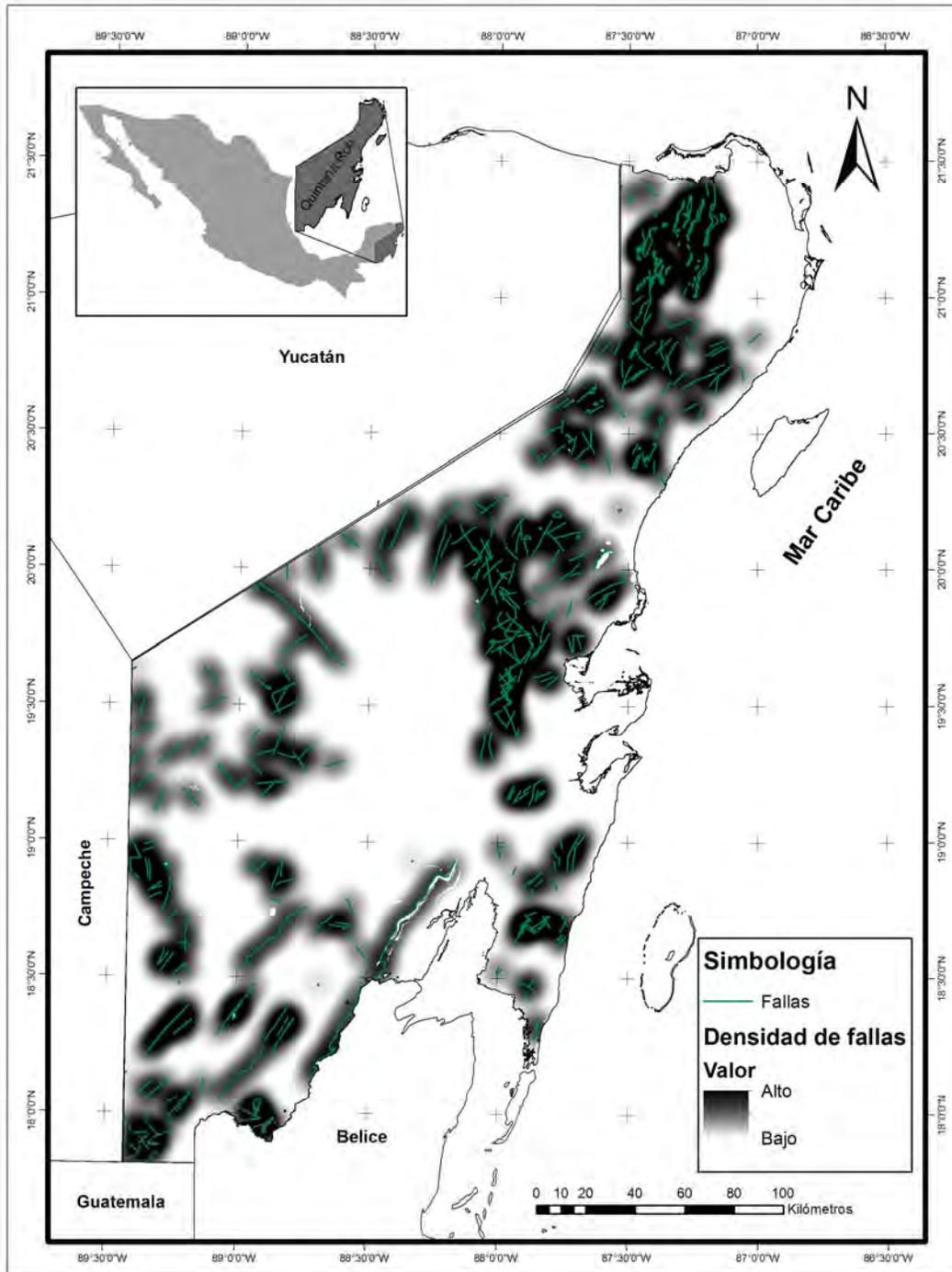


Figura 2.6 Fallas y densidad de fallas en el estado de Quintana Roo
Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI (2002a).

2.3.3 Litología superficial

Amplias zonas en el Estado se caracterizan por ser lugares en dónde se acumulan materiales provenientes del intemperismo y erosión de la roca, en función del factor de transporte se clasifican como aluvial, lacustre, palustre, eólico, coluvial o litoral (Blyth y De Freitas, 1998). En Quintana Roo están presentes depósitos aluviales que consisten en materiales transportados y depositados por el agua de zonas con mayor altura hacia zonas más bajas, este tipo de depósitos los encontramos en la parte sur y oeste en las zonas de lomeríos y colinas (Figura 2.7).

Los depósitos lacustres son materiales movidos por los cuerpos de agua, los encontramos en las planicies cercanos a los cuerpos de agua y a las zonas de inundación principalmente en las zonas cercanas a la costa.

Las zonas de litoral tienen influencia de las corrientes fluviales, el oleaje y las mareas que les permite acumular materiales arenosos en las zonas costeras, en el Estado tenemos la formación de dunas arenosas principalmente en la zona norte y en la Costa Maya.

Las zona palustres son zonas de inundación superficial (menos de un metro) con altos contenidos de materia orgánica, materiales arcillosos y limosos, en el Estado se encuentran áreas palustres cerca de las zonas costeras al este de la laguna de Bacalar, en la zona de Majahual y en las Bahías de Ascensión y Espíritu Santo (INEGI, 2000a).

2.4 Hidrología

En Quintana Roo la elevada cantidad de precipitación y la gran capacidad de infiltración del terreno provocan que la mayor cantidad agua, cerca del 80%, se mueva a nivel subterráneo y, el restante 20%, se distribuya entre lo que intercepta la vegetación, el escurrimiento superficial y la captación directa de los cuerpos de agua: áreas de inundación, lagunas y cenotes (UQRoo, 2004a).

El agua se infiltra a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos en las calizas y evaporitas, produciendo un flujo principal del agua por el subsuelo hacia las costas y finalmente hacia el mar (Prado, 1998). La dirección general del flujo de agua subterránea en la Península de Yucatán es radial a partir de la porción más alta que se localiza en la parte centro-sur de la Península y hacia la costa (Figura 2.8).

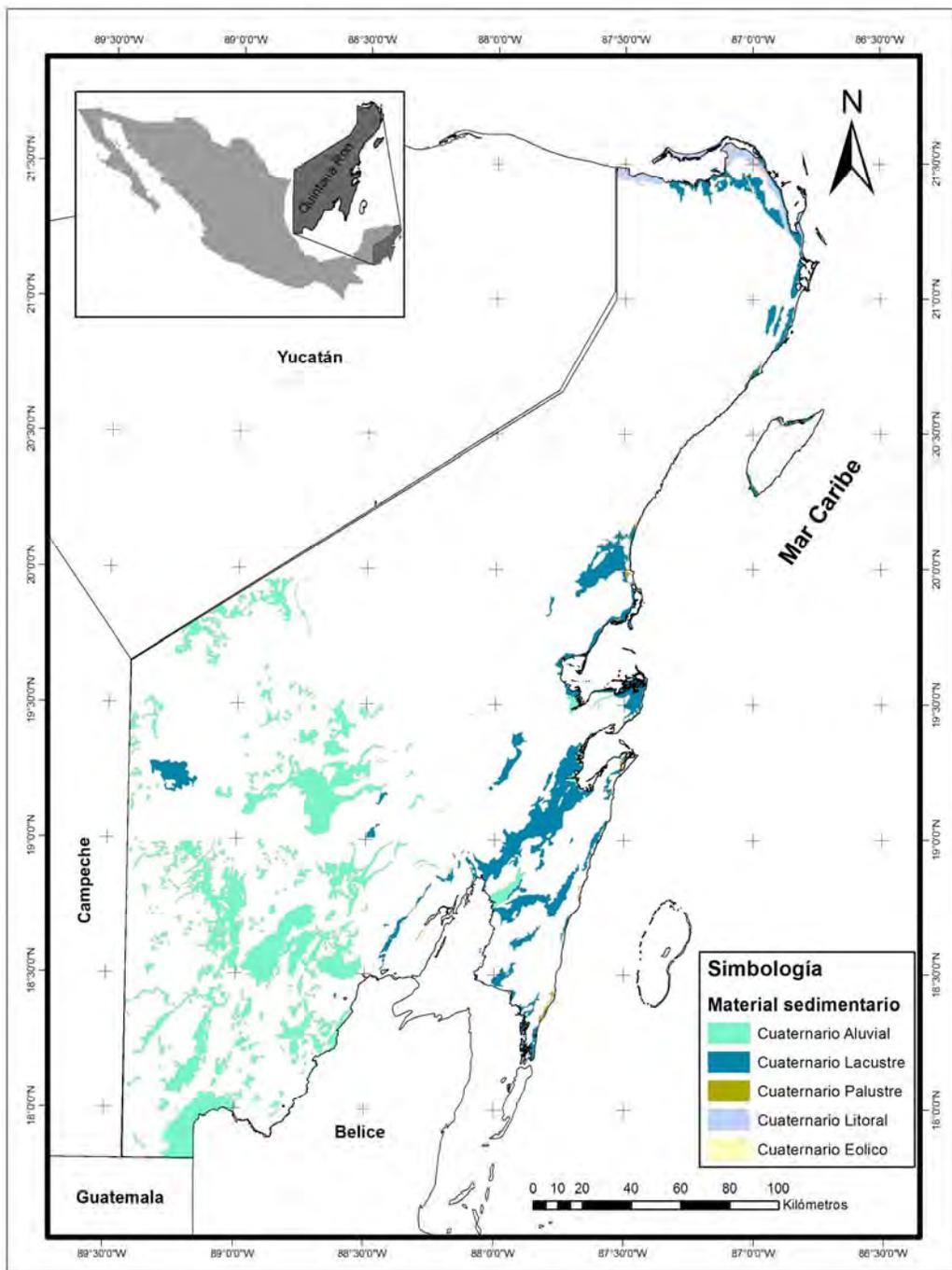


Figura 2.7 Material sedimentario del cuaternario del estado de Quintana Roo.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2000a).

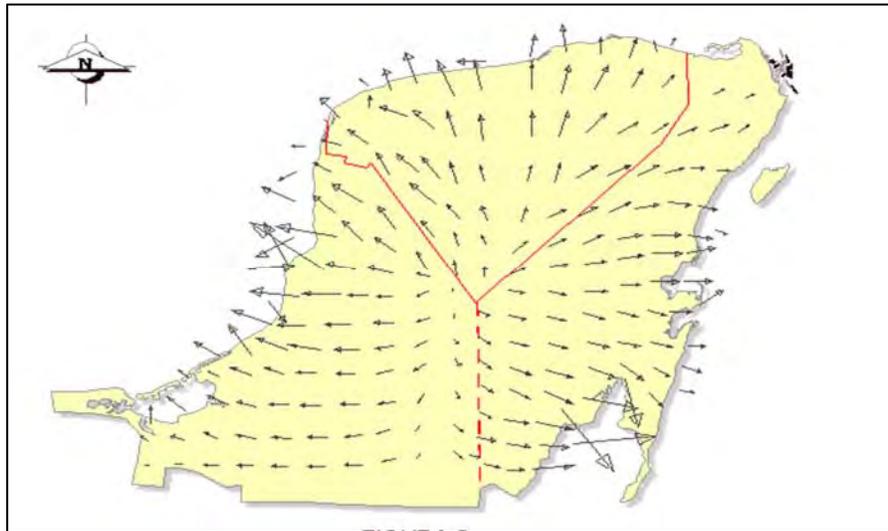


Figura 2.8 Dirección de flujo a nivel regional en la Península de Yucatán.
Fuente: Tomado de Prado (1998)

Se considera que al flujo está a poca profundidad y llega a aflorar en cenotes y lagunas intermitentes, los cuáles son muy frecuentes en el Estado. Algunos estudios espeleológicos sobre cuevas y cenotes como los de Coke (2004), Meham (2005), Ordoñez y García (2010) que han llevado al descubrimiento de más de 900 km de galerías subterráneas inundadas y cavernas consideradas entre las más grandes del mundo, como los sistemas Sac Actun de casi 154 km de longitud y una profundidad de 72 m, Ox Bel Ha de 146 km de largo y profundidad máxima de 33.5 m, Dos ojos con 57 km de largo y 25 m de profundidad, además de Sac Aktun, Nohoch Nah Chich, y Naranjal (QRSS, 2011).

En el Estado existen cuatro zonas geohidrológicas de acuerdo a INEGI (2002):

1. La zona de cerros y valles en el sur y oeste, en dónde se encuentran las mayores alturas del Estado, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 50 a 100 m.
2. Las cuencas escalonadas que se ubican en la parte centro-sur y costera en dónde el nivel freático está a una profundidad promedio de 20 a 50 m
3. La planicie interior que va de la parte centro y hacia el norte, el manto freático va de los 50 hasta un metro en las zonas costeras.
4. Las costas bajas que se ubican en las zonas costeras que va desde la Bahía de la Ascensión en la parte centro del Estado hacia la Bahía de Chetumal en el sur y en las islas, en dónde el manto freático tiene entre uno y 10 m.

La reducida pendiente topográfica propicia que los escurrimientos superficiales sean pocos, de bajo caudal y de muy corto recorrido en Estado a excepción del río Hondo, en el sur, que hace frontera con Belice, este es de carácter permanente, tiene una longitud aproximada de 180 km, una profundidad media de 10 m y una anchura media de 50 m.

Otras corrientes superficiales de menor importancia son Río Escondido en el sur, paralelo al río Hondo con una longitud de 173 km de carácter intermitente, cerca se encuentran los arroyos Azul, Ucum y Dos Naciones, éste último de corta dimensión (30 km) que desemboca sobre la planicie del Río Hondo.

La Comisión Nacional del Agua considera al Estado dentro de dos subregiones dentro de la Región XII, llamada Península de Yucatán, la primera llamada Región hidrológica número 32 Yucatán norte (RH32) y la número 33 llamada Quintana Roo (RH33).

- La primera se ubica en el norte, comprende dos regiones: Yucatán Norte y Yucatán Este, en esta última es donde se encuentran la Cuenca Quintana Roo con aproximadamente la tercera parte de la superficie estatal y las lagunas de Nichupté, Chakmochuk y Conil.
- La segunda que ocupa las dos terceras partes restantes comprende dos cuencas la llamada Bahía de Chetumal en donde se aprecian además de las corrientes superficiales antes mencionadas las lagunas de Bacalar - la mayor de todas con una extensión de unos 55 km y ancho de 2 a 3 km - San Felipe, Mosquitero, Salada, Chile Verde, Mariscal, Nohbec y La Virtud en el sur del Estado y la cuenca Cuencas Cerradas en la parte central tiene a las lagunas de Chunyaxché, Chinchancanab, Campechen, Boca Paila, Paytoro, Ocom y Esmeralda (Figura 2.9).

Además se encuentran una gran cantidad de Cenotes a lo largo y ancho del Estado entre ellos se encuentran el Cocodrilo Dorado, Hidden Worlds, Cenote Azul, Chemuyil, Dos Ojos Tankah y Xel-Ha.

2.5 Suelos

La acción conjunta de cinco factores formadores: roca madre, relieve, clima, vegetación y tiempo junto con los procesos de erosión e intemperismo han hecho que en Quintana Roo se encuentren presentes 12 de los 32 grupos de suelos que hay en México, de acuerdo a la clasificación Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) (INEGI, 2008b). La distribución de los suelos en el Estado no es homogénea, en campo puede observarse en áreas pequeñas la presencia de dos o más tipos diferentes de suelos.

Los grupos de suelos presentes en el Estado y el porcentaje del territorio que ocupan puede observarse en el Cuadro 2.3. Los Leptosoles constituyen el grupo de suelos que abarca el 77.1% de la superficie del Estado, estos suelos se caracterizan por ser suelos delgados (menos de 25 cm de espesor) o con un alto contenido de piedras (más de un 80%), se distribuyen en todo el territorio Estatal, y dominan en la región norte y centro (Figura 2.10).

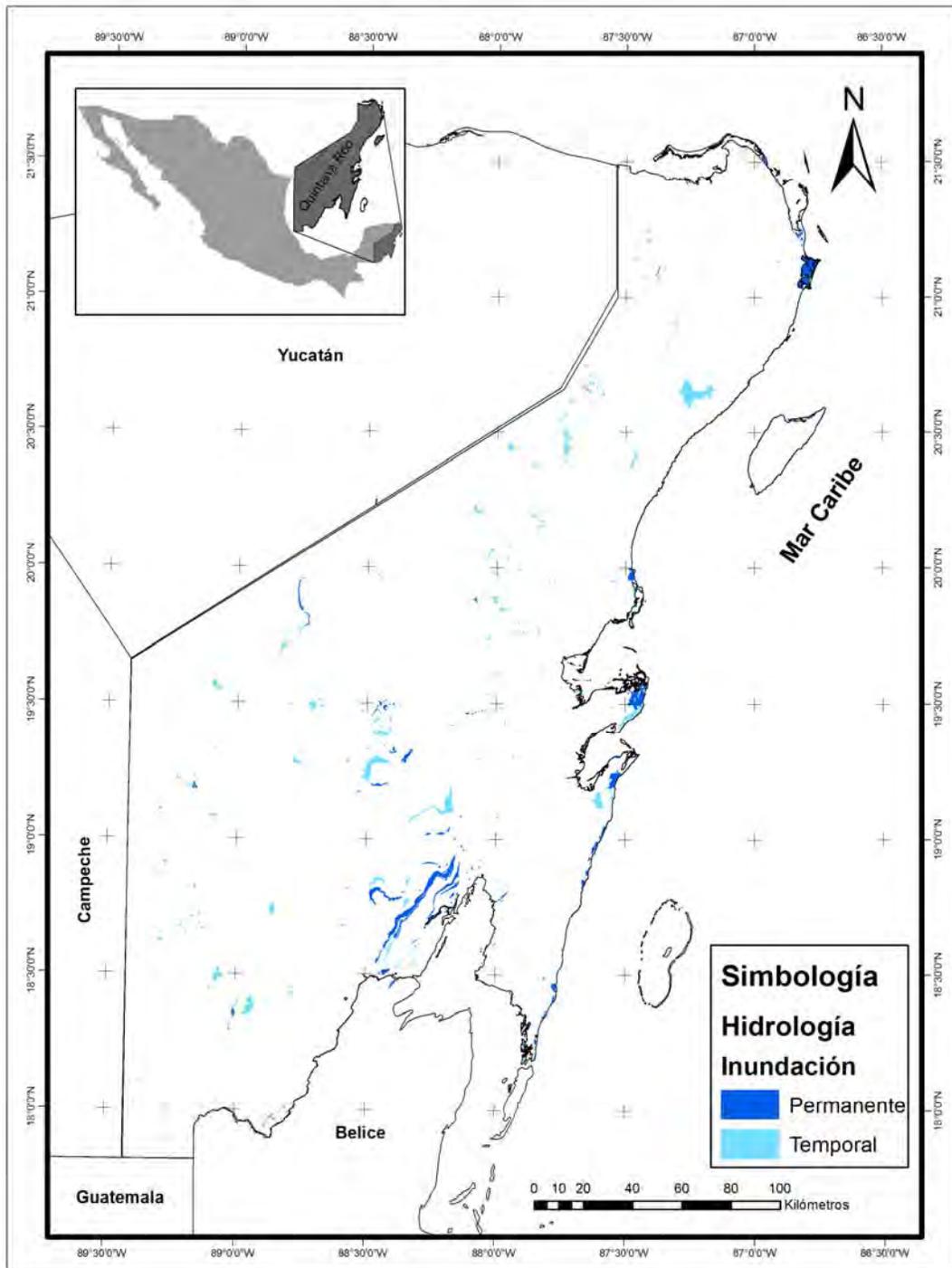


Figura 2.9 Hidrología. Cuerpos de agua del estado de Quintana Roo
 Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2005).

Cuadro 2.3 Grupos de suelo

Grupo	Superficie (ha)	%
Leptosol	31954230.60	77.1
Phaeozem	3030809.81	7.3
Vertisol	2795894.90	6.7
Gleysol	1876004.36	4.5
Luvisol	595922.54	1.4
Solonchak	508112.70	1.2
Arenosol	256796.22	0.6
Regosol	244010.94	0.6
Histosol	81233.67	0.2
Nitisol	68554.56	0.2
Cambisol	46423.56	0.1
Fluvisol	984.90	0.002

Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2008b).

Los Phaeozems constituyen el segundo grupo más abundante (7.3%), son suelos ricos en materia orgánica, se ubican principalmente en el occidente del Estado en las zonas con mayor relieve, normalmente se encuentran asociados con los Leptosoles y Vertisoles.

Los Vertisoles son el tercer grupo (6.7%), son suelos profundos, color café, arcillosos, fértiles, se ubican principalmente en la zona sur y sureste, en dónde se encuentran importantes áreas dedicadas a la agricultura.

Los Gleysoles abarcan el 4.5% del territorio, son suelos de color gris, con mal drenaje, por lo que se ubican principalmente en las zonas de inundación cerca de las zonas costeras del norte y en el centro del Estado.

Los Luvisoles presentes en Quintana Roo ocupan el 1.4%, son principalmente de color rojo, se ubican como manchones en el norte, en el Municipio de Lázaro Cárdenas, en el centro y en el sur (Figura 2.10), son suelos con uso agrícola y forestal.

Los Solonchaks son suelos que se caracterizan por contener un alto contenido de sales, ocupan el 1.2% del territorio y se ubican en zonas costeras

El resto de los suelos (Arenosol, Regosol, Histosol, Nitisol, Cambisol y Fluvisol) se encuentran presentes en menos del uno por ciento cada uno. Los Arenosoles presentan textura gruesa y se ubican en las costas del extremo norte, en el centro, en la zona de las Bahías y en Majahual. Los Regosoles son suelos poco desarrollados sobre roca, se encuentran principalmente asociados a los Leptosoles. Las zonas en donde los Nitisoles y Cambisoles están presentes son escasas en el estado de Quintana Roo y las áreas que presentan este tipo de suelos se encuentran en la parte centro, cerca de los límites con el Estado de Yucatán.

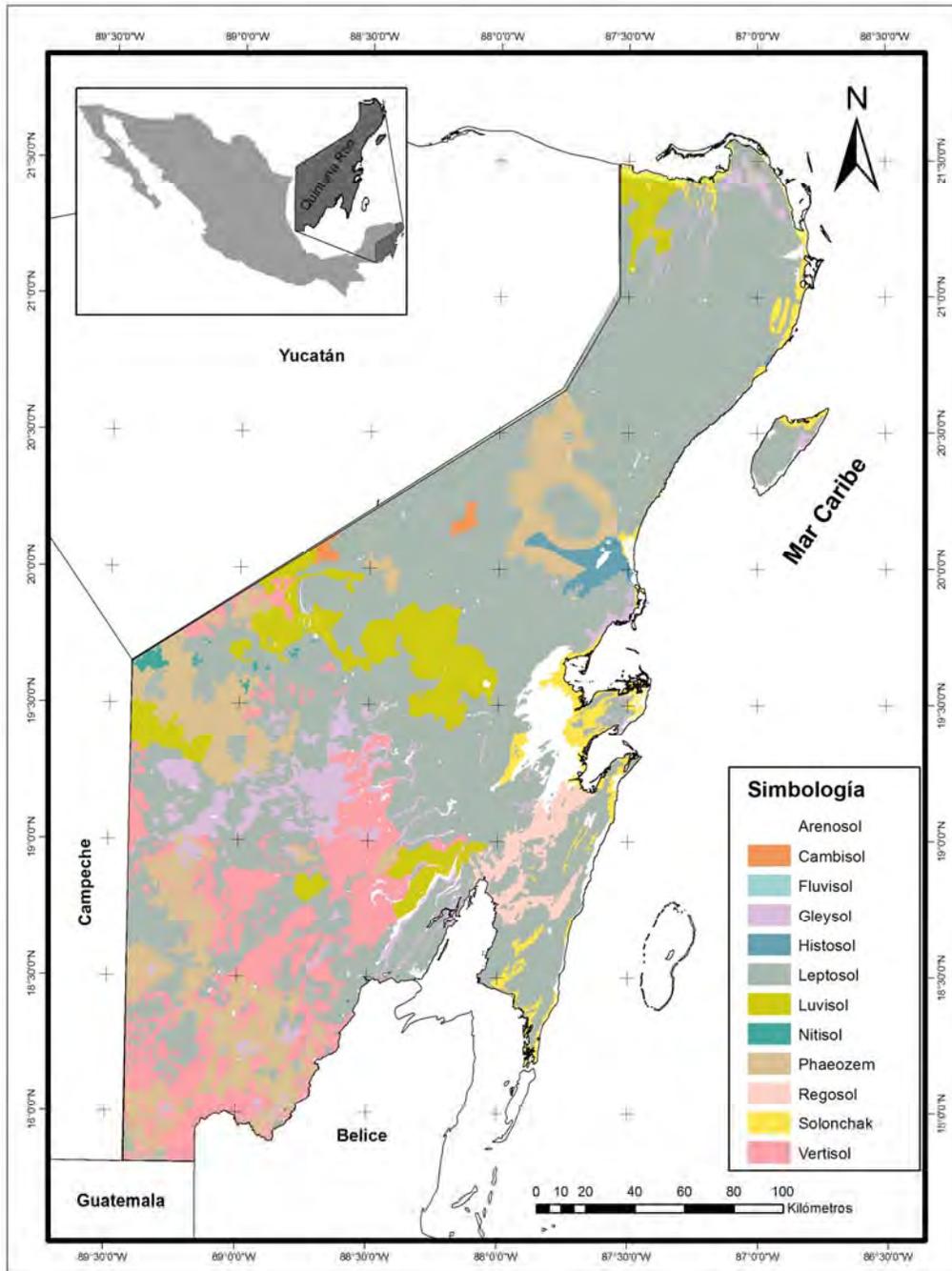


Figura 2.10 Distribución de Suelos el estado de Quintana Roo
Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2008b).

Finalmente los Fluvisoles son el grupo con menor presencia, el área ocupada por este grupo de suelo se ubica en el los alrededores de la Laguna Chichankanab, en el Municipio de José María Morelos.

2.6 Cubiertas vegetales

Quintana Roo es uno de los Estados con la vegetación natural mejor conservada del país, está constituida exclusivamente por asociaciones vegetales de clima cálido que se distribuyen a manera de bandas en sentido Norte-Sur y Este-Oeste en dónde los factores edáficos y climáticos favorecen la distribución de las diferentes especies. Asimismo estas asociaciones se distribuyen acorde con la geomorfología de la Península de Yucatán, es decir, que se manifiestan a manera de amplias franjas dependientes de la antigüedad geológica de los mantos rocosos (Cabrera y Sánchez, 1994).

Las áreas más secas se encuentran en el norte, poseen una vegetación de selva baja caducifolia y, conforme la naturaleza del sustrato, se hace más evolucionada (pasa de suelos delgados y rocosas a suelos profundos y pedregosos) y las precipitaciones anuales se incrementan, la vegetación va cambiando a selvas medianas y altas (subperennifolias y perennifolias) en dónde destacan especies de uso maderable como el tzalám, jabín, chobenché, cedro, caoba, ceiba o yaxché, pucté, granadillo, zapote y guayacán entre otras muchas. La vegetación mejor desarrollada (árboles de mayor altura y corpulencia) se ubica en la zona sur y hacia el oeste (Ek, 2011).

Otro factor a considerar en la distribución de la vegetación es el nivel de saturación de agua del sustrato, hay asociaciones vegetales que se desarrollan en terrenos elevados y no sujetos a inundación como las selvas y la vegetación de duna costera; también se encuentran asociaciones vegetales que son propias de terrenos bajos e inundables, tanto permanentes como temporales, como en las selvas bajas inundables en dónde es común encontrar manglares, saibales y tulares (al conjunto de estos dos últimos tipos de vegetación se les conoce localmente como *sabanas*).

Cabrera y Sánchez (1994) y Ek (2011) reportan la presencia de 12 comunidades vegetales principales en el Estado:

1. Selva alta subperennifolia
2. Selva mediana subperennifolia
3. Selva mediana subcaducifolia
4. Selva baja espinosa subperennifolia
5. Selva baja subcaducifolia
6. Selva baja caducifolia
7. Palmar
8. Manglar
9. Sabana
10. Vegetación de duna costera

11. Petén

12. Tular

Alrededor y dentro de estas comunidades se extienden grandes áreas de vegetación secundaria, derivadas de la actividad antropogénica principalmente en la parte sur del Estado. La Figura 2.11 muestra la distribución de la vegetación y de las zonas agrícolas reportadas para Quintana Roo por CONAFOR-SEMARNAT (2011) a escala 1:250000.

Selva alta subperennifolia.- se localiza en el extremo suroeste, en la zona alta y húmeda del Estado, se caracteriza por la presencia de árboles de más de 30 m, con varios estratos, plantas epífitas y lianas. En esta área se encuentra la caoba (*Swietenia humilis*), el chicozapote (*Manilkara zapota*), el pucté (*Bucida buceras*) y el ramón (*Brosimum alicastrum*) y palmas como el chit (*Trinax radiata*) y el guano (*Coccothrinax readii*).

Selva mediana subperennifolia.- es la más abundante y se distribuye en todo el Estado, presenta principalmente árboles entre 15 y 25 m de altura, entre un 25-50% de los árboles tiran sus hojas, las especies representativas son las mismas a la selva alta pero con un diámetro menor, además destaca la presencia de palmas, abundantes epífitas, helechos (*Pteridium aquilinum*), musgos y bromeliáceas (*Bromelia spp.*).

Selva mediana subcaducifolia.- se ubica principalmente en las zonas colindantes con el Estado de Yucatán, en donde hay una estación seca bien definida, aquí se encuentran árboles de 20 a 25 m, se caracteriza porque del 50 al 75% de las especies tiran sus hojas durante la época seca del año, comúnmente se desarrolla sobre suelos de caliza, medianamente profundos, arcillosos, rojos o negros, ricos en materia orgánica y de drenaje rápido (Flores y Rivas, 2000) entre las especies características se encuentra el tzalám (*Lysiloma latisoliquum*), jabín (*Piscida piscipula*), nance (*Byrsonima crassifolia*) y caimito (*Chrysophyllum mexicanum*).

Selva baja espinosa subperennifolia.- se encuentra en las zonas bajas y planas con inundación temporal, presenta árboles de menos de 8 m, las especies representativas son el árbol de tinte (*Haematoxylum campechianum*), el pucté (*Bucida buceras*), el ciricote (*Cordia dodecandra*, planta representativa de Quintana Roo) y el guaje (*Leucaena spp.*).

Selva baja subcaducifolia.- se encuentra principalmente a lo largo de la costa y en Majahual, las especies que lo identifican son el tzalám (*Lysiloma latisoliquum*), kuká (*Pseudophoenix sargentii*) y Chaká (*Bursera simaruba*)

Selva baja caducifolia.- se localiza en la parte más seca del Estado, al norte presenta árboles menores a 15 m que pierden el 75% o más de sus hojas en la época seca y un estrato herbáceo reducido, se desarrolla sobre suelos someros y pedregosos presenta plantas suculentas y las especies que lo caracterizan son el chaká (*Bursera simaruba*), ciricote (*Cordia spp.*), pitahaya (*Hylocereus monacanthys*) y despeinada (*Beaucarnea pliabilis*).

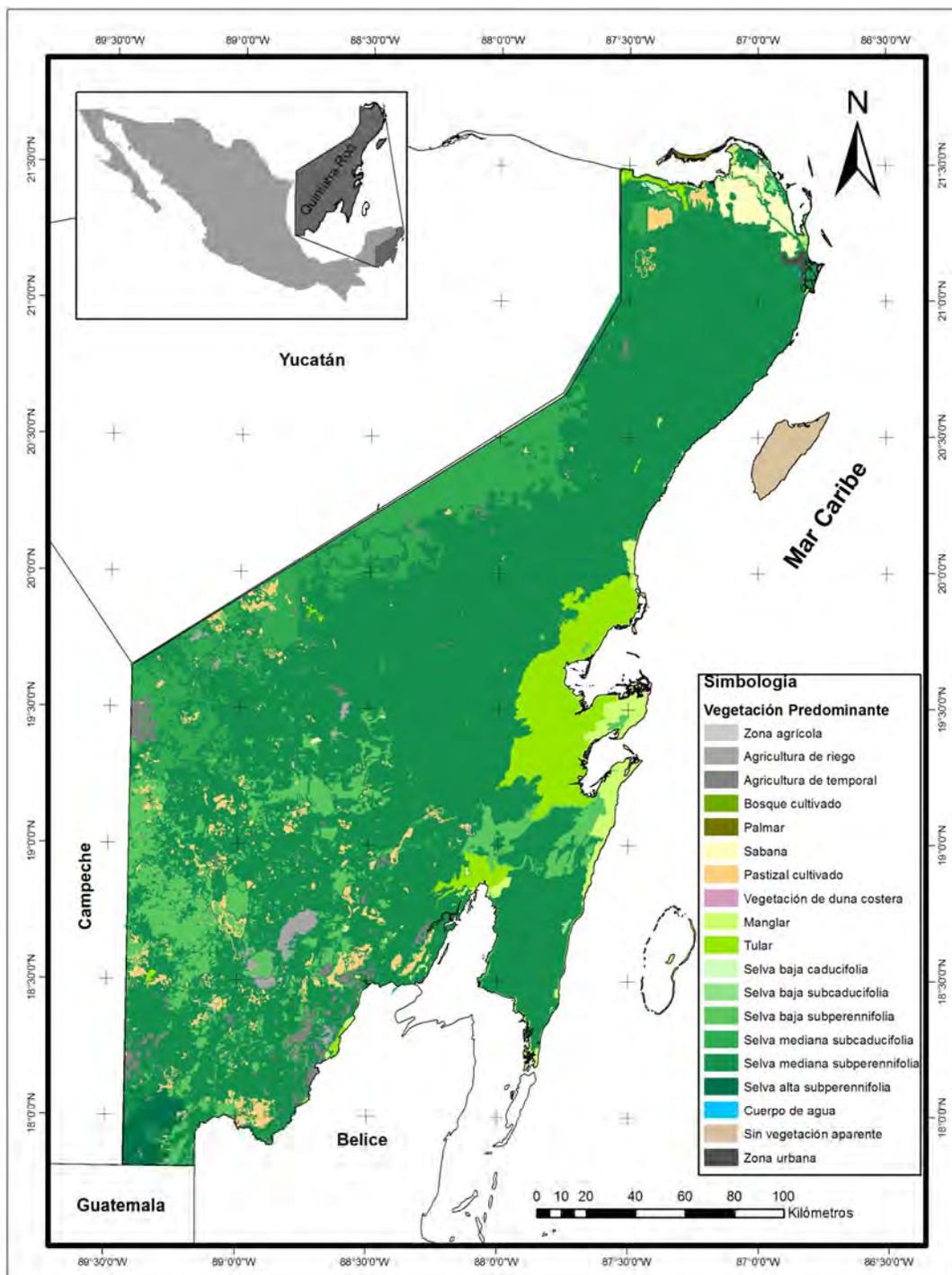


Figura 2.11 Tipos de vegetación en el estado de Quintana Roo
 Fuente: elaboración propia a partir de datos de CONAFOR-SEMARNAT (2011).

Palmar.- Los palmares pueden tener alturas de hasta 30 m se encuentran principalmente en el sur, en manchones, las especies presentes son guano (*Sabal mexicana*), corozo (*Scheelea liebmanni*), tasiste (*Acoelorrhaphe wrightii*) y cocoyol (*Acrocomia mexicana*)

Manglar.- lo componen especies arbóreas con alturas que van de los tres a los cinco metros con raíces características en forma de zancos, en el Estado se encuentran presentes especies de mangle: rojo (*Rhizophora mangle*), Blanco (*Laguncularia racemosa*), negro (*Avicennia geminans*) y botoncillo (*Conocarpus erectus*) en las partes con suelos inundados de las zonas costeras, principalmente en Majahual y en Sian ka'an.

Sabana.- se caracteriza por presentar vegetación de especies de pastizales, se desarrolla sobre terrenos planos que se inundan en la temporada de lluvias, se ubica en pequeños manchones en el norte y principalmente en el sur, además de pastizales como *Panicum máximum*, *Andropogon sp.*, *Paspalum notatum* y especies de ciperáceas (*Cyperus ssp.*).

Vegetación de dunas costeras.- se encuentra en las zonas arenosas costeras con plantas resistentes a la salinidad, fijadoras de arena, entre las especies se encuentra la uva de mar (*Coccoloba uvifera*), verdolaga de playa (*Sesuvium portulacastrum*), nopal (*Opuntia dillenii*), pasionaria (*Passiflora spp*) y circote de playa (*Cordia dodecandra*).

Petén.- se ubican principalmente cercanos a las costas en el centro y sur del Estado, se observan como islas de vegetación en medio de zonas de inundación, las especies características son el tasiste (*Acoelorrhaphe wrightii*), mangle, chechem, chit (*Thrinax radiata*), chaká (*Bursera simaruba*) y pucté (*Bucida buceras*).

Tular.- son plantas acuáticas que crecen en lugares inundados de baja profundidad, pueden medir hasta 2.5 m de alto con hojas angostas y largas, las especies que se encuentran son el tule (*Typha spp.*), tulillo (*Scirpus spp.*) y saibal (*Cladium jamaicense*).

La riqueza de la biodiversidad requiere de cuidado especial para evitar su depredación y extinción. Por ello, el Gobierno del Estado con el apoyo de las instancias del Gobierno Federal, ha decretado 26 Áreas Naturales Protegidas (ANP) que representan el 36% de su superficie, dentro de ellas 15 son de competencia Federal, 10 Estatal y una privada (Figura 2.12). Las ANP están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración o desarrollo. (Prezas, 2011; SEMA, 2011). Actualmente, se han propuesto más para ingresar a la lista.

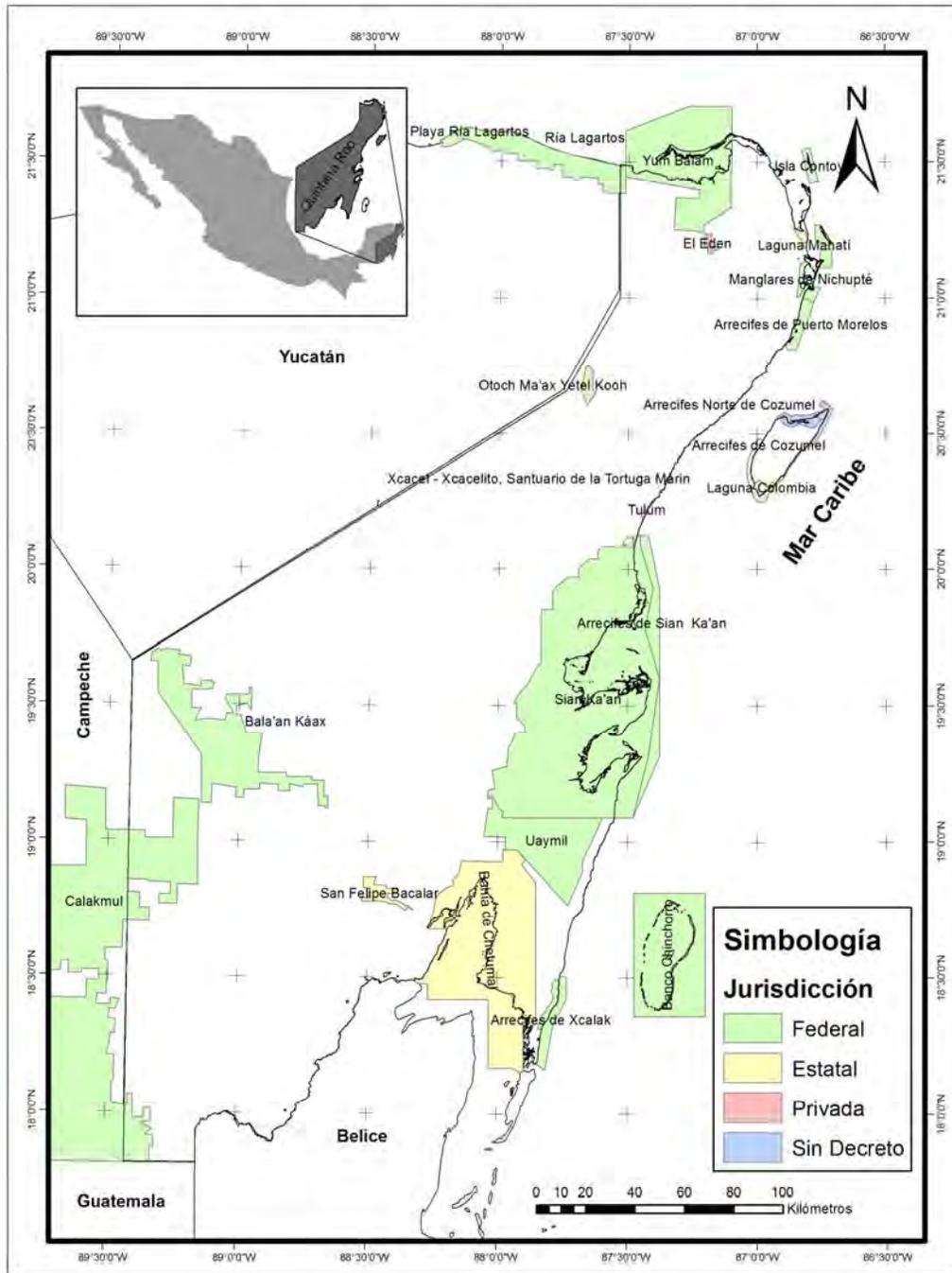


Figura 2.12. Áreas Naturales Protegidas en el estado de Quintana Roo
Fuente: tomado de Prezas (2011).

2.7 Uso agrícola del suelo

En Quintana Roo, durante el año 2010, se sembraron 83 409.86 ha con un valor de 494 089.69 miles de pesos (SAGARPA, 2012) los datos de superficie indican que solo el 16.4% del territorio está dedicado a esta actividad. La producción agrícola se concentra en la parte sur, centro y este del Estado. Los Municipios con mayor superficie sembrada son Othón P. Blanco, con el 45%, seguido de Felipe Carrillo Puerto con el 27% y José María Morelos con el 18% (Figura 2.13).

El 98% de la superficie sembrada corresponde a cultivos de temporal y solo el 2% a cultivos bajo sistema de riego. Dentro de los cultivos de temporal los que ocupan mayor superficie son el maíz de grano, la caña de azúcar y maíz de elote; en los cultivos bajo sistema de riego destacan el maíz, la caña de azúcar, la naranja y la papaya, en este mismo rubro el Estado está impulsando el cultivo de jitomate bajo sistemas orgánicos y en invernaderos.

Los cultivos con mayor superficie sembrada en el 2010 fueron el maíz con 62% del total, seguido de la caña de azúcar con 19.4%, elote con 6.7% , naranja con 2.9%, frijol con 2.5 % y chile verde 1.75% (Figura 2.14), después aparecen 19 cultivos con superficie menor al 1% en orden descendente de superficie ocupada son el sorgo para grano, coco, plátano, limón, papaya, piña, pitahaya, achiote, agave, pepino, jitomate, vainilla, calabacita, jaca, calabaza, mandarina, aguacate, jícama y melón (SAGARPA, 2012). De todos los cultivos es la caña de azúcar la que tiene un mayor valor de producción (Cuadro 2.4).

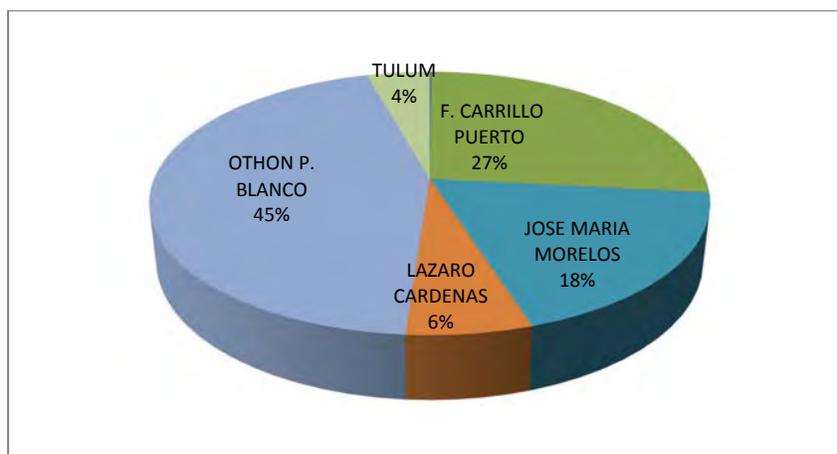


Figura 2.13 Porcentaje de superficie cultivada por Municipio en el estado de Quintana Roo. Fuente: elaboración propia con base en SAGARPA (2012)



Figura 2.14 Principales cultivos en el estado de Quintana Roo
Fuente: elaboración propia con base en SAGARPA (2012)

En Quintana Roo la producción forestal ha jugado un papel histórico y económico muy importante desde el siglo XIX. Los Municipios forestales están ubicados en la parte este y sur del Estado y son Felipe Carrillo Puerto, Othón P. Blanco y José María Morelos, en ellos se producen especies maderables como el cedro, la caoba y no maderables como el Chicozapote de donde se extrae la resina para fabricar el chicle, el cuál es un producto de exportación.

Cuadro 2.4 Principales cultivos, superficie y rendimiento en el estado de Quintana Roo

Cultivo	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(ha)	(ha)	(t)	(t/ha)	(\$/t)	(miles de pesos)
Maíz	69,560.55	66,842.55	55,779.45	0.83	2,979.31	166,184.43
Caña de azúcar	21,784.00	21,784.00	1,354,162.00	62.16	650	880,205.30
Elote	7,554.00	6,704.00	18,446.17	2.75	3,022.55	55,754.53
Naranja	3,260.00	3,254.00	40,099.30	12.32	1,594.44	63,936.01
Frijol	2,879.30	2,873.30	1,838.53	0.64	14,888.38	27,372.73
Chile verde	1,963.44	1,557.62	14,037.44	9.01	8,331.20	116,948.72

Fuente: SAGARPA, 2012.

Las maderas preciosas son el cedro rojo (*Cedrella odorata*), la caoba (*Sweitenia macrophylla*). Las especies comunes tropicales que se explotan son Chaká (*Bursera simaruba*), Sac'chaká (*Dendropanax arboreus*), Jobo (*Spondias mombin*), Amapola (*Pseudobomax ellipticum*), Chechén (*Metopium brownei*), Chicozapote (*Manilkara zapota*), Ramón (*Brosimum alicastrum*), Tzalam (*Lysiloma latisiliquum*), Machiché (*Lonchocarpus castilloi*), Kanisté (*Pouteria campechiana*), Kitanché (*Caesalpinia gaumeri*), Chacteviga (*Caesalpinia platyloba*), Boob (*Coccoloba cozumelensis*), Bojón (*Cordia dodecandra*), Chintok (*Kugriodendrum ferrum*), Kanasín (*Lonchocarpus rugosus*), Caracolillo

(*Mastichodendron capri*), Chactecok (*Sickingia salvadorensis*), Tinto (*Tinctorea campechiana*), Yaaxnik (*Vitex gaumeri*) y Majagua (*Hampea trilobata*).

De acuerdo a los datos de INEGI (2011), en 2010 se obtuvo un volumen de 94 271 m³ de producción forestal a nivel Estatal, de los cuáles el 20% del volumen corresponde a la producción de maderas preciosas por un valor de \$58 730 000 que corresponde al 59.3% del ingreso (Cuadro 2.5). El porcentaje restante corresponde a las maderas tropicales con un 80% de la producción, con un ingreso del 40.7%.

Cuadro 2.5 Volumen (m³) y valor (miles de pesos) de la producción forestal maderable en tres Municipios (2010).

Municipio	Total		Maderas Preciosas		Comunes tropicales	
	m ³	Miles de pesos	m ³	Miles de pesos	m ³	Miles de pesos
Total	35 541	99 115	7 101	58 730	28 440	40 385
Felipe Carrillo Puerto	18 672	55 275	4 198	34 722	14 474	20 553
José María Morelos	2 980	4 232	0	0	2 980	4 232
Othón P. Blanco	13 889	39 608	2 903	24 008	10 986	15 600

Fuente: SAGARPA (2012).

2.8 Reflexiones finales del capítulo

Quintana Roo, en el sureste de la República Mexicana, presenta un clima cálido húmedo en la isla de Cozumel y cálido subhúmedo con lluvias en verano en el resto del territorio, es una placa emergida a finales del mesozoico, las formaciones más antiguas se ubican en el sureste y las más recientes en el norte del Estado, su composición caliza junto con la acción del clima y la vegetación, sumado a la gran cantidad de fallas y fracturas, provoca que en éstas se infiltre el agua favoreciendo la formación de cavidades, lagunas y cenotes, el agua fluye principalmente de forma subterránea. La geología y el clima presentes en el Estado han dado origen a una gran diversidad de vegetación y de 12 diferentes tipos de suelos, sobre los cuáles se practican actividades agrícolas y forestales. La diversidad de ambientes y el relativo buen estado de la vegetación han favorecido la creación de 26 áreas naturales protegidas.

La caracterización de los aspectos físico geográficos descritos en este capítulo es la base fundamental sobre la cual se parte para realizar estudios. La mayor parte de la información Estatal utilizada se encuentra a escala 1:250000 o menores, estas escalas solo nos presentan un panorama general del Estado.

Para estudios a nivel estatal, municipal o local, esta escala de trabajo no es suficiente, se requieren mayor detalle, escalas mayores que muestren las diferencias que existen en la geografía de Quintana Roo.

Cada uno de los elementos del ambiente en el Estado se han estudiado de manera aislada, por temas, las cartas temáticas elaboradas por el INEGI presentan cada elemento por separado, ocasionando problemas de concordancia entre ellas.

Por otro lado, el enfoque fisiográfico que utiliza INEGI para elaborar la cartografía a partir de Provincias Fisiográficas presenta al estado como una llanura con piso rocoso con hondonadas y lomeríos bajos, esta visión no permite entender y explicar la diversidad que se aprecia en los diversos ambientes.

Hace falta una integración de los elementos del ambiente (formaciones geológicas, la hidrología, clima y los suelos) que permita un mejor entendimiento integral de su funcionamiento.

Una geomorfometría detallada constituye la base sobre la cual deben iniciarse los estudios de suelos, actualmente la información a escalas 1:50000 o mayores, es escasa, incompleta o no existe, por lo tanto hay que generarla.

2.9 Referencias del capítulo II

- Aguirre, A., Bezaury, H., de la Cueva, H., Mach, I., Peters, E., Rojas, S., Santos, K. (Compiladores). 2010. Islas de México, un recurso estratégico. Instituto Nacional de Ecología, The Natural Conservancy, Grupo de Ecología y Conservación de Islas, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México.
- Bautista, F., Batllori, S.E., Ortiz, P.M., Palacio, G., Castillo, G.M. 2005a. Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México 33–58.
- Blyth, F., De Freitas, H. 1998. Geología para ingenieros, Cuarta. ed. CECSA.
- Bonet, F., Butterlin, J., 1962. Stratigraphy of the Northern Part of the Yucatan Peninsula. New Orleans Geological Society 52–57.
- Butterlin, J., Bonet, F. 1963. Mapas geológicos de la Península de Yucatán. Talleres Gráficos de la Nación.
- Cabrera, E., Sánchez, A. 1994. Comunidades vegetales en la frontera México Belice. En: Estudio Integral de La Frontera México Belice, Recursos Naturales. Centro de investigaciones de Quintana Roo, México, pp. 17–35.
- Cervantes, Y., Cornejo, S., Lucero, R., Espinosa, J., Miranda, E., Pineda, A. 1990. Atlas Nacional de México volumen II. Instituto de Geografía, UNAM.
- CNA. 2012. Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua [www Documento]. URL <http://smn.cna.gob.mx/> (acceso 1.10.14).
- COESPO, 2011. Anuario estadístico de población. Consejo Estatal de Población. Quintana Roo, México.
- CONAFOR-SEMARNAT, 2011. Inventario Forestal Nacional. Comisión Nacional Forestal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Coke, J. 2004. Geography of caves in Quintana Roo. Association for Mexican Cave Studies Activities Newsletter 27, 93–97.
- Ek, A. 2011. Vegetación. En: Pozo, C., Armijo, N., Calmé, S. (Eds.), Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un Análisis Para Su Conservación. 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.
- Flores, G., Rivas, D. 2000. Tipos de vegetación en México.

- García, E. 1983. Apuntes de climatología, tercera. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, G., Padilla, J., Salazar, E. 2000. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico del estado de Quintana Roo. In: Vester, F.M.H. (Ed.), Influencias de Huracanes En El Paisaje de Yucatán Consideraciones Para El Diseño de Corredores Biológicos Y Su Monitoreo. Reporte de trabajo, CICY, UQROO, UNAM, ECOSUR, pp. 32–53.
- INEGI. 2000a. Cartas Geológicas 1:250000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2002. Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2008b. Carta Edafológica serie II. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2011. México en Cifras [www Documento]. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. URL <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=23> (accessed 1.10.14).
- Lopez-Ramos, E. 1975. Geological Summary of the Yucatan Peninsula. In: Nairn, A.E.M., Stehli, F.G. (Eds.). The Gulf of Mexico and the Caribbean. Springer US, pp. 257–282.
- López-Ramos, E. 1981. Paleogeografía y tectónica del Mesozoico de México. Revista mexicana de ciencias geológicas 5, 158–177.
- Lugo, J., Espinoza, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. Revista del Instituto de Geología UNAM 10, 143–150.
- Mecham, 2005. Quintana Roo Speleological Survey [www Document]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrss.htm> (acceso 12.19.13).
- Morales, J. 2009. La península que surgió del mar. Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de Yucatán, Mérida, Yucatán [México].
- Ordoñez, I. García, M. 2010. Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). Revista Electrónica de Medioambiente 15–35.
- PEMEX. 1967. Prospección geológico petrográfica de la Península de Yucatán. Petróleos Mexicanos, México.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., Marin, L. 2002. The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. International Geology Review 44, 191–221.
- Prado, R. 1998. Estrategia preliminar para la aplicación de la política de gestión del agua por cuenca en la región xii, Península de Yucatán [www Documento]. Consejo de Cuencas. URL http://siga.cna.gob.mx/siga/regionales/peninsula_yucatan/CONGOAX2.htm (acceso 12.5.14).
- Prezas, B. 2011. Áreas naturales protegidas en Quintana Roo. En: Riqueza Biológica de Quintana Roo: Un Análisis Para Su Conservación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) ; Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) ; Gobierno del Estado de Quintana Roo ; Programa de Pequeñas Donaciones-México, México, D.F. : San Cristóbal de Las Casas, Chiapas : Chetumal : Mérida, Yucatán, México, pp. 300–309.
- Priego, Á., Bocco, G., Mendoza, M.E., Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes, 1st ed, Planeación Territorial. SEMARNAT/INE/CIGA-UNAM, México, D.F.
- QRSS, 2011. Quintana Roo Speleological Survey [www Document]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrssesp.htm>
- SAGARPA. 2012. Anuario estadístico de producción agrícola. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural y pesca. [www Documento]. Portal OEIDRUS. URL <http://www.oeidrus.qroo.gob.mx/>
- SEMA. 2011. Programa sectorial preservación ambiental y recursos naturales 2011-2016. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente, Quintana Roo, México.
- UQRoo. 2004a. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo - SEMARNAT - SEDUMA, México.

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LAS DEPRESIONES KÁRSTICAS (FORMA, TAMAÑO Y DENSIDAD) A ESCALA 1:50,000 Y SUS TIPOS DE INUNDACIÓN EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO ¹

Resumen

En depresiones kársticas se presentan inundaciones, lo cual es determinante en las actividades económicas relacionadas con los cultivos agrícolas, la infraestructura urbana y el turismo. El objetivo de este capítulo fue la caracterización (forma, tamaño y densidad) de las depresiones kársticas del Estado de Quintana Roo y sus tipos de inundación. Se utilizaron 80 cartas topográficas escala 1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) para elaborar un mapa altimétrico con equidistancia a cada 10 m de altura. Se identificaron las depresiones kársticas, cuerpos de agua y zonas sujetas a inundación. Las depresiones kársticas (dolinas, úvalas y poljes) fueron clasificadas usando los siguientes criterios: aquellas con área superior a 1 km² fueron clasificadas como poljes; las que presentaron menor área fueron clasificadas por su forma utilizando el índice de compacidad: aquellas con valores entre 1.0 y 1.04 fueron clasificadas como dolinas y aquellas cuyos valores fueron mayores o iguales a 1.3 se clasificaron como úvalas. Las depresiones kársticas con índice de compacidad entre 1.04 y 1.3 se clasificaron utilizando un análisis discriminante. Se complementó la base de datos utilizando la identificación de láminas de agua expuestas con diámetros mayores a 10 m y menores a 50 m por medio de imágenes LandSat7 de 2009 y las imágenes *GeoEye*, *Spot* y *Global Image* que utiliza *Google Earth* mediante el programa *Google-Earth Pro* v.7.01. Se utilizó un algoritmo de convolución para interpolar una superficie continua de densidad probable de depresiones kársticas. Se usó el algoritmo de Jenks para generar una división natural de todo el intervalo de densidades en tres categorías: baja, media y alta. Se registraron 2890 depresiones kársticas que ocupan un área de 1147.05 km², siendo las úvalas las más abundantes y los poljes los que ocupan mayor superficie. Las dolinas y úvalas se encuentran presentes en todo el estado (planicies, sistema de acolinamientos y lomeríos), los poljes principalmente en las planicies. En las planicies se localiza la mayor cantidad de depresiones kársticas; el régimen de inundación extraordinario es el más frecuente en las tres formas, seguido por el permanente en dolinas y úvalas y la inundación temporal en los poljes.

3.1 Introducción

El término karst (krs en eslavo; karr en alemán, carso en italiano) es un término utilizado para referirse a la superficie de la tierra cuando las calizas u otras rocas solubles son las dominantes. En estas superficies el relieve se caracteriza por la diversidad de formas negativas como las depresiones tipo dolina y úvala y positivas como las lomas y montañas

¹ Artículo publicado en: Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., Pereira, A. 2014. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), pp.127–137.

kársticas con tamaños que van desde formas milimétricas como los lapiaz hasta los poljes de grandes extensiones (Kueny y Day, 2002; A. Priego *et al.*, 2010; Siart *et al.*, 2009).

A principios del siglo XX los estudios de Cvijic y Grund indicaban que la topografía del karst se desarrolla por etapas, con la formación inicial de dolinas por disolución, las cuales al desarrollarse se unen para formar úvalas que cuando se expanden forman poljes (Bautista, *et al.* 2005a). Esta sucesión ahora es considerada anticuada; según Roglic (1972) la formación de poljes está controlada estructuralmente y no está relacionada a las úvalas; se reconoce que cada región de karst se desarrolla dentro de su propia combinación de factores. Por su parte, Bosák (2008) menciona que el desarrollo del karst depende del tiempo, distribución geográfica, condiciones geológicas y de la exposición de la roca.

Aunque el proceso fundamental de formación del karst es la disolución, las rocas están sujetas a la acción de factores extrínsecos que inciden en su desarrollo. Las condiciones básicas para la formación del karst, de acuerdo con Barea (1995), son tres, el factor litológico, el estructural y el climático. Posteriormente se incorporaron dos factores más, la vegetación y el tiempo de exposición de la roca al intemperismo (Blair, 1986; Bautista *et al.*, 2011).

Las dolinas son depresiones cerradas simples circulares o elípticas; se considera que las úvalas por su parte tienen forma irregular o alargada y los poljes son depresiones kársticas (DK) de gran tamaño, mayores a 1 km² (Frelih, 2003; Ford y Williams, 2007). Las DK como las dolinas medianas a grandes, úvalas y poljes pueden ser representadas en escalas 1:50,000.

La elaboración de mapas de las DK en los que se incluyan simultáneamente las dolinas, úvalas y poljes ha presentado complicaciones a lo largo del tiempo debido a la diferencia de tamaño que tienen las estructuras y a la densidad con la cual se distribuyen en el territorio (Gao *et al.*, 2005). Cuando se estudian grandes superficies kársticas los mapas son muy generales como es de esperarse y solo permiten la representación de grandes formaciones como los poljes. La elaboración de mapas de las DK implica una gran cantidad de trabajo manual, la inclusión de formaciones menores como las úvalas, mientras que una gran proporción de las dolinas quedan por debajo del área mínima representable cuando se trabaja con una escala 1:50,000, en la cual todas las formaciones menores serían representadas por puntos dentro de los mapas.

Los avances tecnológicos en los sistemas de información geográfica (SIG), sistemas de posicionamiento global (GPS) e imágenes satelitales de alta resolución permiten la elaboración de mapas de las depresiones kársticas en corto tiempo y de manera semiautomatizada (Lyew-Ayee *et al.*, 2007; Huang, 2007; Gao y Zhou 2008; Siart *et al.*, 2009).

A pesar de su importancia por su relación con las aguas subterráneas y el desarrollo turístico, en México el karst ha sido poco estudiado. Aproximadamente el 20% del territorio está ocupado

por rocas solubles, principalmente calizas y en menor proporción yesos (Gutiérrez 2008), se tiene desarrollo de karst en la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, la Sierra de Chiapas y en la plataforma calcárea de la Península de Yucatán (Espinasa, 1990; Lugo 1990; Bautista *et al.*, 2011).

Los trabajos sobre el karst en Quintana Roo a escalas mayores a 1:250,000 son escasos. Entre estos se encuentran los realizados por García *et al.* (2000) y en la zona norte por Frausto e Ihl (2008) y Frausto *et al.* (2010).

El estudio de las DK a escalas 1:50,000 o mayores es de importancia para la identificación de zonas de inundación en casos de lluvias extraordinarias asociadas a huracanes. Según Gutiérrez (2008); Parise *et al.* (2009) y De Waele *et al.* (2011) la inundación de las DK repercute negativamente en la producción agrícola, así como en la infraestructura urbana y carretera, por lo cual se hace indispensable la elaboración de mapas que sean de utilidad para prever daños a la infraestructura carretera, al patrimonio de las comunidades y pérdida de vidas humanas, entre otros (Frausto e Ihl, 2008; Frausto *et al.*, 2010).

El objetivo de este trabajo es la caracterización (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 de las depresiones kársticas del estado de Quintana Roo y los tipos de inundación asociados.

3.2 Área de estudio

El estado de Quintana Roo se encuentra ubicado en la provincia fisiográfica conocida como Península de Yucatán al este-sureste de la República Mexicana, entre los paralelos 17°49' y 21°36' de latitud norte y los meridianos 86° 44' y 89°24' de longitud oeste. Tiene una extensión territorial de 50,843 km², que representan el 2.5 % de la superficie del país y cuenta con 865 km de litorales que son el 7.46 % del total nacional (UQRoo, 2004a) (Figura 2.1).

La temperatura media anual es de 25.8 °C, el mes más caliente es junio con 27.6 °C, la precipitación media anual es de 1263.3 mm, siendo septiembre el mes con mayor precipitación con 207.5 mm (CNA, 2012).

La clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (García, 1983) indica que los dos subtipos climáticos presentes son el cálido húmedo con lluvias en verano con más de 10.2 % de lluvia invernal en la isla de Cozumel (Am(f)) y en la parte continental el cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw), por su relación temperatura/precipitación se presentan los más húmedos (Aw₂) en las zonas costera y centro del Estado, rodeados por los intermedios (Aw₁). Los más secos (Aw₀) se localizan en los límites con los estados de Yucatán y Campeche.

Quintana Roo, es parte de una estructura de origen sedimentario formada durante el Mesozoico, sobre la cual se depositaron arenas y estructuras de origen orgánico marino a lo largo del Terciario (Ordoñez y García, 2010). Durante el Cenozoico empezó a ascender

la plataforma continental a pausas y retrocesos lo que permitió el afloramiento de los sedimentos del Paleoceno. Esta plataforma está formada por rocas carbonatadas, evaporíticas y clásticas tales como caliza, dolomita, yeso y arenisca (López-Ramos, 1975).

Durante el Eoceno se presentaron una serie de eventos geológicos que plegaron los recién formados estratos de calizas dando origen a un relieve ondulado, definiendo la geomorfología actual de la porción sur de la Península de Yucatán (Bautista and Palacio, 2005) de la cual forma parte el Estado; el resto se levantó gradualmente a partir del Plioceno y el ascenso continuó durante el Cuaternario al norte y hacia la periferia (Bonet y Butterlin, 1962; López-Ramos, 1975; Lugo *et al.*, 1992). En este periodo se originaron sistemas de fracturas, una con orientación noreste–suroeste a lo largo del cauce del río Hondo que hace frontera con Belice (Bautista y Palacio, 2005), otra, la de mayor extensión, desde el norte hasta el centro-este del estado y una tercera en la zona limítrofe con Campeche (UQRoo, 2004a).

Quintana Roo se caracteriza por ser una planicie con piso rocoso o cementado con una altura media de 50 msnm. El relieve plano se encuentra interrumpido por pequeñas colinas y numerosas hondonadas someras (Cervantes *et al.*, 1990).

En el norte y oriente del estado predominan las planicies con Leptosoles y Cambisoles (Bautista *et al.*, 2011); hacia el oeste predominan planicies y mesetas kársticas escalonadas en las que se encuentran Leptosoles, Cambisoles y Luvisoles (Lugo *et al.*, 1992; Frausto e Ihl, 2008; Frausto *et al.*, 2010); al sur, en los límites con Campeche y Guatemala, se localizan las mayores elevaciones, encontrándose altitudes de hasta 380 msnm; al oeste, en los límites con Yucatán se presentan lomeríos bajos con hondonadas con alturas menores que 140 msnm, las cuales van disminuyendo en altitud hacia la costa hasta llegar al nivel del mar, definiéndose como una planicie inundable con piso cementado y salino (Escobar, 1990; Lugo *et al.*, 1992) en la que predominan Leptosoles, Solonchaks y Arenosoles en los cordones litorales (Bautista *et al.*, 2011).

3.3 Materiales y métodos

Materiales

Como insumo principal se usaron 80 cartas topográficas escala 1:50,000 elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, publicadas en 2011. Para elaborar el mapa altimétrico se extrajeron las curvas de nivel de las cartas del INEGI con equidistancia a cada 10 m de altura. Posteriormente se verificó que los datos entre las uniones de cartas coincidieran y se corrigieron diversos problemas de consistencia. Una vez hechas las correcciones se fusionaron las cartas y se procedió a la elaboración del mapa altimétrico de Quintana Roo utilizando el software ArcGis[®] versión 9.3.

Para elaborar la base de datos de las DK se seleccionaron las depresiones, cuerpos de agua y zonas sujetas a inundación reportadas en la cartografía topográfica digital del INEGI, específicamente las identificadas como depresiones (clave CN_3301); de los

cuerpos de agua, se seleccionaron los identificados, por la permanencia de la lámina de agua, como intermitentes (clave HA_6291) y perennes (clave HA_6292) y del apartado de elementos de referencia topográfica de área se seleccionaron los terrenos sujetos a inundación (clave RA_6820) (INEGI, 2005).

Métodos

Las DK son en esencia porciones de la superficie de la tierra que se encuentran hundidas respecto a sus alrededores (Kusky, 2009; Allen y Allen, 2013) de modo tal que pueden ser consideradas como microcuencas y por tanto ser estudiadas con las mismas herramientas.

Las DK con área superior a 1 km² fueron clasificadas como poljes (Ford y Williams, 2007; Frelih, 2003); las que presentaron menor área fueron clasificadas por su forma utilizando el índice de compacidad o índice de Gravelius (K_c) definido como la relación entre el perímetro de la DK y la circunferencia de un círculo que tenga la misma superficie que la DK (Jardí, 1985; De Matauco, 2004). Este índice se utiliza para clasificar la forma de las cuencas, y sirve perfectamente para hacer una clasificación morfométrica de las DK.

$$K_c = 0.28 \frac{\text{Perímetro}}{\sqrt{\text{Área}}}$$

El círculo es la figura geométrica bidimensional más compacta, es decir, aquélla para la cual la relación perímetro-superficie es mínima; el coeficiente K_c es igual a 1 cuando la forma es perfectamente circular y puede alcanzar un valor de tres en el caso de formas muy alargadas (De Matauco, 2004; Viramontes, 2007). Aquellas DK con un K_c entre 1.0 y 1.04 fueron clasificadas como dolinas y aquellas cuyo K_c fue mayor o igual a 1.3 se clasificaron como úvalas. Para no introducir elementos de carácter subjetivo en la clasificación, las DK con K_c entre 1.04 y 1.3 (el 37.9%) se clasificaron utilizando un análisis estadístico discriminante. El método discriminante es útil en situaciones donde la muestra puede dividirse en grupos; su objetivo es entender las diferencias de los grupos y predecir la pertenencia a un grupo particular basándose en variables métricas independientes. La función discriminante es una combinación lineal de medidas métricas de dos o más variables independientes y se utiliza para describir o predecir una única variable dependiente (nominal o no métrica) (Hair *et al.*, 2007). En el caso del estudio, la variable dependiente es la pertenencia al grupo dolinas o al grupo úvalas. Las variables independientes son métricas: área del círculo equivalente y perímetro de la DK. La función discriminante para dos grupos es:

$$D = b_1 X_1 + b_2 X_2$$

Donde D es la función discriminante, b es la ponderación de las variables, y X es la variable independiente.

Una vez clasificadas todas las DK se simplificó la cobertura digital mediante la fusión de los polígonos contenidos con identificaciones de DK mediante la función “merge” de la biblioteca de funciones de ESRI con los siguientes criterios: a) Si una dolina está contenida en otra formación con características de una úvala, se generalizan quedando solo la úvala que es la formación de mayor jerarquía; y b) un procedimiento semejante se siguió en los casos de dolinas y úvalas contenidas en poljes.

En la clasificación no fueron considerados como DK el sistema de lagunas de Bacalar, Mariscal, Chile Verde, Salada y el Río Hondo por ser cuerpos de agua sobre fallas (Prezas *et al.*, 2003; UQRoo, 2004a).

Cada DK se calificó además con el régimen de inundación con base en la información de las cartas topográficas. A las de tipo perenne se les denominó permanentes. A las tipo intermitentes, se les asignó como temporales; se caracterizan porque llegan a inundarse principalmente en temporadas de lluvias fuertes y permanecer así al menos durante un mes (CNA, 2012). Aquellas formas que no presentan régimen de inundación temporal o permanente fueron clasificadas con régimen de inundación extraordinaria, lo que indica que pueden inundarse bajo eventos hidrometeorológicos extremos (Frausto e Ihl, 2008b; Aguilar *et al.*, 2010).

Densidad de depresiones kársticas

La densidad de DK, en este documento, se entiende como la cantidad de superficie deprimida por procesos kársticos por unidad de área (km²). Se asume que la disolución kárstica ocurre en todo el espacio y no solo en aquel que tiene las dimensiones necesarias para ser representado en las cartas; pero se puede suponer que son por un lado formaciones de menor tamaño y por otro que se encuentran más dispersas por lo que se utilizó un algoritmo de convolución usando un núcleo ortogonal (window moving kriging) para interpolar una superficie continua de densidad probable de DK a partir de los datos observados y verificados (Chiles, 1999; Goovaerts, 1997).

Se complementó la base de datos con la identificación de láminas de agua expuestas con diámetros mayores a 10 m y menores a 50 m por medio de imágenes de satélite de 2009 (Landsat 7 ETM (1 arc-sec/pix)) y las imágenes GeoEye, Spot y Global Image que utiliza Google Earth mediante el programa Google-Earth Pro v.7.01.

Para la discretización del resultado se usó el algoritmo de Jenks al dividir todo el intervalo de densidades en tres categorías: baja, media y alta (Jenks 1967; Jiang y Liu 2012) (ESRI, 2013).

3.4 Resultados

3.4.1 Mapa altimétrico

Los registros de altitud en Quintana Roo varían de cero msnm en las zonas costeras hasta un máximo de 380 m en el extremo sur (Figura 2). La altitud se incrementa de este hacia

el oeste y de norte a sur de manera escalonada, y es en el extremo suroeste donde se encuentran las máximas alturas. Amplias zonas cercanas a las costas desde el norte hasta el sur y la Isla de Cozumel se encuentran por debajo de los 10 msnm. La mayor parte del territorio se encuentra por debajo de los 100 msnm.

A medida que se alejan de la costa, hacia el poniente alrededor de los 88°30' de longitud oeste, las curvas de nivel tienden a estar más cerca una de las otras indicando un incremento en la pendiente del terreno, esta situación se hace más evidente en el extremo oeste y sur.

La zona de baja altitud en la parte norte y oriental del estado corresponde a la planicie costera, que se continúa con una zona en donde la altura se va incrementando hacia el sur y el oeste a través de un sistema de colinas y lomeríos que finalmente dan paso a terrenos más escarpados con diferenciales de altura de entre 200 y 250 m/km² y en los cuales se alcanzan las mayores altitudes del estado, mismos que son representativos de la zona fronteriza hacia Belice y Guatemala.

Se reconocieron algunos escalones o pisos regionales (0 a 50 msnm; 50 a 110 msnm; 110 a 170 msnm y mayor a 170) que ayudan a definir y contrastar áreas de planicies, colinas, lomeríos y montaña (Figura 3.1).

3.4.2 Clasificación de depresiones kársticas y su régimen de inundación

Se identificaron 2890 DK que ocupan un área de 1147.04 km². El 58.8% son úvalas, el 35.1% son dolinas y solo el 5.9 % son poljes (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 Clasificación de depresiones kársticas (DK) y régimen de inundación.

Forma y régimen de inundación	Número	Área (km ²)	Número (%)	Área (%)
Dolina con inundación permanente	37	4.09	12.84	0.36
Dolina con inundación temporal	206	3.03	7.13	0.26
Dolina con inundación extraordinaria	440	13.24	15.22	1.15
<i>Total Dolinas</i>	<i>1017</i>	<i>20.36</i>	<i>35.19</i>	<i>1.78</i>
Uvala con Inundación Permanente	462	36.26	15.99	3.16
Uvala con Inundación Temporal	433	40.59	14.98	3.54
Uvala con Inundación Extraordinaria	805	145.51	27.85	12.69
<i>Total Uvalas</i>	<i>1700</i>	<i>222.35</i>	<i>58.82</i>	<i>19.38</i>
Polje con Inundación Permanente	32	106.1	1.11	9.25
Polje con Inundación Temporal	43	256.6	1.49	22.37
Polje con Inundación Extraordinaria	98	541.63	3.39	47.22
<i>Total Poljes</i>	<i>173</i>	<i>904.33</i>	<i>5.99</i>	<i>78.84</i>
Total DK	2890	1147.04		

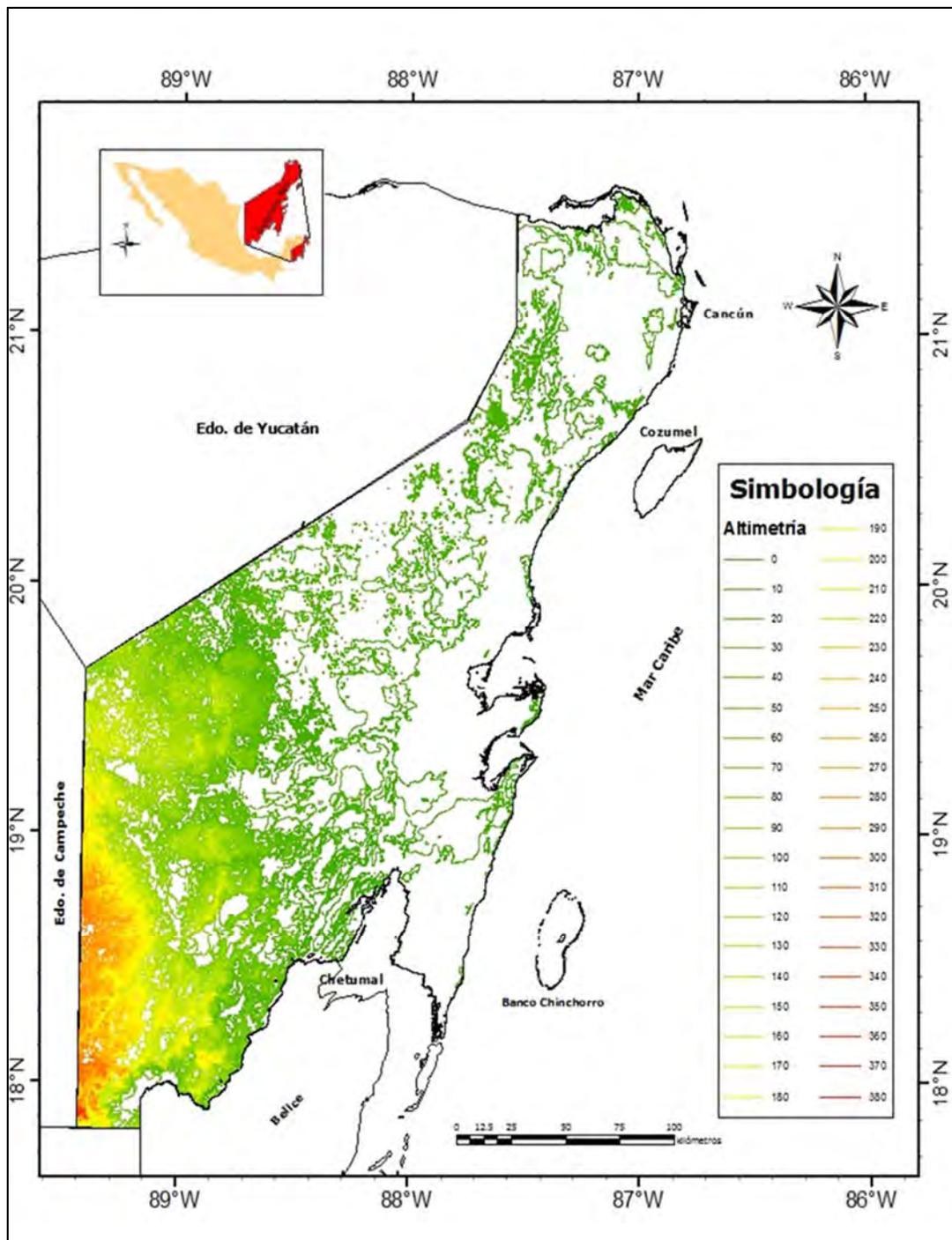


Figura 3.1 Pisos altimétricos y curvas de nivel obtenidos para el Estado de Quintana Roo
Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2005).

Las úvalas son las DK que se encuentran en mayor número (1700), ocupan un área de 223.3 km²; las dolinas son las que ocupan un segundo lugar en número (1017) pero ocupan la menor área (20.3 km²); los poljes se encuentran en un número muy reducido (173) pero abarcan la mayor superficie (904.3 km²) (Figura 3.2).

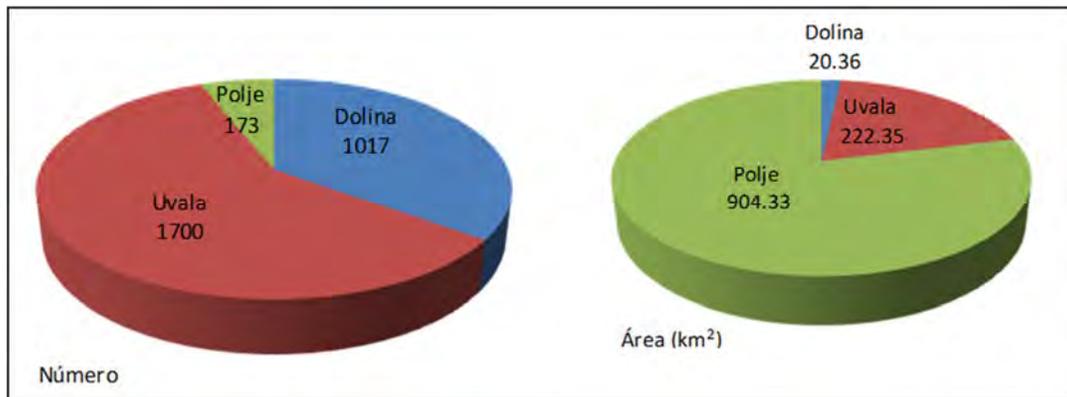


Figura 3.2 Número y área (km²) ocupada por formas exokársticas negativas.

El 46.4% de las DK presentan régimen de inundación extraordinaria y ocupan un área de 700.3 km². El régimen de inundación permanente (29.9% de las DK) es el que ocupa la menor área (146.4 km²) y las DK con régimen de inundación temporal son el 23.6% ocupando un área de 300.2 km²

Al relacionar el tipo de DK con el régimen de inundación (Figura 3.3) se encontró que para las tres formas (dolinas, úvalas y poljes) el régimen de inundación extraordinario es el más frecuente; el de menor frecuencia para dolinas y úvalas es el de inundación temporal y para los poljes, mientras que la menor frecuencia es para aquellos con inundación permanente.

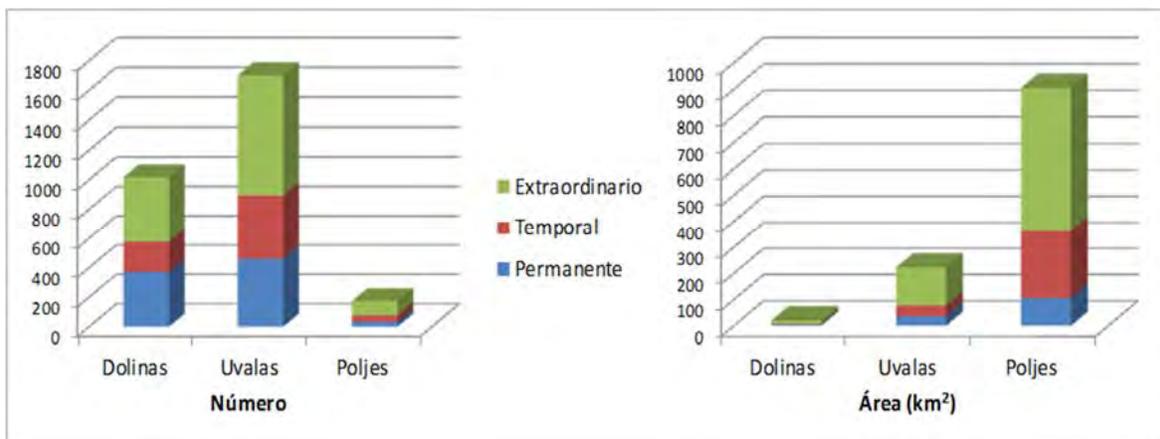


Figura 3.3 Distribución de depresiones kársticas por régimen de inundación

Entre las formas con régimen de inundación extraordinaria las úvalas se encuentran en mayor cantidad (805) y los poljes son los que ocupan mayor superficie (541.6 km²).

En la Figura 3.4 se presenta la distribución de las DK en el Estado de Quintana Roo. Puede observarse que la presencia de DK tiende a disminuir cerca de las zonas costeras, principalmente en el extremo noreste.

Los poljes con régimen de inundación extraordinaria en la zona sur y en la zona oeste se utilizan principalmente para agricultura. Las DK que presentan inundación permanente en la parte centro y norte del Estado son de gran interés turístico destacando las dolinas llamadas cenotes.

Considerando la distribución altitudinal de las DK en los cuatro pisos altimétricos (0–50, 50–110, 110–170 y mayor a 170), el 81% de las DK se encuentran por debajo de los 50 msnm, su número y área disminuye a medida que aumenta la altura de tal forma que por encima de los 170 msnm solo se encuentra el 4.1% de las DK.

En cada uno de los pisos altimétricos definidos el régimen de inundación extraordinaria es el que predomina tanto en número como en superficie seguido por el permanente, y el que tiene menor cantidad es el temporal.

En cuanto a la distribución por tipo de DK son las úvalas con régimen de inundación extraordinaria las que presentan mayor número y superficie en los cuatro pisos altitudinales.

El 85% de dolinas se encuentra por debajo de los 50 msnm, predominando el régimen de inundación extraordinaria, y conforme aumenta la altitud hasta los 170 msnm van disminuyendo en cantidad y área; por encima de este nivel hay un ligero incremento en su número con respecto a los dos anteriores pisos altimétricos predominando el régimen de inundación permanente.

El 70% de los poljes se encuentran por debajo de los 50 msnm, principalmente con régimen de inundación extraordinaria; después de los 110 msnm no se registran poljes con inundación permanente.

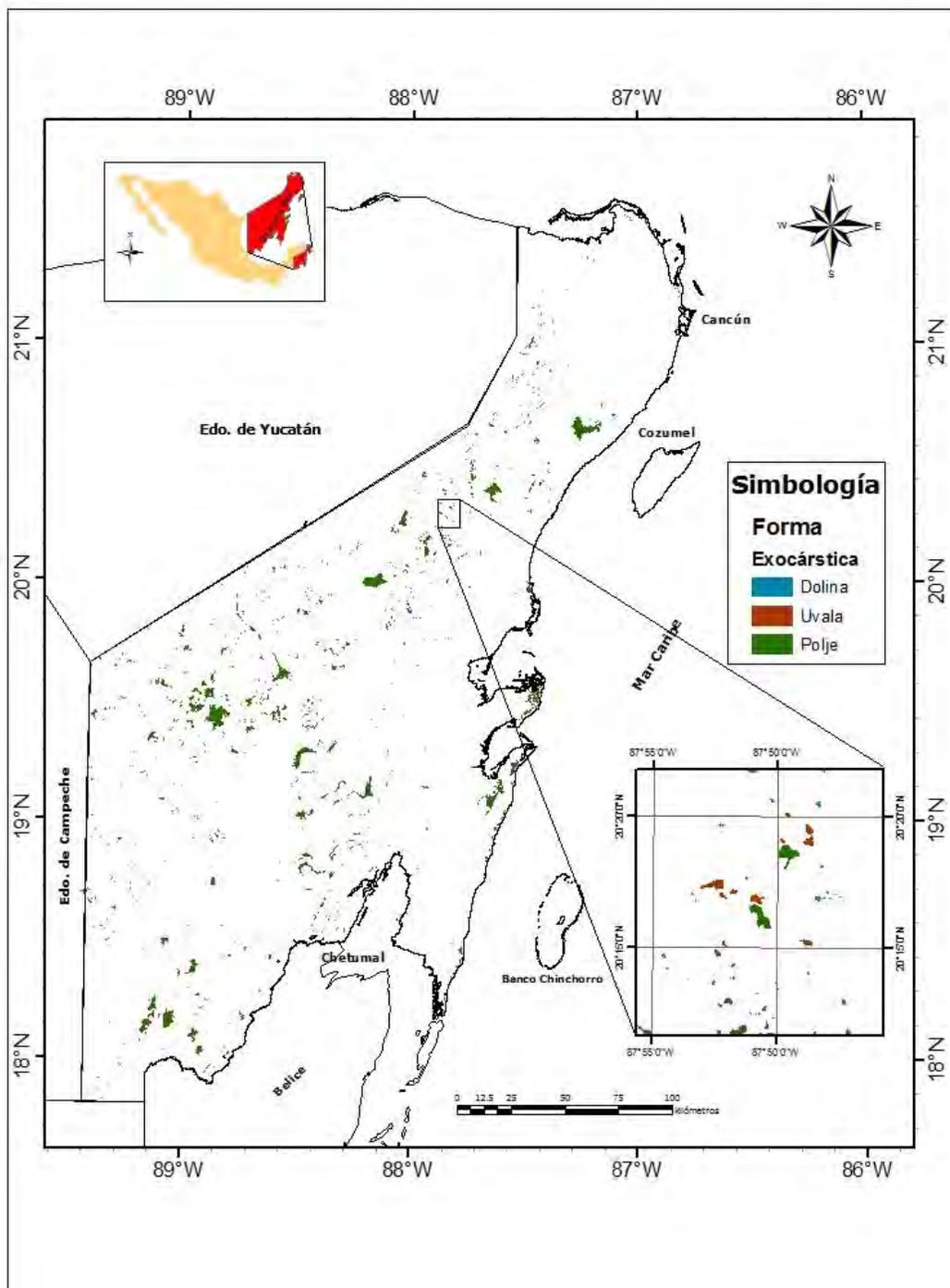


Figura 3.4 Distribución de depresiones kársticas en el estado de Quintana Roo.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2005)

3.4.3 Densidad de las depresiones kársticas

Con las imágenes de satélite se identificaron un total de 1153 cuerpos de agua, con lo cual se sumaron 990 que no estaban considerados en la base de datos del INEGI.

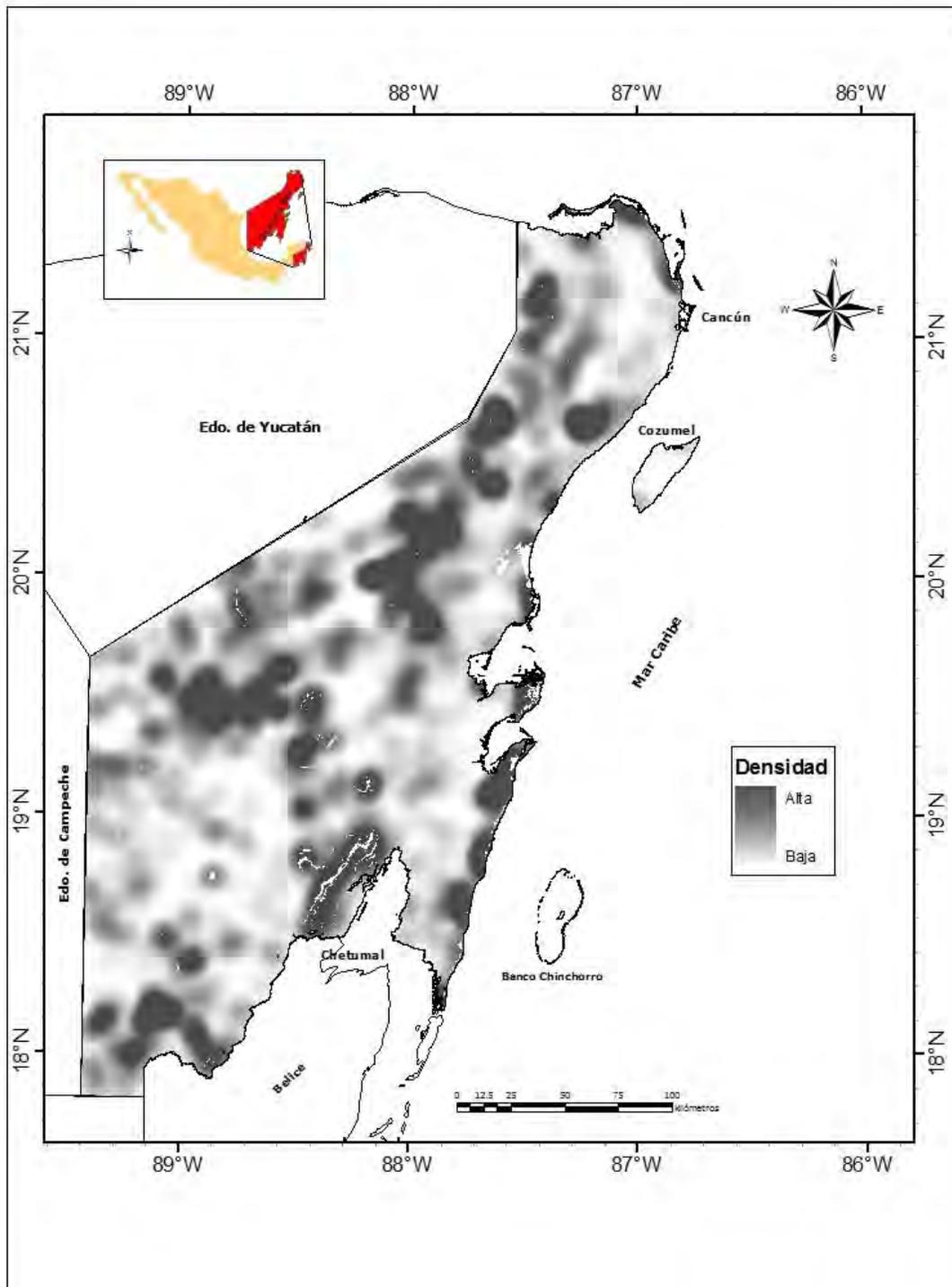
En la Figura 3.5, se muestran las áreas de diferente densidad, las zonas más claras representan las superficies con una menor densidad de DK, las áreas de color gris indican las superficies de densidad media y las de tono más oscuro representan las áreas de mayor densidad. Las zonas de alta densidad de DK se encuentran distribuidas en distintas regiones, se ubican principalmente en el centro de Quintana Roo, entre Carrillo Puerto, José María Morelos y hacia el norte del estado; en las áreas cercanas a la costa frente a Cozumel en el norte y frente a Banco Chinchorro en el sur; en la zona de Bacalar y en el extremo sur frente a los límites con Guatemala y Belice.

Las zonas de densidad media, en su mayoría, se encuentran rodeando a las áreas de densidad alta, como en la zona norte al oeste de Cancún y en el sur de la isla de Cozumel; en la zona centro cerca de los límites con el Estado de Yucatán y en la zona sur cerca de los límites con Campeche y Guatemala. El resto del territorio se encuentra dentro de la zona de baja densidad de DK.

3.5 Discusión

La aplicación del análisis morfométrico al relieve kárstico se ha enfocado en la caracterización de diferentes procesos, ya sea a través del análisis de la superficie ocupada por las DK y su densidad (Denizman, 2003; Magdalene y Alexander, 1995; Bruno *et al.*, 2008) o de los paisajes en su conjunto (White, 1988; Ford y Williams, 2007; Frisia y Borsato, 2010; Migoñ, 2010; Gupta, 2011). En este trabajo se utilizó además de las curvas de nivel, imágenes de satélite con verificaciones de campo para corroborar las láminas de agua expuestas (cenotes o dolinas); la identificación y clasificación de las DK se realizó a partir del cálculo del I_c , que tiene como objetivo darle valores numéricos a las DK respecto al círculo como figura ideal lo que simplifica separar las dolinas de las úvalas y facilita la tipología de las DK (Denizman, 2003; De Matauco, 2004).

En un estudio sobre el estado de Yucatán, el 80% de las depresiones y cuerpos de agua fueron clasificados automáticamente con los parámetros para discriminar mediante el I_c (Aguilar *et al.*, 2010). Para Quintana Roo solo fue posible identificar el 62.1% con certeza usando los mismos parámetros, quedando el 37.9% para ser clasificado visualmente (Figura 3.6). El uso del I_c como criterio de diferenciación entre las dolinas y úvalas no es suficientemente eficiente para hacer una clasificación automatizada en el SIG con los límites de corte establecidos por Aguilar *et al.* (2010), por lo que fue necesario el uso de un análisis multivariado discriminante para incrementar la eficiencia del reconocimiento de las DK.



3.5 Densidad de formas exokársticas en el Estado de Quintana Roo
 Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2005)

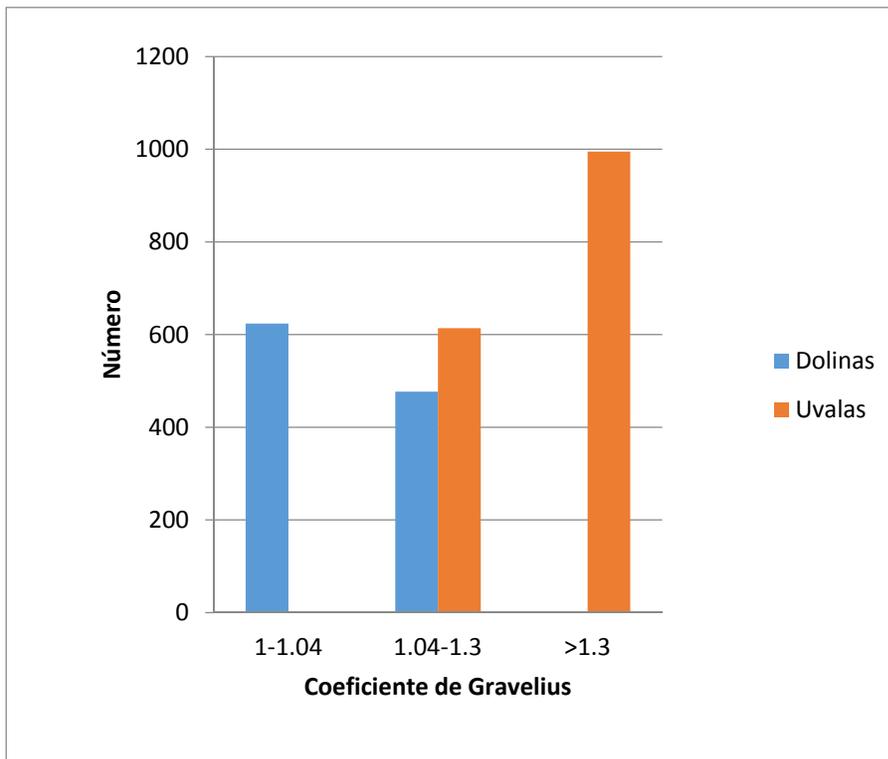


Figura 3.6 Distribución de dolinas y úvalas de acuerdo con su coeficiente de Gravelius.

Aplicando el análisis discriminante, el 88.27% de los datos se clasificaron automáticamente, dejando solo el 11.73% de formas exokársticas para ser clasificadas de forma manual utilizando como criterios su ubicación, su forma y tamaño permitiendo reducir a poco menos del 12% del total los casos en los cuales se podrían introducir clasificaciones subjetivas de las DK. El uso del análisis multivariados de tipo discriminante constituye una aportación metodológica a la separación entre dolinas y úvalas cuando los límites de corte establecidos para el Ic no son determinantes. La tipificación de las DK y su relación con los pisos altimétricos registrados para el estado (Figuras 5 y 6) constituyen una primera aproximación a la definición de la densidad y localización espacial de las DK.

En Quintana Roo las DK reflejan la estructura y procesos de degradación del basamento calcáreo, que en la mayoría de los casos son formas sujetas a procesos de acumulación e inundación (Frausto e Ihl, 2008; CNA, 2012). En este trabajo encontramos que hay una relación entre el régimen de inundación, la altura a la que se encuentra y la forma de la DK que no ha sido reportada con anterioridad y que pudiera llegar a considerarse como factor de formación de las DK.

La mayor parte de las DK se encuentran por debajo de los 50 msnm, en las zonas con menor relieve, probablemente debido a que en esta zona la acción de los factores estructural, climático y la vegetación combinados con el comportamiento del agua

subsuperficial según Schoeneberger y Wysocki (2005) están favoreciendo la disolución de la roca caliza con mayor intensidad que en las otras áreas con mayor altura.

El 85% de las dolinas se encuentran por debajo de los 50 msnm, aunque predomina el régimen de inundación extraordinario. En esta zona hay una gran cantidad de dolinas con inundación permanente conocidas como cenotes que están en contacto con el manto freático y tienen interés turístico. Por otra parte, en la zona con mayor altura, por encima de los 170 msnm, las dolinas están en zonas de lomeríos y la pendiente les proporciona el agua, por lo cual dominan las que presentan inundación permanente, que en la zona son utilizadas como depósitos de agua.

Para Gutiérrez (2008), la combinación de los procesos de disolución da origen a las dolinas, que pueden presentarse de manera aislada o agrupada; estos procesos igualmente pueden ocasionar depresiones mayores con áreas progresivamente más grandes, originando úvalas y poljes. Los procesos de disolución que tienden a crear patrones diferenciados en superficie pueden asociarse con el comportamiento de las láminas de agua subterráneas y subsuperficiales propuesto por Schoeneberger y Wysocki (2005), ello podría explicar la existencia de concentraciones de dolinas y úvalas pequeñas en sitios donde aparentemente no hay procesos de cambio altimétrico significativo ni cambios notables en la pendiente del terreno, correspondiendo al caso de los terrenos llanos y acolinados de zonas húmedas.

Para White (1988) conocer las formas presentes, su tamaño y abundancia permite identificar la intensidad de disolución de la roca y por lo tanto el grado de desarrollo del karst; además indica que su distribución permite identificar las zonas de concentración de agua y flujos preferenciales para su aprovechamiento. En el caso de las porciones altas del estado de Quintana Roo, esto permite corroborar el modelo de distribución de las láminas de agua subterráneas propuesto por Schoeneberger y Wysocki (2005) al confirmarse que muchas de estas formaciones de disolución en la parte alta se mantienen llenas durante buena parte de la temporada de secas e incluso todo el año gracias a los escurrimientos de las crestas que las limitan y contienen.

Las úvalas con inundación extraordinaria son las formas que se encuentran en mayor cantidad en los diversos pisos altimétricos, lo cual puede estar indicando que los procesos de karstificación en el estado han sido favorecidos por la solubilidad de la roca, el factor climático (temperatura y precipitación) junto con la vegetación que en el estado se encuentra en buen estado de conservación, factores que favorecen este proceso de acuerdo a Barea (1995) y Salomon (2005, en Gutiérrez, 2008). Por su parte, Bautista *et al.* (2005b) describen este proceso indicando que los controles estructurales asociados a la margen activa del centro de Quintana Roo son favorables para la formación de úvalas.

Por otra parte, la condición de inundación extraordinaria en muchas de las DK se debe a la profundidad relativa del manto freático, profundidad que no es constante y que, tal como lo

plantean Schoeneberger y Wysocky (2005), puede variar al cambiar las condiciones climáticas y pluviométricas de la región, ya sea debido a variaciones de ciclo mediano o largo, o incluso a anomalías climáticas pasajeras.

Los poljes, como las formas kársticas más grandes en el estado, se ubican principalmente en las zonas de menor altura en donde los procesos de disolución y cercanía al manto freático favorecen el desarrollo de estas grandes extensiones hundidas respecto al terreno que las rodea y la formación de paisajes particularmente atractivos para el desarrollo del turismo como son las lagunas costeras y otros cuerpos de agua de escasa profundidad (Figura 3.7).



Figura 3.7. Polje utilizado con fines recreativos

En zonas más altas, los poljes son zonas de acumulación de materiales provenientes de sus alrededores que, generalmente, presentan buen drenaje y altas tasas de evapotranspiración (Schoeneberger y Wysocky, 2005), lo que permite a la población local usarlos con fines agrícolas (Figura 3.8).

De los tres regímenes de inundación estudiados, el temporal es el que tiene menor cantidad de DK a pesar de la abundancia de lluvias en el estado. A manera de hipótesis podemos suponer que esta condición de temporalidad en la inundación de algunas de las DK se debe a los cambios en el nivel estático del manto freático a lo largo del año y como consecuencia de los procesos de infiltración de las precipitaciones.



Figura 3.8. Forma exokárstica usada para agricultura

La naturaleza porosa de la roca caliza en todo el estado favorece que gran parte del volumen que no es evapotranspirado se infiltre rápidamente y fluya hacia la costa subterráneamente (UQRoo, 2004a). Sin embargo, este patrón regional puede ser diferente a nivel local porque las fracturas pueden cambiar estos cauces subterráneos.

Las zonas de mayor densidad de DK se encuentran concentradas principalmente entre los 20 y 70 msnm. Bautista *et al.* (2005b) mencionan que la densidad puede estar relacionada a un factor estructural como la distribución de fallas en el Estado de Quintana Roo.

3.6 Reflexiones finales del capítulo

La metodología empleada para la clasificación permitió la interpretación semiautomatizada de la tipología de las DK, procedimiento que puede implementarse en la península de Yucatán y en otras zonas kársticas.

En Quintana Roo hay una relación entre la forma de las DK y la altitud: a medida que aumenta la altitud, disminuye la cantidad y el área ocupada por las DK. Las úvalas son las DK presentes en mayor número, seguida por las dolinas y los poljes. Los poljes a pesar de encontrarse en menor número son los que ocupan mayor superficie. El régimen de inundación extraordinario es el que predomina en número (46.4%) y área ocupada (61%).

En la zona de planicies se encuentra la mayor parte de las DK: el 81% de se localiza por debajo de los 50 msnm. En el centro y hacia el sur del estado se forman pisos de altitud que pueden favorecer la formación de úvalas y en el sur se alternan planicies, lomeríos y colinas redondeadas que pueden estar favoreciendo la formación de dolinas con inundación

permanente y úvalas con inundación extraordinaria.

El mapa de la densidad de DK con los tipos de inundación permitirá una mejor planeación de las actividades económicas relacionadas con la agricultura, la infraestructura urbana y carretera y las actividades turísticas.

3.7 Referencias del capítulo III

- Aguilar, Y., Mendoza, M., Frausto, O., Bollo, M., Bautista, F. 2010. Spatial distribution of karstic depressions in tropical karst plains. Presentado en la Reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana, Geos, México, pp. 115–116.
- Allen, P.A., Allen, J.R. 2013. Basin analysis: principles and application to petroleum play assessment. John Wiley & Sons.
- Barea, J., 1995. Geología del karst desde el punto de vista del espeleólogo. Boletín espeleológico SECJA 1, 46–52.
- Bautista, F., Díaz, S., Castillo, M., Zinck, J.A., 2005b. Spatial heterogeneity of the soil cover in the Yucatan Karst: Comparison of Mayan, WRB, and Numerical Classifications. Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie 38, S81.
- Bautista, F., Palacio, G., 2005. Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche : Universidad Autónoma de Yucatán : Instituto Nacional de Ecología, Campeche; Yucatán, México.
- Bautista, F., Palacio, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. Geomorphology 135, 308–321.
- Blair, R.W. 1986. Karst landforms and lakes. Geomorphology from space.
- Bonet, F., Butterlin, J. 1962. Stratigraphy of the Northern Part of the Yucatan Peninsula. New Orleans Geological Society 52–57.
- Bosák, P. 2008. Karst processes and time. Geologos 14, 15–36.
- Bruno, D.E., Calcaterra, D., Parise, M. 2008. Historical instability and recent slope evolution of the Illice Torrent catchment, Calabria, Italy. Physical Geography 29, 179–194.
- Cervantes, Y., Comejo, S., Lucero, R., Espinosa, J., Miranda, E., Pineda, A. 1990. Atlas Nacional de México volumen II. Instituto de Geografía, UNAM.
- Chiles, J.P., Delfiner, P. 1999. Geostatistics: modeling spatial uncertainty. Wiley Interscience, New York.
- CNA - Comisión Nacional del Agua. 2012. Servicio Meteorológico Nacional [WWW Documento]. URL <http://smn.cna.gob.mx/> (acceso 1.10.14).
- De Matauco, A. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la AGEN ° 38, 311–329.
- Denizman, C. 2003. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida. Journal of Cave and Karst Studies 65, 29–35.
- De Waele, J., Gutiérrez, F., Parise, M., Plan, L. 2011. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. Geomorphology 134, 1–8.
- Escobar, A. 1990. Geografía general del Estado de Quintana Roo. Gobierno del estado de Quintana Roo. Fondo de fomento editorial.
- Espinosa, P.R. 1990. Carso. In: Atlas Nacional de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Ford, D.C., Williams, P. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons.
- Frausto, O., Ihl, T. 2008. Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. Estudio Geohidrológico Del Norte De Quintana Roo, México.
- Frausto, O., Ihl, T., Giese, S., Cervantes, A., Gutiérrez, M. 2010. Vulnerabilidad a la inundación en las formas exocársticas del noreste de la Península de Yucatán. VI Seminario Latino-

- Americano de Geografía Física II Seminário Ibero-Americano de Geografía Física
Universidad de Coimbra. Portugal.
- Frelüh, M., 2003. Geomorphology of Karst Depressions: Polje or Uvala-a Case Study of Luèki Dol. *Acta carsologica* 32, 2.
- Frisia, S., Borsato, A. 2010. Karst. *Developments in sedimentology* 61, 269–318.
- Gao, Y., Alexander, E.C., Barnes, R.J., 2005. Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. *Environmental Geology* 47, 1083–1098.
- Gao, Y., Zhou, W. 2008. Advances and challenges of GIS and DBMS applications in karst. *Environmental Geology* 54, 901–904.
- García, E., 1983. Apuntes de climatología, tercera. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, G., Padilla, J., Salazar, E. 2000. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico del estado de Quintana Roo. In: Vester, F.M.H. (Ed.), *Influencias de Huracanes En El Paisaje de Yucatán Consideraciones Para El Diseño de Corredores Biológicos Y Su Monitoreo*. Reporte de trabajo, CICY, UQROO, UNAM, ECOSUR, pp. 32–53.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford university press.
- Gupta, A. 2011. *Tropical geomorphology*. Cambridge University Press.
- Gutiérrez, M. 2008. *Geomorfología*. Pearson/Prentice Hall, Madrid.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., Black, W. 2007. *Análisis multivariante*, 5th ed. Prentice Hall, Madrid.
- Huang, H.-H., 2007. *Geomorphologic investigations on karst terrain: A gis-assisted case study on the island of Barbados*. McGill University.
- INEGI. 2000b. *Diccionario de datos fisiográficos 1:1000000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. *Análisis de las variables morfométricas que nos la definen*. *Revista de geografía* 19, 41–68.
- Jenks, G.F. 1967. The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography* 7, 186–190.
- Jiang, B., Liu, X. 2012. Scaling of geographic space from the perspective of city and field blocks and using volunteered geographic information. *International Journal of Geographical Information Science* 26, 215–229.
- Kueny, J.A., Day, M.J. 2002. Designation of protected karstlands in Central America: a regional assessment. *Journal of Cave and Karst Studies* 64, 165–174.
- Kusky, T.M. 2009. *Encyclopedia of earth science*. Infobase Publishing.
- López-Ramos, E. 1975. Geological summary of the Yucatan Peninsula. In: *The Gulf of Mexico and the Caribbean*. Plenum Press, New York.
- Lugo, J., Espinoza, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología UNAM* 10, 143–150.
- Lugo, J. 1990. El relieve de la República Mexicana. *Instituto de Geología* 9, 82–111.
- Lyew-Ayee, P., Viles, H.A., Tucker, G.E. 2007. The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 165–179.
- Magdalene, S., Alexander, E. 1995. Sinkhole distribution in Winona County, Minnesota, revisited. University of Minnesota.
- Migoñ, P. 2010. *Geomorphological landscapes of the world*. Springer.
- Ordoñez, I., García, M. 2010. Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *M+ A. Revista Electrónica de Medioambiente* 15–35.
- Parise, M., Waele, J., Gutierrez, F. 2009. Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst. *Environmental Geology* 58, 235–237.
- Prezas, B., Pereira, A., Gamboa, H. 2003. Zonas de importancia para la conservación de fauna silvestre en el área sujeta a ordenamiento ecológico, región Bacalar, Quintana Roo. Presentado en el VIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales y II Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, Querétaro, México.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje.
- Roglic, J. 1972. Historical review of morphologic concepts. *Karst: Important Karst Regions of the Northern Hemisphere*. Elsevier, Amsterdam 1–18.

- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A. 2005. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. *Geoderma* 126, 117–128.
- Siart, C., Bubenzer, O., Eitel, B. 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high-resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology* 112, 106–121.
- UQRoo. 2004a. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo - SEMARNAT - SEDUMA, México.
- Viramontes, O., Escobaza, L., Pinedo, C. 2007. Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. *Tecnociencia* 1(3), 21–31.
- White, W.B. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University press New York.

CAPÍTULO IV. RELACIÓN ENTRE LA GEODIVERSIDAD DE QUINTANA ROO Y SU BIODIVERSIDAD²

Resumen

Para calcular la geodiversidad se utilizó un modelo aditivo simple de categorías de diversidad temática considerando cuatro aspectos relacionados con la heterogeneidad del terreno: la geología, el relieve, los suelos y la hidrología. La geodiversidad se manifiesta como un bandeo que corre de norte a sur, la porción costera con valores de geodiversidad media a muy alta, la porción central en donde se alternan valores de media a muy baja y en la porción occidental valores altos y muy altos. Esta geodiversidad ha permitido el desarrollo de una diversidad biológica que se ve reflejada en la gran cantidad y ubicación de las áreas naturales protegidas decretadas en Quintana Roo.

4.1 Introducción

El término geodiversidad fue utilizado por primera vez en 1993 como un equivalente de biodiversidad para describir la variedad de la naturaleza no viva, en años recientes a nivel internacional este concepto ha ganado aceptación en el Reino Unido, España, Portugal, Italia, Suiza, Finlandia y Japón entre otros, como un nuevo paradigma geológico (Gray, 2008a).

Dentro de las definiciones más integrales se encuentra la de (Kozłowski, 2004) que la concibe como la variedad natural en la superficie terrestre, referida a aspectos geológicos, geomorfológicos, suelos, hidrología, así como otros sistemas generados como resultado de procesos naturales (endógenos y exógenos) y la actividad humana. (Gray, 2008a) define a la geodiversidad como el intervalo natural de diversidad de rasgos geológicos (rocas, minerales y fósiles) geomorfológicos (formas del terreno y procesos) y suelos, incluye sus relaciones, propiedades, interpretaciones y sistemas.

La geodiversidad busca analizar la variabilidad y el número de elementos físico-geográficos de una región, se busca establecer clases que permitan distinguir cuando un elemento es diferente de los otros, para analizar su variedad, frecuencia y distribución (Carcavilla *et al.*, 2008), los métodos para la evaluación y valoración de la geodiversidad son escasos, algunos buscan establecer indicadores objetivos a través de escalas cualitativas o cuantitativas con el uso de diversos modelos e índices (Serrano y Ruiz, 2007).

Para evaluar la geodiversidad en diversas regiones de Polonia, la República Checa, Reino Unido y México, diversos autores han considerado además de la escala, las geoformas, la geología, la hidrología, las variables climáticas, la cobertura y uso del suelo y la vegetación (Jačková y Romportl, 2008; Parks y Mulligan 2010; Priego *et al.*, 2003).

² Artículo publicado en: Fragoso-Servón, P., Pereira, A., Frausto, O., Bautista, F. 2014. Relación entre la geodiversidad de Quintana Roo y su biodiversidad. *Quivera*. Disponible en: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=40132130006> .

Una conclusión generalizada es que la mayor heterogeneidad del paisaje se asocia a una alta complejidad geomorfológica y con ella la mayor riqueza de especies biológicas, sin embargo, en ocasiones la alta riqueza biológica de un territorio puede depender de un factor abiótico particular, en condiciones de relativa homogeneidad geólogo-geomorfológica e hidroclimática (Priego *et al.*, 2003). Es por ello que uno de los retos de los métodos de estudio de la geodiversidad es dar solución a aquellos lugares que muestran una cierta homogeneidad (litológica, cronoestratigráfica, estructural y geomorfológica) a escala media, y sin embargo muestran una diversidad notable de rasgos en detalle, como puede ser un macizo kárstico (Carcavilla *et al.*, 2008).

En México no hay estudios sobre la geodiversidad de uno de los macizos kársticos más extensos del país como lo es la Península de Yucatán. Sin embargo existen algunas descripciones geológicas, geomorfológicas a escalas mediana y pequeñas que reportan una relativa homogeneidad (Lugo *et al.*, 1992; Lugo, 1990); en tanto que los trabajos de orden biológico y ecológico reportan una alta riqueza e incluso dan sustento a un relativamente gran número de áreas naturales protegidas por su biodiversidad como lo ponen de manifiesto los estudios técnicos justificativos que se exigen para sustentar la creación de un Área Natural Protegida.

En el caso de Quintana Roo, se presenta particularmente clara la situación planteada por (Priego *et al.*, 2003) y (Carcavilla *et al.*, 2008), se manifiesta una relativa homogeneidad geólogo-geomorfológica a escalas medias y pequeñas y sin embargo los estudios biológicos que soportan la creación de áreas naturales protegidas indican una elevada biodiversidad, como lo atestigua el número de las mismas en el Estado. Es decir, al estado de Quintana Roo se le reconoce como una zona de importancia para la conservación de la biodiversidad a pesar de ser considerado como una zona con un relieve “homogéneo” o de escasa geodiversidad. Este trabajo pretende aportar elementos que permitan actualizar la imagen que se tiene de la Península de Yucatán al menos en su porción oriental poniendo de manifiesto la geodiversidad que da soporte a la biodiversidad ya reconocida.

El objetivo de este estudio es la identificación y calificación de los elementos del relieve, geológicos, hidrológicos y edafológicos como componentes de la geodiversidad que permitan entender la geodiversidad y su relación con la biodiversidad en Quintana Roo.

4.2 Zona de estudio

La Península de Yucatán en el sureste del país es una extensa plataforma kárstica en cuya porción este se ubica el estado de Quintana Roo, son pocos los estudios sobre karst en el Estado (García *et al.*, 2000; Frausto e Ihl, 2008b; Frausto *et al.*, 2010), algunos de tipo espeleológico e hidrológico dan cuenta de la estructura porosa del mismo y del flujo de agua principalmente subterráneo (Coke, 2004; Ordóñez y García, 2010) como lo atestiguan más de 900 km de galerías subterráneas inundadas y cavernas consideradas entre las más grandes del mundo (QRSS, 2013).

La mayor parte de los mapas topográficos en escala pequeña muestran a la península de Yucatán como una gran planicie; sin embargo, la Península no es una planicie homogénea, en ella existen una amplia diversidad de relieve y ecosistemas, en dónde se pueden encontrar variaciones horizontales en espacios muy cortos (Lugo *et al.*, 1992; Bautista y Palacio 2005; Bautista *et al.*, 2011). Las formas del relieve en Quintana Roo han sido escasamente estudiadas a escalas mayores a 1:250,000, algunos estudios que han considerado la diferenciación altimétrica, la inclinación del terreno y su vínculo con los procesos geomorfológicos en algunas áreas del Estado a escala media han mostrado una heterogeneidad mayor que la presentada por las cartas topográficas (Héraud, 1996; Goldacker y Frausto, 2005; Frausto *et al.*, 2006); Ihl *et al.*, 2007; Beddows *et al.* 2007; Frausto e Ihl, 2008); Aguilar *et al.*, 2010; Frausto e Ihl, 2010, Bautista *et al.*, 2011).

En la mayor parte de Quintana Roo el clima dominante de acuerdo a la cartografía de INEGI (2008a) es el subtipo cálido subhúmedo con régimen de lluvias de verano (Aw), la única variante se presenta en la isla de Cozumel con un tipo de clima cálido húmedo con lluvias abundantes en verano con una estación seca corta en la mitad fría del año (Am(f)) (Figura 2.4).

La elevada cantidad de precipitación y la gran capacidad de infiltración del terreno provocan que la mayor cantidad agua, cerca del 80% se mueva a nivel subterráneo y el restante 20% se distribuya entre lo que intercepta la vegetación, el escurrimiento superficial y la captación directa de los cuerpos de agua: áreas de inundación, lagunas y cenotes (UQRoo, 2004a). La reducida pendiente topográfica propicia que los escurrimientos superficiales sean pocos, de bajo caudal y de muy corto recorrido a excepción del río Hondo en el sureste.

En el Estado se encuentran presentes 12 grupos de suelos de acuerdo a la carta edafológica del INEGI (2008b), los grupos presentes son Leptosoles, Phaeozems, Vertisoles, Gleysoles, Luvisoles, Solonchaks, Arenosoles, Regosoles, Histosoles, Nitisoles, Cambisoles y Fluvisoles. Los Leptosoles ocupan la mayor superficie y se caracterizan por ser delgados y pedregosos, los Phaeozems son ricos en materia orgánica y se ubican principalmente en el occidente del Estado junto con los Vertisoles (ricos en arcillas) y Gleysoles que se distinguen por tener mal drenaje, los suelos rojizos en el Estado son principalmente Luvisoles, Cambisoles y Nitisoles que predominan en la porción centro-oeste. En las zonas costeras se presentan los suelos jóvenes como los Regosoles, Arenosoles y Solonchaks que presentan un alto contenido de sales, en menor porcentaje se encuentran los Histosoles (suelos orgánicos y Fluvisoles (asociados a corrientes superficiales).

4.3 Materiales y métodos

Existe una variedad limitada de metodologías que han sido usadas para identificar y medir la geodiversidad ya sea para el estudio mismo de ella o para su uso en la toma de decisiones sobre el manejo del territorio, de cualquier forma, muchas de las técnicas de medida de la geodiversidad se han derivado de sus equivalentes para el estudio de la

biodiversidad (Ibáñez y García, 2002; Benito-Calvo *et al.*, 2009; Cantú *et al.*, 2004; Zwoliński y Stachowiak, 2012; Xavier-da-Silva y de Carvalho-Filho, 2004; Pike, 2000).

Para el presente trabajo se optó por usar la riqueza de atributos por unidad de estudio de Jačková y Romportl (2008), en este caso las unidades sobre las cuales se evaluó la riqueza de atributos fueron definidas por la zonificación resultante del análisis de alturas relativas de las formaciones de terreno para el Estado completo.

Para la elaboración de la carta síntesis de los atributos hipsométricos se usaron las 80 cartas topográficas del INEGI (2005) que cubren la superficie del Estado en formato vectorial; se unieron y se corrigieron las inconsistencias derivadas de la unión de las cartas.

A partir de la carta síntesis se construyó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) por interpolación en formato raster con resolución horizontal 1:50000 y resolución vertical de 10 m (Chen y Yue, 2010; Yue *et al.* 2007; Takagi y Shibasaki, 1996), este MDE fue utilizado para hacer la medición de las alturas relativas de las formaciones de terreno detectadas con la técnica propuesta por (Priego *et al.*, 2010), la representación resultante en m/km² de las formaciones sirvió para construir una zonificación del territorio del Estado como base para la asignación de los diferentes atributos del mismo.

Una vez establecidas las unidades territoriales, para calcular la geodiversidad se utilizó un modelo aditivo simple de categorías de diversidad temática considerando cuatro aspectos relacionados con la heterogeneidad del terreno, el modelo se expresa como:

$G = D_g(250) + D_e(250) + D_r(50) + D_h(50)$	
Donde:	D_h = diversidad hidrológica
G = Geodiversidad	D_e = diversidad edafológica
D_g = diversidad geológica	250 = resolución espacial, en metros
D_r = diversidad del relieve	50 = resolución espacial, en metros

La información Geológica fue simplificada al conteo de las estructuras geológicas diferentes que se encuentran reportadas dentro de cada una de las zonas definidas a partir del relieve, se utilizó la información correspondiente a la edad aproximada de las estructuras geológicas identificadas y reportadas en la cartografía 1:250000 del INEGI (2000a), contabilizando el número de formaciones para cada una de las zonas inicialmente definidas (Cuadro 4.1)

La diversidad edafológica por zona se procesó de manera similar a la información geológica, dado que la cartografía 1:250000 del INEGI (2005b) utiliza un sistema de representación en el cual se consideran los tres grupos de suelos más abundantes o dominantes para cada polígono pero no especifica la superficie o porcentaje ocupado por cada uno (Bautista *et al.*, 2004; Cotler, 2003), se tomaron los grupos de suelo primarios o de mayor dominancia como identificadores, contabilizándose el número de grupos primarios de suelos diferentes en cada zona (Cuadro 4.1.)

Cuadro 4.1. Categorizaciones de la diversidad de los atributos del territorio (diversidades temáticas).

Categoría	Puntaje	Atributo
Geología		
Muy Alta	5	Más de 4 formaciones geológicas en la unidad
Alta	4	4 formaciones geológicas en la unidad
Media	3	3 formaciones geológicas en la unidad
Baja	2	2 formaciones geológicas en la unidad
Muy Baja	1	1 formación geológica en la unidad
Edafología		
Muy Alta	5	8-9 grupos de suelo en la unidad
Alta	4	6-7 grupos de suelo en la unidad
Media	3	4-5 grupos de suelo en la unidad
Baja	2	2-3 grupos de suelo en la unidad
Muy Baja	1	1 grupo de suelo en la unidad
Altura relativa		
Muy Alta	5	Altura relativa de 60 a 250 m/km ²
Alta	4	Altura relativa de 30 a 60 m/km ²
Media	3	Altura relativa de 15 a 30 m/km ²
Baja	2	Altura relativa de 2.5 a 15 m/km ²
Muy Baja	1	Altura relativa < 2.5 m/km ²
Hidrología		
Muy Alta	5	Más de 4 tipos de cuerpos de agua expuesto en la unidad
Alta	4	4 tipos de cuerpos de agua expuesto en la unidad
Media	3	3 tipos de cuerpos de agua expuesto en la unidad
Baja	2	2 tipos de cuerpos de agua expuesto en la unidad
Muy Baja	1	0 – 1 tipo de cuerpo de agua expuesto en la unidad

La diversidad del relieve definida a partir de un análisis de las alturas relativas que tienen las formaciones del terreno para cada punto del Estado da una primera medida de la heterogeneidad del territorio y permite la asignación de una escala valorativa de la diversidad o heterogeneidad del mismo en función de la diferencia de alturas por unidad de área (Zwoliński, 2010; Zwoliński y Stachowiak, 2012), los intervalos utilizados se presentan en el Cuadro 4.1.

La hidrografía se trabajó con base en los registros existentes en la cartografía del INEGI (2005) de cuerpos de agua y depresiones con inundaciones permanentes y fue enriquecido con observaciones de campo, con otras fuentes cartográficas como imágenes de satélite temáticas para identificar láminas de agua expuestas en distintas épocas del año para confirmar la inundación permanente dada la fuerte karsticidad del Estado (Frausto e Ihl, 2010) y la prácticamente nula existencia de corrientes superficiales permanentes. La jerarquización se hizo con base en los tipos y número de cuerpos de agua o depresiones inundadas por cada una de las zonas definidas por el relieve (Cuadro 4.1).

La Geodiversidad por adición de sus cuatro componentes puede tener valor mínimo de 4 y máximo de 20, para fines de la expresión cartográfica simplificada del valor de geodiversidad se dividió la gama completa de geodiversidades en cinco subintervalos con

el algoritmo de Jenks (Jenks, 1977), el cual genera la siguiente clasificación: valores de 4 a 5 muy baja, de 6 a 7 baja, 8 a 9 media, 10 a 12 alta y 13 a 17 muy alta.

Para simplificar la evaluación visual de los elementos sobre el MDE se elaboraron tres perfiles topográficos (toposecuencias) con el objetivo de mostrar las variaciones de las alturas, tipo de superficies (plana, cóncava o convexa) y el tipo de pendientes (horizontal a vertical), siguiendo para ello los criterios de Ortíz (1988) y De Pedraza (1996), asimismo, se plasmaron en las gráficas, los resultados correspondientes a las diversidades físicas (geológica, edafológica altimétrica e hidrológica) registradas y a la geodiversidad total como suma de ellas.

Para la información de la diversidad biológica se utilizó como un indicador genérico no cuantificado la carta de uso del suelo y vegetación serie IV del INEGI escala 1:250000 (INEGI, 2009) la cual está basada en información del Nacional Forestal y de Suelos 2009 con actualizaciones a 2010 y 2011 (CONAFOR, 2009) en tanto se elaboran estudios más específicos para cubrir estos aspectos.

Sobre estos elementos (la geodiversidad y la cobertura vegetal) se visualizaron los límites de las ANP en el Estado para hacer una estimación de la diversidad de paisajes, de cobertura biológica y de geodiversidad que están abarcando, y poder establecer un juicio no métrico acerca de la pertinencia de dichas ubicaciones para estas ANP.

Todos los procesos de identificación, cuantificación o asignación de atributos se llevaron a cabo en un sistema de información geográfica manejado con ArcGIS® 9.3.

4.4 Análisis de geodiversidad

Diversidad geológica. En la porción norte y de menor altura del Estado (Figura 4.1) se registra una baja diversidad geológica debido a la gran extensión que tienen los afloramientos de las formaciones del terciario, esta gran zona se encuentra limitada hacia la costa por una franja que va de los 1000 a 1500 m de ancho en su parte sur hasta los 20 km en la parte norte. Hacia el extremo norte abundan depósitos del Cuaternario lo cual incrementa la diversidad geológica por unidad. Las zonas que presentan categoría muy alta y alta se ubican principalmente en la parte sur y oeste en donde se encuentran las formaciones geológicas más antiguas correspondientes a diferentes periodos del terciario, combinadas con depósitos del cuaternario principalmente de tipo fluvial y lacustre en los valles y partes bajas de las cuencas (UQRoo, 2004a); en zonas costeras y en la isla de Cozumel se registra una gran mezcla de espacios con depósitos del cuaternario de tipo eólico, litoral, lacustre y palustre, mezcla que genera valores altos de diversidad geológica. Del centro y hacia el noroeste donde la formación geológica expuesta continua hacia el estado de Yucatán se ubican las zonas con diversidades geológicas en los niveles de baja y muy baja.

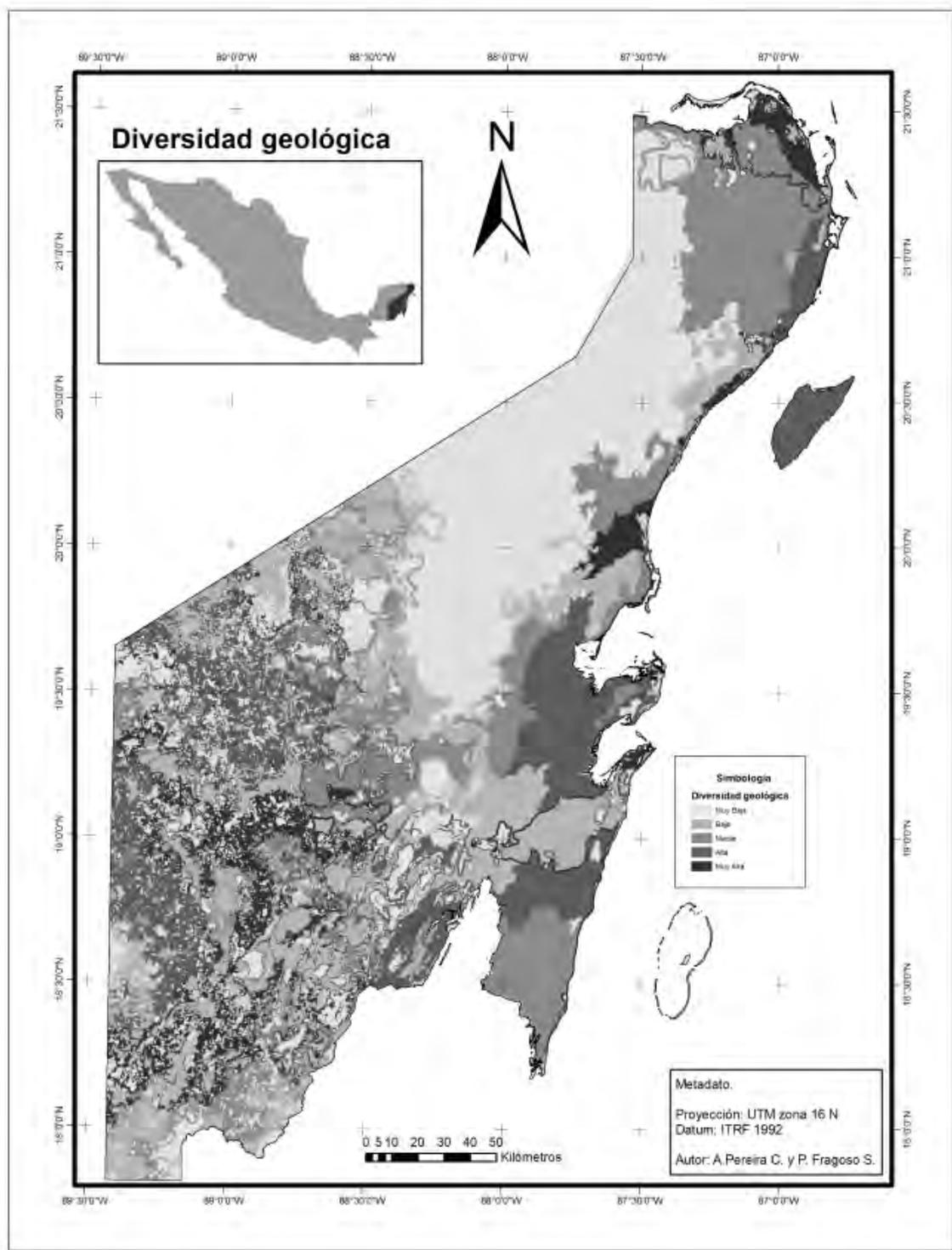


Figura 4.1 Diversidad Geológica (elaboración propia)

Diversidad Edafológica. Considerando los distintos grupos de suelos que se encuentran en Quintana Roo, la Figura 4.2 muestra las zonas con las cinco categorías de diversidad, destacan tres zonas con valores alto y muy alto: la zona centro oeste y sur, las cuales coinciden con zonas en las cuales las diversidades altimétrica, geológica e hidrológica son medias y altas; la segunda zona donde la diversidad altimétrica disminuye hacia planicies con ondulaciones y hondonadas y la tercera zona se encuentra asociada con la zona de cuerpos de agua del Sistema Lagunar Bacalar al sur-sureste del Estado y sus sistema de descargas que se ramifica hasta la porción costera. En la zona centro y hacia la costa en donde se encuentran planicies de inundación se presentan categorías media y alta. Se observan dos zonas con diversidad baja de suelos en el centro del Estado y un poco más al norte en donde los Leptosoles ocupan la mayor parte del área y se encuentran asociados con los sitios de menor diversidad hidrológica igualmente.

Diversidad de alturas relativas. En Quintana Roo los registros de altura van desde 0 msnm en las zonas costeras hasta un máximo de 380 msnm en el extremo sur. En la Figura 4.3 puede apreciarse la diversidad de alturas relativas que hay en el Estado, se observa que se distribuyen en forma de franjas paralelas desde la zona costera con muy baja energía del relieve (categoría 1), aumenta hacia el oeste y sur hasta el extremo suroeste en la frontera con Belice y Guatemala en dónde se registran los valores más altos. Entre la transición de la zona media a alta, se aprecia un área dónde se alternan zonas de categoría baja, media e incluso alta. Cada uno de los diferentes espacios coincide parcialmente con los pisos altimétricos descritos inicialmente, sobresale en esta distribución una serie de franjas estrechas que corresponden a pequeños espacios en los cuales la combinación de formas del terreno incrementa la geodiversidad de manera semejante a como se incrementa la diversidad biológica en los ecotonos, y ponen de manifiesto efectivamente zonas de transición entre espacios con diversidad relativamente homogénea.

Diversidad de la hidrología superficial. Estudiando los cuerpos de agua superficiales, en la Figura 4.4 se observa que cerca del 50% del territorio se encuentra dentro de las categorías de diversidad muy alta y alta, las cuales se distribuyen principalmente en la zona oeste, central, norte y en algunas zonas costeras, en estas zonas hay abundancia de cuerpos de agua característicos de las zonas kársticas como los llamados cenotes y lagunas, los cuales en su mayoría se encuentran conectados al manto freático, en la parte central del Estado y hacia el norte, en la planicie se encuentran grandes espacios con diversidades bajas, coinciden con espacios escasamente alterados de las formaciones geológicas del terciario y con zonas de inundaciones permanentes o semipermanentes como las que se encuentran al oeste de las bahías.

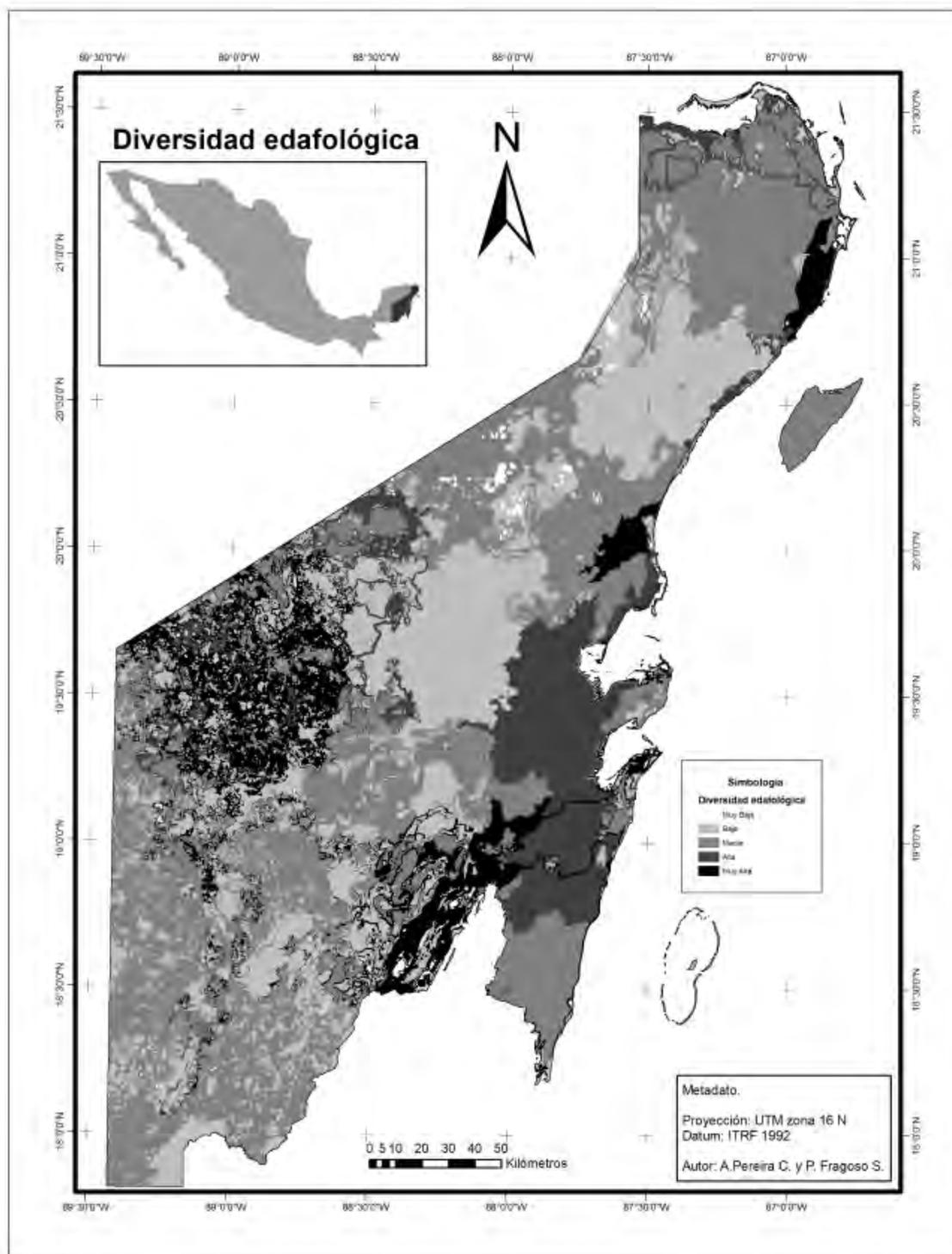


Figura 4.2 Diversidad edafológica (elaboración propia).

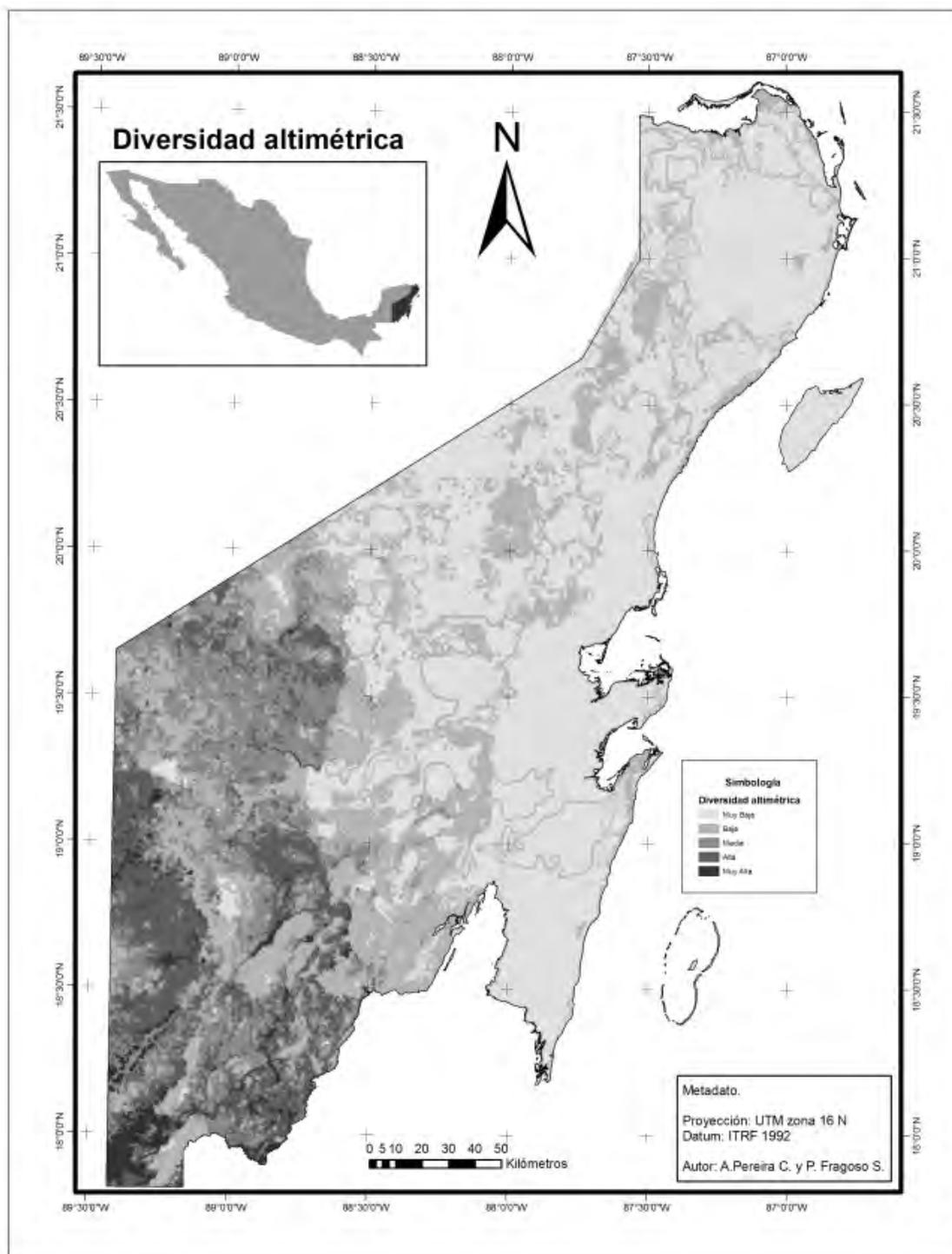


Figura 4.3 Diversidad altimétrica o energía del relieve (elaboración propia).

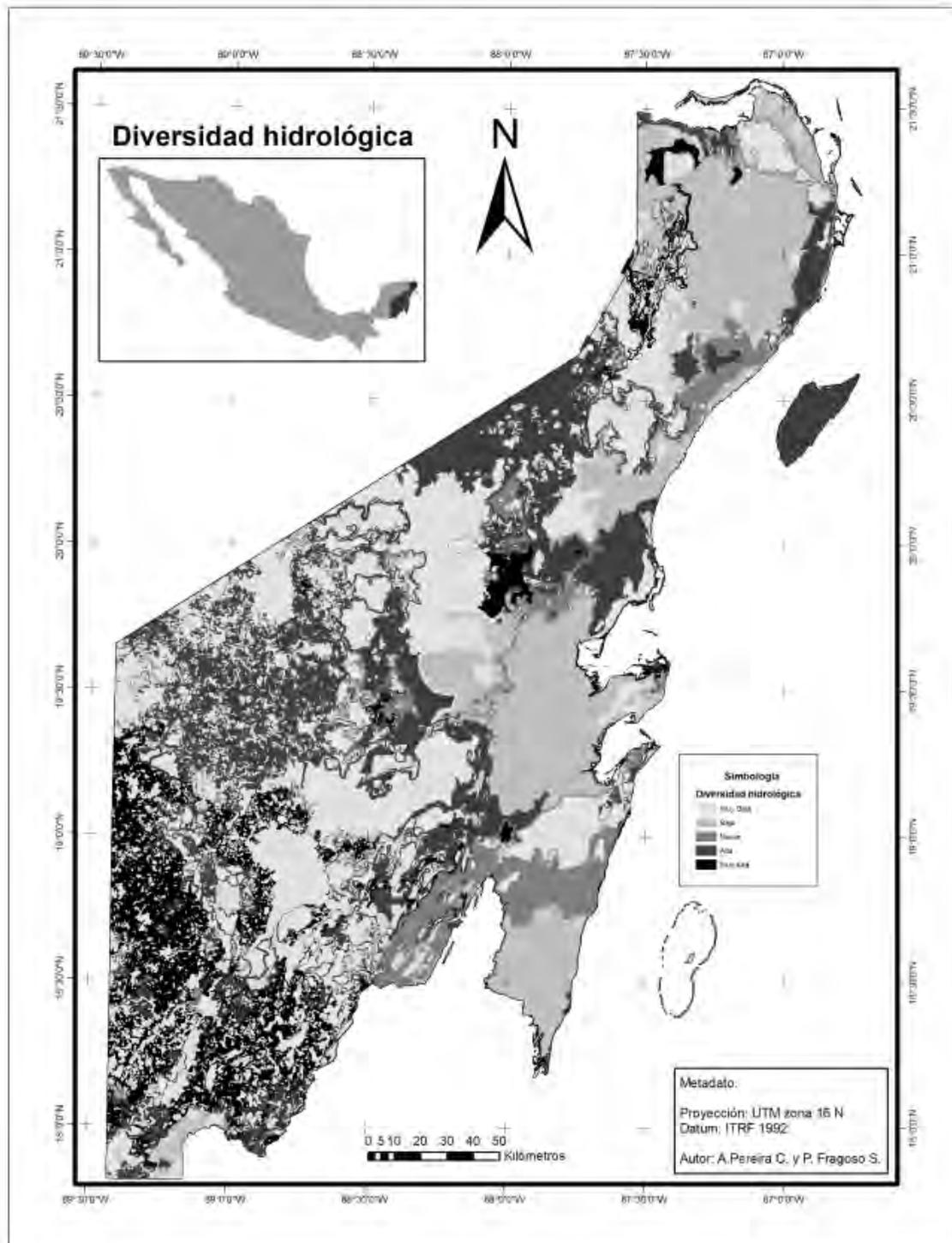


Figura 4.4 Diversidad hidrológica (elaboración propia)

4.5 Diversidad biológica

Quintana Roo es uno de los estados del país con la vegetación mejor conservada, aquí se encuentran presentes de acuerdo a INEGI (2009) los tres tipos de selva (alta, mediana y baja), vegetación característica de zonas de inundación (palmar, tular, manglar), zonas de pastizales y zonas cultivadas principalmente (Figura 4.5).

Las zonas con selva alta subcaducifolia se ubican en el extremo suroeste, en la colindancia con Campeche, Guatemala y Belice, la selva mediana ocupa la mayor parte del territorio como una franja central a lo largo de la superficie del Estado ya que en hacia el oeste, en la colindancia con Yucatán, hacia el norte y hacia las costas se desarrolla la selva baja, esta vegetación también se encuentra en forma de manchones en el centro-sur.

En las áreas cercanas a la costa se presenta la vegetación característica las zonas de inundación con y sin influencia marina como el palmar, el tular y los manglares, sobresaliendo en la zona norte y en la parte centro (Zona de las Bahías), en esta última destaca la llamada vegetación de Peten.

Formando manchones distribuidos en toda la superficie estatal se ubican zonas de pastizales, principalmente cerca de las zonas agrícolas. Quintana Roo no es un Estado que con mucha superficie cultivada, las áreas agrícolas se ubican en el centro-oeste y principalmente en el sur.

El Estado cuenta con 23 Áreas Naturales Protegidas (ANP) que representan el 25.3% de su superficie y se han propuesto 12 áreas más para ingresar a la lista (Prezas, 2011).

4.6 Perfiles topográficos

Para el análisis de las relaciones antes descritas se construyeron tres perfiles altimétricos del territorio los cuales permiten la comparación simultánea de los elementos componentes de la geodiversidad y de la vegetación para cada punto de los transectos seleccionados.

El primer perfil topográfico corre de sur a norte sobre el límite occidental del Estado (Figura 4.5 A-B) en él se puede observar a lo largo de los 200 km que las alturas varían de sur a norte, de 350 hasta 80 msnm (Figura 4.6), atraviesa por las tres formaciones geológicas más antiguas del Estado y se identifican cuatro grandes estructuras.

La primera y segunda sección (I y II) en el sur, se distinguen por su homogeneidad y gran altura, la tercera (III) se constituye de un bloque de hundimiento en donde se encuentran la mayor variedad de tipos de vegetación en un clima subhúmedo, la cuarta (IV) en el norte, se caracteriza por ser una planicie elevada debida a la intensidad de karstificación del relieve con siete tipos de vegetación y la mayor cantidad de grupos de suelos, los de mayor profundidad.

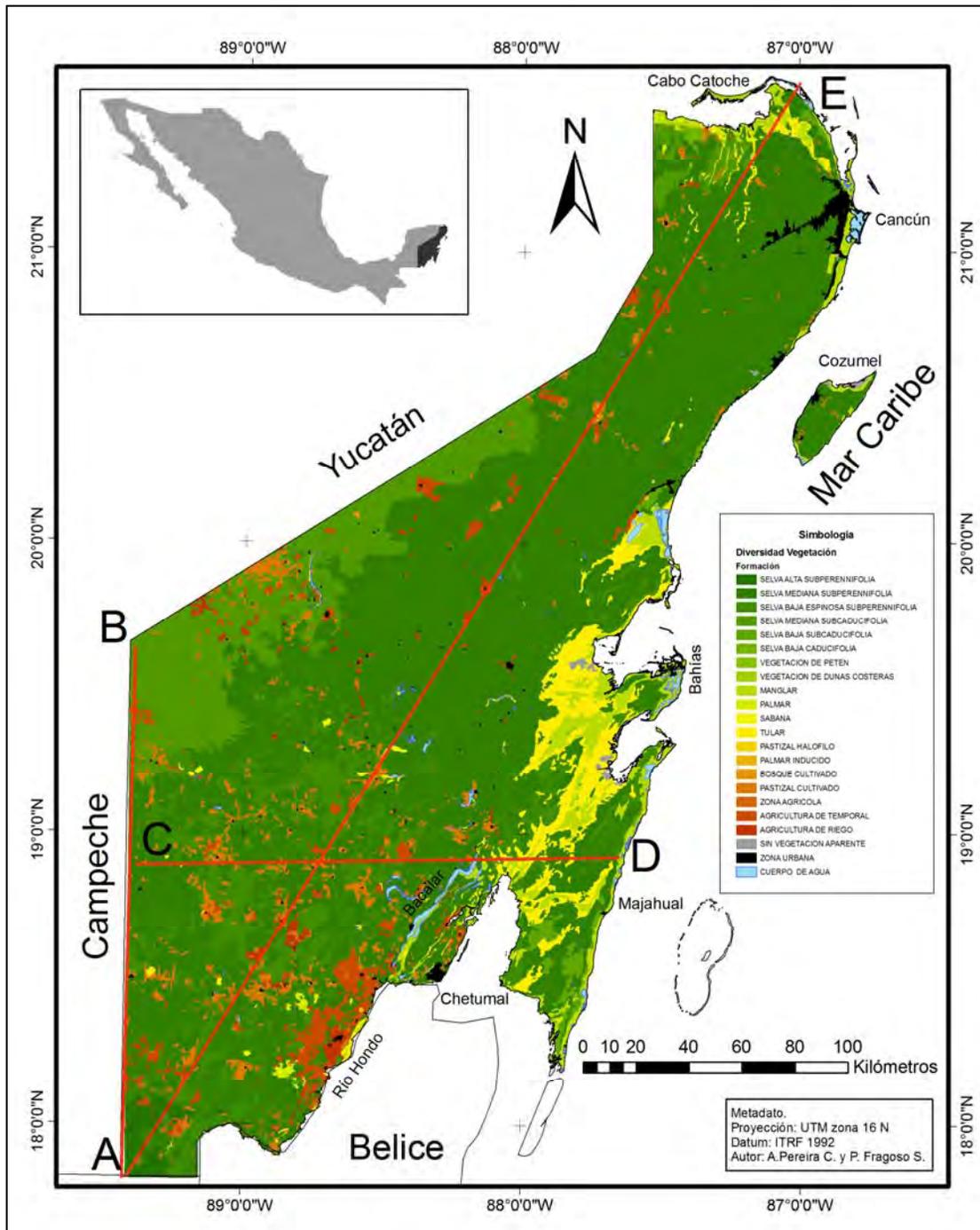


Figura 4.5 Diversidad de cobertura vegetal.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de CONAFOR-SEMARNAT (2011).

La diversidad hídrica va de media a baja y está representada por cuerpos de agua en las partes bajas de las formaciones, principalmente en pequeños valles de disolución y plegamiento.

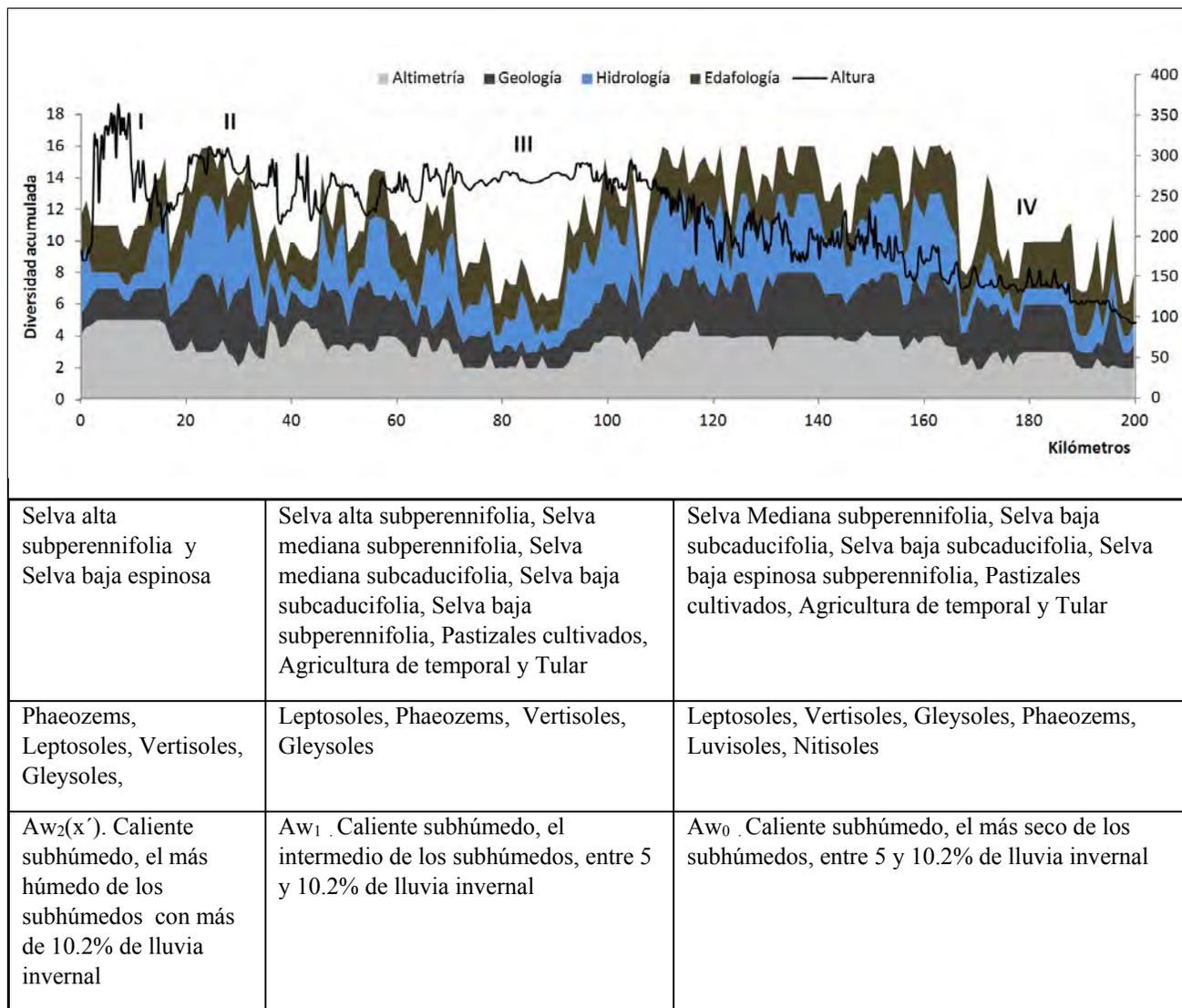


Figura 4.6 Perfil Topográfico y de unidades de geodiversidad A-B

El segundo perfil topográfico atraviesa a lo ancho el Estado de oeste a este (Figura 4.5 C-D), desde la parte media del límite con Campeche hasta la costa a la altura de Majahual (cerca de 250 km), se observa un cambio de alturas más abrupto (Figura 4.7), en el extremo oeste de una altura de 250 msnm (I), después de 75 km hay un descenso mayor hasta los 50 msnm (III) y posteriormente va casi recta hasta la costa (IV). Las formaciones geológicas son formaciones del terciario, las más antiguas se presentan en el oeste (I y II) y las formaciones recientes en la costa.

En la zona de mayor altitud se presentan cuerpos de agua asociados a cuencas cerradas pero a medida que se acerca a la costa se presentan importantes zonas con cuerpos de agua como la zona de Bacalar y zonas de inundación asociados a exposiciones del manto freático que en la parte costera del Estado se encuentra a poca profundidad.

La zona por debajo de los 50 msnm (IV) en donde el clima es más húmedo, se presenta la mayor variedad de tipos de vegetación al incorporarse aquella que es características de las zonas planas y con áreas con inundación temporal y permanente e igualmente en esta zona se encuentra la mayor variedad de grupos de suelos.

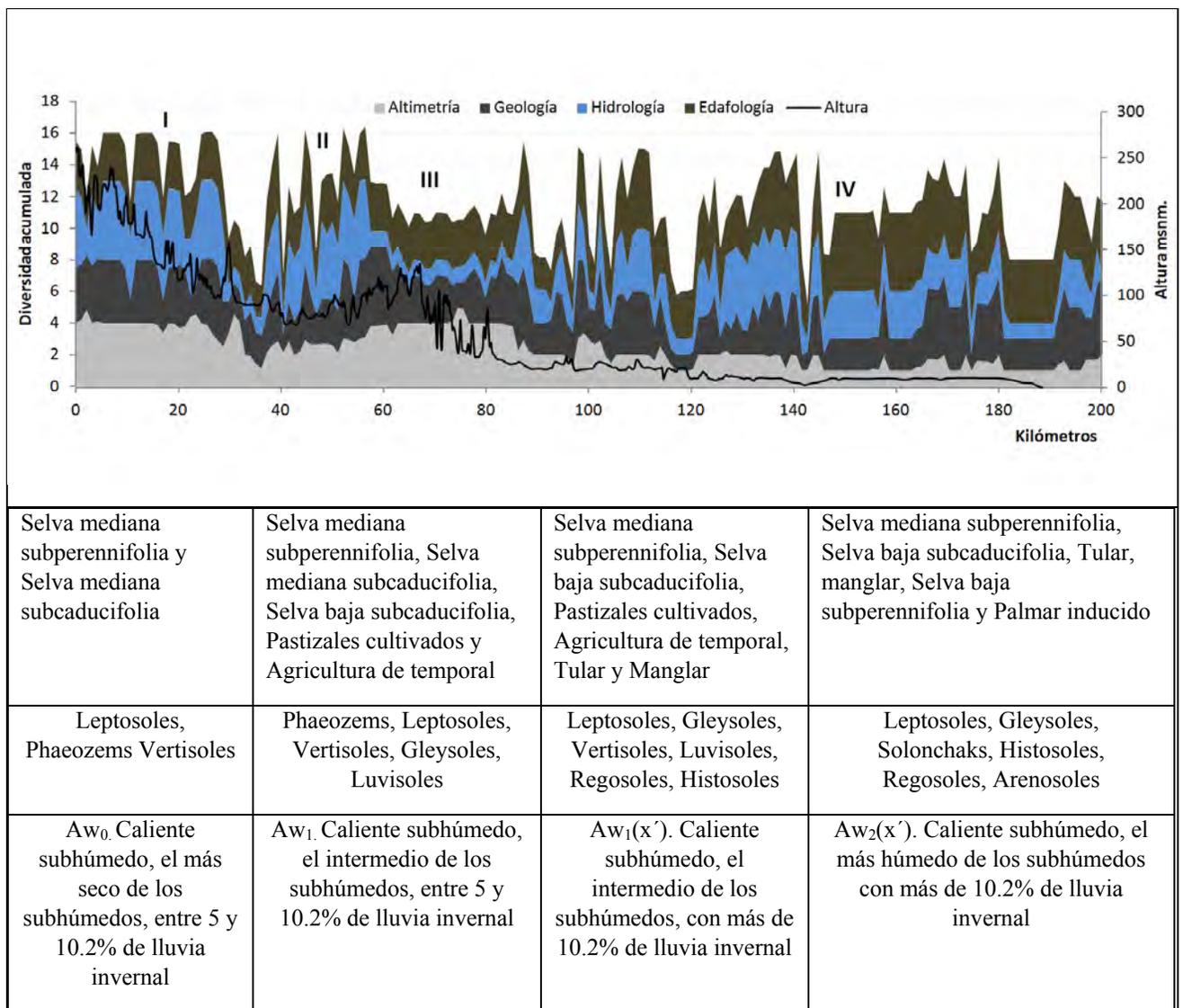
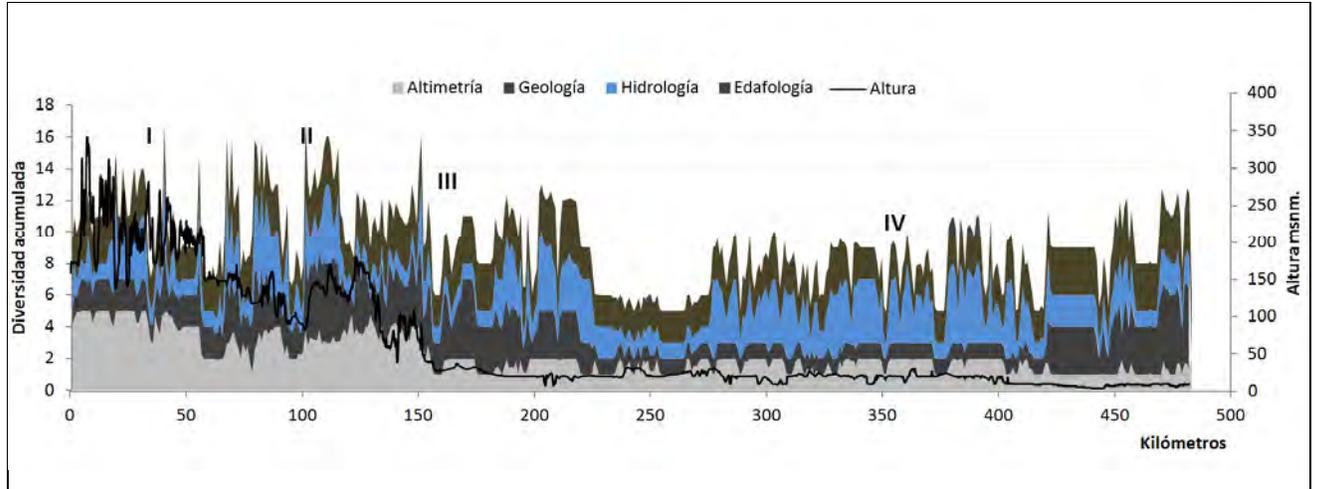


Figura 4.7 Perfil topográfico y de unidades de biodiversidad C-D.

El tercer perfil topográfico va en diagonal a lo largo del Estado (Figura 4.5 A-E), con cerca de 500 km, de suroeste a noreste. Se observa que el descenso de altura se realiza en dos partes (Figura 4.8), la primera del inicio hasta los primeros 50 km y otra después de los 100 km, también es notorio que cerca del 75% del área está por debajo de 50 m de altura. Las formaciones geológicas más antiguas se encuentran en la parte sur y las más recientes del Cuaternario en el extremo norte.

En cuanto a la diversidad hidrológica presenta dos zonas particularmente interesantes la primera de ellas en el suroeste donde se aprecian cuerpos de agua de pequeña extensión localizados entre los plegamientos y lomeríos bajos. La segunda zona corresponde a la parte baja (zona IV) en donde hay una alta diversidad hidrológica correspondiendo a la presencia principalmente de cenotes que se encuentran asociados a los sistemas de fallamientos.

La mayor variedad de vegetación se presenta en la zona II donde se alternan lomeríos y valles y en la zona IV en los últimos 400 km, en el noreste y hacia la costa donde hay abundantes zonas de inundación con presencia de selvas bajas, sabanas, tulares y manglares (Figura 5.4). En estas dos zonas también se presentan la mayor cantidad de grupos de suelos, en la zona II suelos con mayor profundidad (Phaeozems y Vertisoles y en la zona IV suelos con influencia costera (Solonchaks y Arenosoles).



Selva alta subperennifolia y Selva baja espinosa	Selva alta subperennifolia, Selva mediana Subperennifolia, Selva mediana subcaducifolia, Selva baja subcaducifolia, Selva baja espinosa subperennifolia, Pastizales cultivados, Agricultura de temporal y Tular	Selva mediana subperennifolia, Selva baja subcaducifolia, Pastizales cultivados, Agricultura de temporal, Tular y Manglar	Selva mediana subperennifolia, Selva baja subcaducifolia, Pastizales cultivados, Agricultura de temporal, Tular, manglar, Vegetación de Peten y Palmar inducido.	Selva mediana Subperennifolia, Selva baja subcaducifolia, Pastizal cultivado, Agricultura de temporal, Tular y Manglar.	Selva mediana subperennifolia, Selva baja subcaducifolia, Pastizales cultivados, Agricultura de temporal, Sabana, Tular, Manglar y Palmar inducido.
Leptosoles, Phaeozems, Vertisoles, Gleysoles	Leptosoles, Phaeozems, Vertisoles, Gleysoles, Luvisoles	Leptosoles, Vertisoles, Gleysoles, Luvisoles	Leptosoles, Vertisoles, Phaeozems	Leptosoles, Phaeozems	Leptosoles, Phaeozems, Gleysoles, Solonchaks, Arenosoles
$Aw_2(x')$. Caliente subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos con más de 10.2% de lluvia invernal	Aw_1 . Caliente subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, entre 5 y 10.2% de lluvia invernal	$Aw_1(x')$. Caliente subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, con más de 10.2% de lluvia invernal	$Aw_2(x')$. Caliente subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos con más de 10.2% de lluvia invernal	$Aw_1(x')$. Caliente subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, con más de 10.2% de lluvia invernal	$Aw_0(x')$. Caliente subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con más de 10.2% de lluvia invernal

Figura 4.8 Perfil topográfico y de unidades de biodiversidad A-E

4.7 Geodiversidad

Calculadas las diversidades específicas por cada uno de los atributos se diferenciaron la Geodiversidad en cinco categorías, a partir de las cuales se construyó la representación de la Figura 4.9. Se observa que la mayor parte del territorio se encuentra dentro de las categorías que van de media a muy alta, con una franja de poco más de 40 km de ancho de bordes irregulares y que corre de norte a sur por el centro del estado con diversidades bajas y muy bajas.

De este modo se puede apreciar que la geodiversidad en Quintana Roo construida a partir del relieve, la geología, la hidrología y los suelos muestra tres grandes áreas, una zona al oeste con valores de geodiversidad de media a muy alta, una zona intermedia en la parte central en donde los valores de geodiversidad van de media a muy baja y una tercera zona, en la parte de menor altura y hacia la zona costera del Estado en donde la geodiversidad tiene valores nuevamente de media a muy alta.

La zona con mayor geodiversidad en la porción oeste, es la zona geológica más antigua del Estado, aquí el relieve con alturas por encima de los 70 msnm permite la formación de zonas erosivas y de acumulación que permiten el desarrollo de diversos suelos y zonas de acumulación y escurrimientos de agua, esto conlleva a un cierto tipo de diversidad de la vegetación.

Otros sitios con geodiversidad alta se encuentran más cercanos a la costa, uno de ellos asociado al Sistema Lagunar Bacalar al sureste del Estado en donde la mezcla de suelos y la exposición de materiales parentales cerca de la superficie por el fracturamiento que originó el sistema, así como la deposición compleja de materiales asociada con abundancia de agua ha formado un complejo en el cual la riqueza de suelos es mayor que en las áreas vecinas; el segundo de ellos es un sitio cercano a la costa en la porción norte del estado en donde la asociación de un sistema de hondonadas bajas al sistema de lagunas costeras con la influencia de los procesos litorales han creado igualmente una zona de alta diversidad edafológica.

Los espacios que se encuentran hacia el centro y norte del Estado presentan de manera preferencial geodiversidades medias y bajas, destacando algunas áreas con geodiversidades muy bajas.

La zona al este, a pesar de ser la zona con las menores alturas, es una zona en donde nuevamente hay geodiversidad de media a muy alta, en esta zona hay una gran cantidad de cuerpos de agua formados por la disolución de la roca calcárea y la poca profundidad del manto freático, la misma disolución de la roca permite la formación de formas negativas de relieve en las cuales la acumulación de materiales permite el desarrollo de suelos con características diferenciadas convirtiéndola en una zona rica en depósitos aluviales, eólicos y lacustres. En las zonas cercanas a la costa los depósitos lacustres, palustres y litorales desarrollan ambientes de transición mar-tierra como las zonas de humedales en donde se

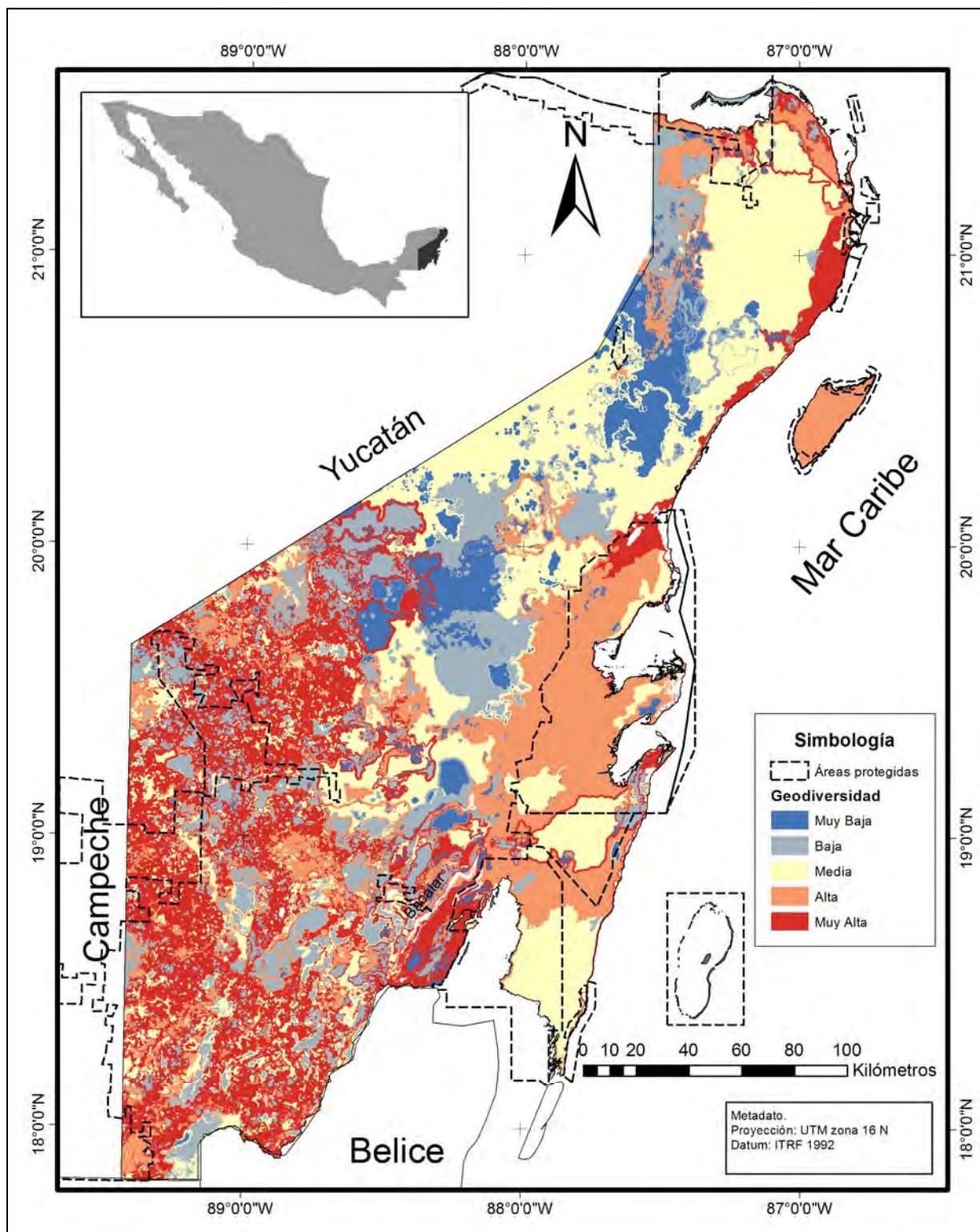


Figura 4.9 Geodiversidad y Áreas Naturales Protegidas de Quintana Roo.
Fuente: elaboración propia y Prezas (2011).

presentan suelos y vegetación característicos, todo ello contribuye a la elevada geodiversidad de la zona de menor altura.

La zona costera que va desde la parte central hacia el norte presenta una geodiversidad muy alta, por la combinación de valores altos en los aspectos geológicos, hidrológicos y edafológicos y no por su diversidad altimétrica, del centro hacia el sur la geodiversidad es media y alta, aquí se encuentra un gran espacio relativamente homogéneo que presenta valores de diversidad altimétrica escasos, pero que al ser planicies de inundación marina costeras, presentan diversidades geológicas en superficie de medias a altas al igual que favorecen la ocurrencia de diferentes grupos de suelos que les permiten alcanzar grados semejantes de diversidad en el aspecto edafológico.

La riqueza y diversidad biológica en la escala usada para este trabajo manifiesta la existencia de un mosaico de formaciones vegetales particularmente rico con más de diez clases diferentes, diversidad que se vería incrementada si se revisaran las composiciones específicas por comunidad tal como lo demuestran la gran cantidad de estudios sobre diversidad ecológica de la región y la gran cantidad de endemismos reportados para la Península de Yucatán (CONABIO, 1995; Orians *et al.*, 1995; Ibarra *et al.*, 1996; Ochoa y Flores, 2006; Gutierrez *et al.*, 2011; Escalante *et al.*, 2007a; Escalante *et al.*, 2007b).

La parte central y hacia el sur del Estado muestran una gran heterogeneidad en la vegetación, en dónde pueden hallarse desde formaciones de selva mediana hasta selvas espinosas subcaducifolias en las laderas expuestas y selvas bajas inundables combinadas con vegetación de humedales en los bajos y cauces temporales y extraordinarios, tal como lo reportan para Campeche en la zona de bajos inundables (Palacio *et al.*, 2012).

4.8 Discusión

La utilización del término geodiversidad es mayor cada día, pero las metodologías para su evaluación y valoración aún son limitadas. Hasta el momento la mayor parte de los estudios utilizan métodos cualitativos en los cuales la delimitación de las unidades geomorfológicas y el inventario de los componentes de la geodiversidad (geología, suelos, relieve e hidrología) son valorados en algún intervalo de manera frecuentemente subjetiva. En este trabajo para reducir la subjetividad de la calificación se utilizó una escala de cinco clases en cada uno de los componentes de la geodiversidad basado en el número de atributos diferentes de cada uno de los componentes, que van de muy baja a muy alta.

Este enfoque permite comparar en la misma escala semicuantitativa atributos que pueden tener un número variable de manifestaciones y permite comparar las diferentes zonas del Estado de manera objetiva independientemente de la percepción que se tenga de ellas.

Si bien existen índices y modelos más finos para medir la diversidad que la simple riqueza de atributos, ellos requieren de información que en muchos casos no existe para el territorio nacional.

La cuantificación específica que se requiere de cada una de las distintas manifestaciones de un atributo para tener un indicador cuantitativo de la dominancia de una de esas manifestaciones sobre las otras y por lo tanto un indicador de la homogeneidad del espacio muestreado respecto a ese atributo específico, no se tiene para muchos de los atributos.

Un ejemplo específico es el caso de la información sobre suelos, la cual se tiene disponible en polígonos relativamente amplios para los cuales se reportan por parte de INEGI los grupos de suelos que sobrepasen el 20% de cobertura al interior de la unidad, hasta tres de ellos. Lo anterior implica que en el mejor de los casos se sabe que en un espacio dado hay tres grupos de suelos y que cada uno de ellos ocupa al menos el 20% de la superficie de la unidad, pero esta aproximación deja como elemento libre el 40% de la superficie asumiendo una distribución equitativa de la superficie entre los grupos reportados, generando una gran incertidumbre.

En comparación, el conteo simple del número de grupos proporciona una mayor certeza ya que independientemente de la abundancia relativa del mismo, se tiene la certeza de su existencia, eso permite ganar certidumbre en los análisis a costa de la profundidad y el detalle de la información, mismos que de todas formas no están disponibles.

Considerando las limitantes para cada uno de los atributos, se optó por usar un análisis geomorfométrico del terreno como la base para la asignación del resto de los atributos. El análisis de los componentes de la geodiversidad en el Estado se llevó a cabo con base en la información disponible, la cobertura vegetal, las rocas y los suelos se encuentran a escala 1:250000 y el relieve y la hidrología a escala 1:50000.

Éste es un problema cuando se quieren hacer estudios a nivel estatal en el país, la calidad y certidumbre, la escala y la disponibilidad de información, la solución en este estudio fue iniciar con las categorías de baja resolución rocas y suelos para identificar sus variaciones y posteriormente señalar los atributos más finos, relieve e hidrología.

Con base en lo anterior se llevó a cabo el análisis morfométrico para medir con mayor exactitud la heterogeneidad espacial que subyace esa imagen de relativa homogeneidad que se manifiesta en escala 1:250000. En este trabajo el uso de un indicador bidimensional es utilizado para resaltar e identificar unidades espaciales que de otra forma serían prácticamente indistinguibles, y se presenta como propuesta complementaria al método tradicional de identificación de unidades.

La imagen de la península de Yucatán como una plataforma kárstica relativamente homogénea cambia cuando se analizan las características fisiográficas y biológicas a escalas medias y grandes.

La energía del relieve de la Península de Yucatán es escasa cuando se compara con otras zonas del país o del mundo, en las cuales las formaciones volcánicas generan estructuras y paisajes más agrestes.

Sin embargo, por un lado no se están comparando dos objetos de la misma naturaleza ya que la Península es básicamente un gran depósito sedimentario de carácter platafórmico en tanto que otras regiones son producto de procesos orogénicos más intensos y de mayor energía; y por otro lado, la comparación se hace en términos de criterios de clasificación desarrollados para espacios de escala nacional o continental, no a escala regional.

Como ejemplo se puede citar la geodiversidad reportada de los Cárpatos polacos para los que se considera que una estructura con más de 50 m de altura relativa es de "muy alta geodiversidad" (Zwoliński, 2010), en este trabajo orientado exclusivamente a Quintana Roo, este valor es de "alta geodiversidad" ya que en el Estado encontramos formaciones de terreno reconocibles con alturas relativas de más de 100 m que corresponden a la clase de "Muy Alta geodiversidad".

De tiempo atrás, tanto coloquialmente como técnicamente se ha venido considerando que este gran macizo kárstico de la Península de Yucatán es una estructura relativamente homogénea, como lo refiere (Lugo *et al.*, 1992).

Esta percepción que se basa en análisis a escalas pequeñas, es decir de escaso detalle, queda claramente invalidada por los niveles de diversidad encontrados en los cuatro aspectos analizados en el presente estudio; la imagen de homogeneidad y la existencia de un alto porcentaje del territorio estatal declarado Área Natural Protegida (ANP) como reporta Prezas (2011) son conceptos que se contradicen.

De acuerdo con diversas observaciones de autores como Escalante *et al.* (2007), un ambiente poco diverso con condiciones climáticas relativamente homogéneas, no conduce a la existencia de dicha riqueza y biodiversidad. Según Burnett *et al.* (1998) y Nichols *et al.* (1998) "Los paisajes compuestos de condiciones abióticas espacialmente heterogéneas deberían proveer una gran diversidad de nichos potenciales para plantas y animales comparados con los paisajes homogéneos". Al mismo tiempo la relativa estabilidad climatológica, ofrece condiciones que permiten que dicha heterogeneidad espacial se manifieste, los mismos autores indican "... existe una asociación íntima entre diversidad biótica y abiótica, teniendo implicaciones significativas en las estrategias de conservación a largo plazo".

De acuerdo con el concepto de geodiversidad (Carcavilla *et al.*, 2008; Serrano y Ruiz, 2007), esta debe ser de gran utilidad para la identificación de ambientes o paisajes con una diversidad biológica propia, en otras palabras, teóricamente donde hay diversidad biológica debe haber diversidad de ambientes o paisajes, lo cual ha sido probado en algunas zonas de México (Priego *et al.*, 2003); Gámez *et al.* (2012).

La distribución de las alturas relativas de las formaciones de terreno conforman espacios con atributos relativamente homogéneos tal como se define el término en el trabajo de caracterización de la geodiversidad de la Península Ibérica (Benito-Calvo *et al.*, 2009) y en el caso de este trabajo se relacionan con la presencia de las selvas altas en los sitios de mayores variaciones en las alturas relativas y mayor heterogeneidad geomorfológica que se encuentra al suroeste del Estado, de manera semejante a lo reportado para bosques del noreste de Estados Unidos (Nichols *et al.*, 1998).

En los perfiles topográficos o toposecuencias (Figuras 5.2, 5.3 y 5.4), se aprecia que los sitios en los cuales hay una mayor cantidad de formaciones vegetales distintas y aquellos en los que predominan las formaciones que se consideran como más diversas coinciden con los sitios que presentan las geodiversidades más altas. Lo anterior confirma que la relación hallada por los autores mencionados es válida aún para paisajes de baja energía y con aparente escases de recursos hídricos superficiales.

La heterogeneidad espacial que se manifiesta en las variaciones en altura relativa, número de grupos de suelos y disponibilidad de agua superficial principalmente, son en este caso los elementos de la geodiversidad que mayormente contribuyen a la existencia de ambientes distintos y por tanto a colecciones de especies o formaciones vegetales diversas.

La relación manifiesta entre la geodiversidad y la biodiversidad como conceptos síntesis de la cantidad, variedad y calidad de atributos abióticos y bióticos respectivamente, muestra la influencia que tienen la una en la otra. La relación en este caso es básicamente unidireccional, por cuanto los tiempos de cambio para cada uno de los componentes de estos paisajes son diferentes.

Al poner en orden decreciente la velocidad a la cual cambia cada uno de los componentes estudiados, se pone de manifiesto la direccionalidad de los cambios y las relaciones; así, los cambios geológicos toman cientos de millones de años, los geomorfométricos toman desde unos millones hasta cientos de miles, los hidrológicos y edafológicos unos pocos miles y los biológicos unos cuantos cientos de años.

Lo anterior implica que es la cobertura biológica del espacio la que se ve más fuertemente afectada por los otros componentes, y que la misma escasamente puede afectar a los otros conforme nos alejamos en la escala temporal. Así pues las interacciones más fuertes serán las que se den entre los aspectos biológicos con los edafológicos e hidrológicos, siendo muy escaso su efecto sobre los componentes geológicos y geomorfométricos.

Estas relaciones son de suma importancia para el manejo del territorio en vista de la capacidad que se tiene como especie para modificar estos componentes del paisaje, la ocupación de los valles con actividades agrícolas, el reencauzamiento de ríos, la contaminación de los suelos y la deforestación, son actividades que si bien son imprescindibles para mantener a la población, modifican fuertemente las tres capas más dinámicas de las cinco estudiadas.

Además de ello en los últimos 100 años se ha desarrollado la capacidad para modificar sensiblemente a escala regional los aspectos geomorfométricos del territorio, creando grandes represas y gigantescos canales que son equivalentes a estructuras que de manera natural tomarían cientos de miles de años en formarse; eso está cambiando la faz del planeta y su dinámica, con consecuencias que hoy no se tiene el conocimiento necesario para prever con certeza.

En general se pueden agrupar algunas de las actividades del hombre en dos categorías opuestas y complementarias, el aprovechamiento del territorio con actividades extractivas y de producción con los cambios que implican al territorio y sus atributos, y las actividades de conservación de dicho territorio.

Prezas (2011) reporta un número elevado de ANP para Quintana Roo, las cuales suponen la existencia de una riqueza biológica congruente no solo con el número de ANP, sino con la extensión misma de ellas. Al sobreponer los límites de las ANP existentes en el Estado (Figura 4.9), podemos ver que efectivamente para la mayor parte de ellas la elección de sitios con altas biodiversidades ha coincidido con sitios en los cuales la Geodiversidad es igualmente alta.

Cabe mencionar que algunas de las ANP que se muestran en este trabajo fueron decretadas por los atributos de las porciones marinas que involucran; este trabajo no se desarrolló para abarcar estos espacios subacuáticos pero permite dejar planteadas interrogantes sobre el comportamiento de la geodiversidad en puntos de cambio tan drástico como el que plantea la entrada a medios subacuáticos en la medición de la geodiversidad.

De la misma manera, los resultados obtenidos permiten asegurar que información de mayor detalle, podría contribuir de manera importante para explicar la distribución espacial de la diversidad biológica; para identificación de áreas de alta riqueza de especies; para diseño de áreas protegidas en zonas de difícil acceso; para la definición de estrategias de conservación; (Parks y Mulligan, 2010; Priego *et al.*, 2003); y para identificación de servicios ambientales o ecosistémicos (Gray, 2011).

Con estos resultados queda de manifiesto que la geodiversidad propicia la diversidad de ambientes; sin embargo, en la medida que se conozcan los detalles del relieve a escalas grandes se comprenderá mejor la gran diversidad de ambientes en el karst de Quintana Roo. Ello hace necesaria la realización de estudios de mayor detalle que permitan el reconocimiento, la identificación y registro de la geodiversidad que se traduce en heterogeneidad ambiental y en diversidad de especies.

4.9 Reflexiones finales del capítulo V.

Los resultados obtenidos demuestran que la metodología empleada no solo es adecuada para la medición de la geodiversidad en ambientes de baja energía como la Península de Yucatán, sino que permite compensar al menos en parte la carencia de información y la incertidumbre asociada con información a escalas medias y pequeñas.

Para la zona de estudio se demuestra la relación unidireccional entre los componentes geológicos y de relieve con la biodiversidad y la interacción bidireccional de la biodiversidad con los componentes hidrológico y edafológico.

En Quintana Roo existen diferencias altimétricas que han permitido el desarrollo de una geodiversidad y biodiversidad características. En este artículo se utilizó como medida de geodiversidad el conteo de objetos diferentes es decir la riqueza de tipos geológicos, de tipos de suelos, unidades altimétricas e hidrología como la definen Gray (2008b) y Kozłowski (2004).

Este trabajo es el primero para el Estado de Quintana Roo en el que se reportan los pisos altitudinales regionales para fundamentar que la aparente homogeneidad del relieve no es tal y que en esas grandes planicies kársticas existe una amplia diversidad de ambientes producto de la heterogeneidad morfométrica y estructural del terreno.

Se pudieron identificar cuatro pisos altitudinales regionales, estos pisos altitudinales combinados con siete formaciones geológicas, seis subtipos climáticos y 12 grupos de suelos dan como resultado seis tipos de selvas más nueve cubiertas vegetales así como coberturas agrícolas.

El Estado de Quintana Roo no es homogéneo presenta zonas de muy alta a muy baja geodiversidad en espacios bien definidos y cuyos atributos contribuyentes principales están igualmente bien definidos.

Se identificaron tres grandes áreas: una zona al oeste del Estado con valores de geodiversidad de media a muy alta, una zona intermedia en la parte central en donde los valores de geodiversidad van de media a muy baja y una tercera zona, en la parte de menor altura y hacia la zona costera del Estado en donde la geodiversidad tiene valores nuevamente de media a muy alta.

Las Áreas Naturales Protegidas se encuentran en las áreas con mayor geodiversidad y biodiversidad en el Estado.

La Geodiversidad está íntimamente relacionada con la biodiversidad a través de la relación sinérgica de los componentes de la primera.

4.10 Referencias del capítulo V

- Aguilar, Y., Mendoza, M., Frausto, O., Bollo, M., Bautista, F. 2010. Spatial distribution of karstic depressions in tropical karst plains. Presentado en la Reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana, Geos, México, pp. 115–116.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135, 308–321.
- Bautista, F., Estrada, H., Jiménez, J., González, J. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. *Terra Latinoamericana* 22, 243–254.
- Bautista, F., Palacio, G., 2005. Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. : Universidad Autónoma de Campeche : Universidad Autónoma de Yucatán : Instituto Nacional de Ecología], Campeche, Camp; ; Mérida, Yuc; ; México.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar-Briones, E., Torres-Talamante, O. 2007. Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología mexicana* 14, 32–35.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Magri, O., Meza, P. 2009. Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1433–1445.
- Burnett, M.R., August, P.V., Brown, J.H., Jr, Killingbeck, K.T. 1998. The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity I. A Patch-Scale Perspective. *Conservation Biology* 12, 363–370.
- Cantú, C., Wright, R., Scott, J., Strand, E. 2004. Assessment of current and proposed nature reserves of Mexico based on their capacity to protect geophysical features and biodiversity. *Biological Conservation* 115, 411–417.
- Carcavilla, L., Durán, J.J., López-Martínez, J. 2008. Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico. *Geo-Temas* 10, 1299–1303.
- Chen, C., Yue, T. 2010. A method of DEM construction and related error analysis. *Computers & Geosciences* 36, 717–725.
- Coke, J. 2004. Geography of caves in Quintana Roo. *Association for Mexican Cave Studies Activities Newsletter* 27, 93–97.
- CONAFOR. 2009. Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009 (Reporte técnico). Comisión Nacional Forestal, México.
- CONABIO. 1995. Atlas de Reservas de la Biosfera y otras áreas naturales protegidas. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP, México.
- Cotler A. 2003. El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta ecológica* 33–42.
- De Pedraza, G.J. 1996. Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones. Rueda, España.
- Escalante, T., Cordero, V.S., Morrone, J.J., Linaje, M. 2007a. Areas de endemismo de mamíferos terrestres de Mexico: un caso de estudio usando modelos de nicho ecológico, analisis de Parsimonio de endemismos y ajustes de goloboff. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América* 32, 151–159.
- Escalante, T., Szumik, C., Morrone, J.J. 2007b. Áreas de endemismos de los mamíferos de México: Reanálisis y comparación con estudios previos. *Darwiniana* 45, 41–43.
- Frausto, O., Ihl, T. 2008. Capítulo 2. Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. In: *Estudio Geohidrológico Del Norte de Quintana Roo*, México. pp. 41–54.
- Frausto, O., Ihl, T. 2010. Vulnerabilidad a La Inundación En Las Formas Exocársticas Del Noreste De La Península De Yucatan. Presentado en el VI Seminario Latino-Americano de Geografía Física II Seminario Ibero-Americano de Geografía Física, Universidade de Coimbra, p. 16.
- Frausto, O., Ihl, T., Giese, S., Cervantes, A., Gutiérrez, M. 2010. Vulnerabilidad a la inundación en las formas exocarsticas del noreste de la Península de Yucatan. VI Seminario Latino-

- Americano de Geografía Física II Seminário Ibero-Americano de Geografía Física
Universidad de Coimbra. Portugal.
- Frausto, O., Ihl, T., López, J.R., Goldacker, S., Chale, G., Giese, S., Wurl, J., Careaga, P., Bacab, R. 2006. Áreas susceptibles de riesgo en localidades de pobreza extrema en el sur de Yucatán. *Teoría y Praxis* 87–103.
- Gámez, N., Escalante, T., Rodríguez, G., Linaje, M., Morrone, J.J. 2012. Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mastofauna. *Revista mexicana de biodiversidad* 83, 258–272.
- García, G., Padilla, J., Salazar, E. 2000. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico del estado de Quintana Roo. In: Vester, F.M.H. (Ed.), *Influencias de Huracanes En El Paisaje de Yucatán Consideraciones Para El Diseño de Corredores Biológicos Y Su Monitoreo*. Reporte de trabajo, CICY, UQROO, UNAM, ECOSUR, pp. 32–53.
- Goldacker, S., Frausto, O. 2005. Identification of areas at risk of flooding in the south de Yucatan peninsula, Mexico. Presented at the *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*, UACH, México, pp. 483–496.
- Gray, M. 2008a. Geodiversity: developing the paradigm. *Proceedings of the Geologists' Association* 119, 287–298.
- Gray, M. 2008b. Geoheritage 1. Geodiversity: a new paradigm for valuing and conserving geoheritage. *Geoscience Canada* 35.
- Gray, M. 2011. Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation* 38, 271–274.
- Gutierrez, C., Ortíz, J., Flores, J., Zamora, P., Domínguez, M., Villegas, P. 2011. Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia de Nohalal- Sudzal Chico, Tekax, Yucatán, México. *Floresta Veracruzana* 13, 7–14.
- Héraud-Piña, M. 1996. *Le Karst du Yucatan: Pays des Mayas*. Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux.
- Lugo, J., Aceves, J.F., Espinoza, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Instituto de Geografía* 10, 143–150.
- Ibáñez, J., García, A. 2002. Diversidad: biodiversidad edáfica y geodiversidad. *Edafología* 9, 329–385.
- Ibarra, G., Villaseñor, J.L., Duran, R. 1996. Riqueza de especies y endemismo del componente arbóreo de la Península de Yucatán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 57, 49–77.
- Ihl, T., Frausto, O., Rojas, J., Giese, S., Goldacker, S., Bautista, F., Bocco, G. 2007. Identification of geodisasters in the state of Yucatán, Mexico. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen* 246, 299–311.
- INEGI. 2000. *Cartas Geológicas 1:250000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2008a. *Carta de Climas para la República Mexicana, 1:1000000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2008b. *Cartas Edafológicas serie II, 1:250000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2005. *Cartas Topográficas, 1:50000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2009. *Cartas De Uso del Suelo y Vegetación serie IV, 1:250000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- Jačková, K., Romportl, D. 2008. The relationship between geodiversity and habitat richness in Šumava national park and Křivoklátsko Pla (Czech Republic): a quantitative analysis approach. *Journal of Landscape Ecology* 1, 23–38.
- Jenks, G. 1977. *Optimal data classification for choropleth maps*. University of Kansas Dept of Geography.
- Kozłowski, S. 2004. Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. *Przegląd Geologiczny* Vol. 52, 833–83.
- Lugo, J. 1990. El relieve de la República Mexicana. *Instituto de Geología* 9, 82–111.
- Lugo, J., Aceves, J., Espinasa, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*. UNAM 101, 143–150.

- Nichols, W.F., Killingbeck, K.T., August, P.V. 1998. The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity II. A Landscape Perspective. *Conservation Biology* 12, 371–379.
- Ochoa, M., Flores, O. 2006. Áreas de Diversidad y Endemismo de la Herpetofauna Mexicana. UNAM., México.
- Ordóñez-Crespo, I., García-Rodríguez, M. 2010. Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *M+ A. Revista Electrónica de Medioambiente* 15–35.
- Orians, G.H., Dirzo, R., Cushman, J.H., Medina, E., Wright, S.J. 1995. Tropical forest biodiversity and ecosystem functioning. In: Watson, R.T., Heywood, V.H. (Eds.), *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge University Press, pp. 339–345.
- Ortiz, M. 1988. Perfiles geomorfológicos complejos. Serie Varia, IG-UNAM, México.
- Palacio, G., Noriega, R., Zamora, P. 2012. Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como “bajos inundables”. El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 0.
- Parks, K.E., Mulligan, M. 2010. On the relationship between a resource based measure of geodiversity and broad scale biodiversity patterns. *Biodiversity and Conservation* 19, 2751–2766.
- Pike, R.J. 2000. Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24, 1–20.
- Prezas, B. 2011. Áreas naturales protegidas en Quintana Roo. In: *Riqueza Biológica de Quintana Roo: Un Análisis Para Su Conservación*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) ; Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) ; Gobierno del Estado de Quintana Roo ; Programa de Pequeñas Donaciones-México, México, D.F. : San Cristóbal de Las Casas, Chiapas : Chetumal : Mérida, Yucatán, México, pp. 300–309.
- Priego, Á., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes, 1st Ed, Planeación Territorial. SEMARNAT/INE/CIGA-UNAM, México, D.F.
- Priego, Á., Moreno, P., Palacio, J.L., López, J., Geissert, D. 2003. Relación entre la heterogeneidad del paisaje y la riqueza de especies de flora en cuencas costeras del estado de Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*.
- QRSS. 2013. Quintana Roo Speleological Survey [WWW Documento]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrssesp.htm> (acceso 11.20.13).
- Serrano, E., Ruiz, P. 2007. Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial: el caso de Tiermes Caracena (Soria). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 79–98.
- Takagi, M., Shibasaki, R. 1996. An interpolation method for continental DEM generation using small scale contour maps. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 31, 847–852.
- UQRoo. 2004. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo - SEMARNAT - SEDUMA, México.
- Xavier-da-Silva, J., de Carvalho-Filho, L.M. 2004. Geodiversity: Some simple geoprocessing indicators to support environmental biodiversity studies. *Directions Magazine* 1–4.
- Yue, T.-X., Du, Z.-P., Song, D.-J., Gong, Y. 2007. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology* 91, 161–172.
- Zwoliński, Z. 2010. The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. *Landform Analysis* 11, 77–85.
- Zwoliński, Z., Stachowiak, J. 2012. Geodiversity map of the Tatra National Park for geotourism. *Quaestiones Geographicae* 31, 99–107.

CAPÍTULO V. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y DESARROLLO DE SUELOS EN ZONAS DE KARST TROPICAL.

Resumen

Los ambientes geomorfoedafológicos están formados por características biofísicas originadas y controladas por un estilo de geodinámica interna, externa o ambas, dependiendo del proceso que domine pueden ser de seis tipos: estructural, deposicional, erosional, disolucional, residual o mixto. Conocer los componentes y dinámica de cada uno de ellos son condiciones importantes para conocer el ambiente y formación de los suelos. El objetivo de este apartado es caracterizar y elaborar el mapa de ambientes geomorfoedafológicos para Quintana Roo a escala de resolución 1:50000 que reflejen una visión sinóptica de la geomorfología, las condiciones ambientales y el suelo asociado en cada uno de ellos. Para su caracterización y definición se elaboró una síntesis de la geomorfología, las condiciones ambientales como el clima y la vegetación y los tipos de suelos asociados a cada uno de ellos, a través de análisis estadísticos de agrupamiento, componentes principales y de clasificación procesados a través de un SIG. La asignación de suelos a los polígonos resultantes de los análisis geomorfométrico, de clima y vegetación siguiendo esta metodología resultó por encima del 80% de certidumbre. De las once variables estudiadas, la disección vertical, la karsticidad, la densidad de fallas y el régimen de inundación son las que explican el 51% de la variabilidad de la distribución de suelos en Quintana Roo. En función de la geomorfología, climas, vegetación y suelos se definieron siete ambientes geomorfoedafológicos para Quintana Roo: Litoral, Palustre, Pseudopalustre, Tectokárstico, Kárstico, Kárstico de yeso y Mixto, con once subtipos. Los ambientes geomorfoedafológicos kársticos y tectokársticos son los que ocupan la mayor superficie. Las características geomorfológicas, edafológicas y ambientales muestran que el Estado es heterogéneo y presenta una gran diversidad de ambientes, el mapa de ambientes geomorfoedafológicos resultado de esta investigación es un insumo muy importante para la planeación y definición de estrategias de uso y manejo del suelo en el Estado en función de la vocación específica de cada ambiente.

5.1 Introducción

El ambiente es un complejo de factores externos que actúan sobre un sistema, los cuales determinan su curso y su forma de existencia (Bertalanffy, 1976), está formado por un conjunto de características físicas, químicas y bióticas predominantes en un área de la superficie terrestre, donde prevalecen rasgos dominantes debido a la acción de procesos endógenos y exógenos (IDEAM, 2011).

El Ambiente Geomorfoedafológico (AGE) es un amplio tipo de medio biofísico originado y controlado por un estilo de geodinámica interna y/o externa (Zinck, 2012), su caracterización presenta una visión global y al mismo tiempo los diferentes aspectos que lo componen, estos aspectos ayudan a entender y explicar los procesos pedogenéticos que tienen lugar en él, ello permite un mejor entendimiento del recurso y constituye un primer acercamiento para evaluar su potencial y limitaciones de uso (Bocco *et al.*, 2009b) ya sea

entendiéndolos como una cobertura continua o bien organizada en paisajes edáficos asociados a la estructura del relieve local y regional (Bautista *et al.*, 2007a).

Para estudiar los diversos ambientes se requiere establecer una taxonomía jerárquica de las geoformas que sirvan de marco de referencia para poder explicar su formación y definir sus límites. Sin embargo, aún no se dispone de un sistema taxonómico estructurado para la clasificación de las geoformas, se han desarrollado varios intentos con diversos criterios para su clasificación (Mendoza y Bocco, 1998; Bautista *et al.*, 2005a), entre ellos se encuentra el enfoque fisiográfico utilizado por el INEGI, el cual tiene como base la geología y la topografía.

El enfoque fisiográfico divide el territorio nacional en provincias, subprovincias, discontinuidades fisiográficas y sistema de topoformas. Los ambientes (llamados subprovincias) son regiones cuyas topoformas son las típicas de la provincia, pero su frecuencia, magnitud y variación morfológica son apreciablemente diferentes, o bien, están asociadas con otras que no aparecen en forma importante en el resto de la provincia. En el estado de Quintana Roo de acuerdo a este enfoque se presentan tres ambientes Carso Yucateco, Carso y Lomeríos de Campeche y Costa Baja de Quintana Roo (INEGI, 2000b).

Este enfoque carece de una jerarquización taxonómica y de un criterio rector para cada nivel propuesto, lo cual dificulta su replicabilidad y no incluye categorías transicionales (Bocco *et al.*, 2009b), además, no permiten tener una visión integrada de todos los factores que forman los ambientes (relieve, roca, clima, vegetación, suelos, etc.) y menos aún, sus interacciones, las cuales dan origen a uno u otro tipo de suelos (Ortiz, 2010).

El enfoque geomorfoedafológico es un sistema de clasificación jerárquico que se basa en un sistema taxonómico de seis niveles con los cuales define con precisión las unidades del relieve, las cuales son: orden (geoestructuras), suborden (ambientes morfogenéticos), grupo (paisaje geomorfológico), subgrupo (relieve/modelado), familia (litología/facies) y subfamilia (forma del terreno) (Zinck, 2012).

Al marco de esta estructura taxonómica ordenada los Ambientes morfogenéticos pueden ser de seis tipos:

- Estructural: controlado por la geodinámica interna a través de la tectónica
- Depositional: controlado por la deposición de materiales detríticos, solubles y/o biogénicos transportados por agua, viento, gravedad, etc.
- Erosional: controlado por procesos de disección y remoción de materiales transportados
- Disolucional: controlado por procesos de disolución de rocas generando erosión química
- Residual: caracterizado por rasgos del relieve relictuales;
- Mixto: combinación de dos o más de los anteriores

La caracterización y definición de los ambientes con este enfoque proporciona una síntesis de las estructuras geomorfológicas influenciada por condiciones ambientales (clima y vegetación) y los tipos de suelo asociado a cada uno de ellos (Cotler, 2003).

Un mapa de ambientes geomorfoedafológicos permite tener una primera aproximación para la definición de estrategias de uso y prácticas de manejo de suelos. Es un insumo importante para la elaboración de proyectos de planeación como son los ordenamientos a nivel regional o Estatal, en la planeación y manejo de desarrollos turísticos, en los procesos de urbanización, en los suministros de agua, en la conservación y protección de recursos y en la elaboración de mapas de riesgos (vulnerabilidad y amenazas) de las poblaciones (Bocco *et al.*, 2009; Cotler, 2003; Zinck, 2012). En resumen, es un insumo básico que proporciona información sobre la vocación específica de cada región para la toma de decisiones (Pereira y Fragosó, 2002).

El objetivo de este apartado es elaborar el mapa de ambientes para Quintana Roo con una escala de resolución a 1:50000, con un enfoque geomorfoedafológico que refleje una visión sinóptica de la geomorfología, las condiciones ambientales y el suelo asociado.

5.2 Metodología

La definición de los ambientes presentes en Quintana Roo contempló tres etapas:

La primera etapa consistió en los análisis geomorfométrico y espacial de las formas negativas del terreno para la definición de geoformas y la distribución de las depresiones kársticas en el Estado (Capítulo III).

Para definir las formas del relieve se utilizó la metodología de Priego *et al.* (2010) de la Disección Vertical (DV) la cuál representa la amplitud del relieve (altura relativa) por unidad de área y se expresa en m/km^2 . La DV se obtuvo a partir de la información de altimetría y la pendiente (INEGI, 2005) a escala 1:50000 y se calculó la diferencia de alturas por unidad de área en formato raster con una resolución 1:15000. A partir del coeficiente de disección vertical se identifican las diversas geoformas de acuerdo a la escala, la cual contiene 13 categorías que van de planicies subhorizontales hasta montañas fuertemente diseccionadas. Para Quintana Roo se identificaron 11 categorías.

La segunda etapa contempló la elaboración del modelo espacial de la distribución de suelos en las geoformas, para ello se elaboró una matriz de datos en el SIG a partir de la información generada en la primera etapa, a ella se incorporó la información de clima de INEGI (2008a) escala 1:1000000 y vegetación reportadas para el Estado por INEGI (2009) y CONAFOR- SEMARNAT (2011) a escala 1:250000. La base de datos de suelos se obtuvo de cuatro fuentes: Cartas edafológicas serie II escala 1:250000 del INEGI (2008) en dónde aparecen los sitios de muestreo y los datos de los análisis físico-químicos realizados. Proyectos elaborados por la Universidad de Quintana Roo (UQRoo, 2004a, 2004b; Vázquez *et al.* 2011; Pereira *et al.*, 2013). Levantamiento de suelos en la Zona cañera de Quintana

Roo elaborado por la INIFAP y estudios realizados por el Centro de Investigación en Geografía Ambiental (CIGA) de la UNAM (Bautista *et al.*, 2011).

La base de datos de suelos fue georreferenciada, actualizada al sistema de clasificación de suelos WRB 2007(IUSS, 2007) e incorporada al SIG.

Para el Estado se utilizaron 412 puntos de muestreo en campo, con base en sus propiedades físicas y químicas se identificaron y/o actualizaron de acuerdo al sistema WRB 2007 dando como resultado la presencia de 14 grupos principales de suelos (GSP) en Quintana Roo (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Suelos identificados en Quintana Roo

Fuente	No. de puntos	Grupos de suelos identificados
INEGI	91	Arenosoles, Cambisoles, Phaeozems, Histosoles, Leptosoles, Luvisoles, Nitisoles, Regosoles, Solonchaks, Vertisoles, Gleysoles, Fluvisoles
CIGA- UNAM	79	Arenosoles, Cambisoles, Gleysoles, Leptosoles, Kastañozems, Phaeozems, Luvisoles, Nitisoles, Solonchaks, Vertisoles
INIFAP	57	Gleysoles, Leptosoles, Luvisoles, Phaeozems, Vertisoles
UQRoo	185	Arenosoles, Gleysoles, Leptosoles, Phaeozems, Solonchaks, Cambisoles, Luvisoles, Regosoles, Nitisoles, Vertisoles

A partir del análisis geomorfométrico a escala 1:50000, se incorporaron los datos de clima, vegetación y suelos identificados, con ellos se construyó la matriz de datos en el SIG con las variables y dominios que aparecen en el Cuadro 5.2, dando como resultado la presencia de 16456 polígonos.

Cuadro 5.2. Variables y sus dominios identificados en la base de datos del análisis geomorfométrico de Quintana Roo.

Dissección vertical (DV)		Edad de rocas	Forma kárstica y tipos de inundación		Clima	Vegetación	Suelos (WRB)
Planicie subhorizontal		Holoceno-Pleistoceno o.	Dolina	Permanente	Aw ₀	Agricultura de riego Agricultura de temporal	Gleysoles
Planicie ondulada	ligeramente diseccionada			Temporal	Aw ₀ (x')		Leptosoles
	medianamente diseccionada			Extraord.	Aw ₁		Luvisoles
	fuertemente diseccionada	Úvala	Aw ₁ (x')	Phaeozems			
Planicie acolinada	ligeramente diseccionada	Eoceno	Polje	Permanente	Aw ₂ (x')	Manglar Palmar Pastizal cultivado Popal Sabana Selva alta subperennifolia	Vertisoles
	medianamente diseccionada			Temporal			Arenosoles
	fuertemente diseccionada			Extraord.			Regosoles
Lomerío	ligeramente diseccionada	Cretácico	Polje	Permanente		Selva baja subperennifolia Selva baja subcaducifolia Selva baja espinosa subcaducifolia	Histosoles
	medianamente diseccionada			Temporal			Cambisoles
	fuertemente diseccionada			Extraord.			Nitisoles
Montaña	ligeramente diseccionada	Densidad kárstica				Selva mediana subcaducifolia Selva mediana subperennifolia Tular	Solonchaks
		Densidad de fallas					Kastañozems
							Fluvisoles
							Calcisoles

Cada uno de los polígonos generados fueron calificados y clasificados en función de la igualdad del territorio para definir las condiciones diferentes que hay en el Estado utilizando un análisis de agrupamiento (AAG) usando el coeficiente Gamma de Goodman-Kruskal, este estimador se conoce como estimador de máxima similitud para el manejo de grandes volúmenes de datos jerárquicos con coincidencias en orden y valor (Nelson, 1986) cuya ecuación es:

$$D = 1 - \left(\frac{N_s - N_d}{N_s + N_d} \right)$$

Donde:

- D = distancia o semejanza entre los pares de objetos,
- N_s = es el número de objetos coincidentes en atributos y secuencia, y
- N_d = es el número de objetos distintos en atributos y secuencia

Este análisis fue validado por tres pruebas para verificar que el resultado del agrupamiento fuera el de mayor probabilidad:

- a) Una prueba de Pseudo F, la cual proporciona en el dendrograma un valor de probabilidad para el nodo formado respecto a la probabilidad de todos los nodos que

forman el grupo, aparece frecuentemente como la distribución nula en el análisis de varianza cuya ecuación es:

$$F = \left(\frac{U_1/d_1}{U_2/d_2} \right)$$

Donde:

U_1 y U_2 siguen una distribución chi-cuadrado con d_1 y d_2 grados de libertad y U_1 y U_2 son estadísticamente independientes.

b) Prueba de Pseudo T, la cual consiste en la comparación de las distancias medias y varianzas intra e intergrupales, representa la dispersión de los nodos o densidad del dendrograma. La ecuaciones usada es:

$$t = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{s_{\overline{X_1} - \overline{X_2}}}$$

Donde:

$\overline{X_1}$ y $\overline{X_2}$ = distancias medias intra e intergrupales

$s_{\overline{X_1} - \overline{X_2}}$ = diferencia de la varianza respecto a los tamaños de los grupos

c) Consistencia o distorsión de Dunn para la validez del agrupamiento (Halkidi *et al.*, 2002; Havens *et al.*, 2008; Omran *et al.*, 2007), la ecuación usada es:

$$D = \frac{d_{min}}{d_{max}}$$

Donde:

d_{min} = distancia mínima intergrupala

d_{max} = distancia máxima intragrupal

A cada una de las diferentes agrupaciones obtenidas se le asignó el dato del grupo de suelo registrado en algún punto del interior de uno de los polígonos perteneciente al mismo grupo y de este modo construir el modelo de distribución espacial de suelos (MacMillan, 2004).

Las clases resultantes se verificaron mediante dos tipos de análisis estadístico, de componentes principales (ACP) y clasificación (AC). El ACP se usó para definir las fuentes de la variabilidad del conjunto de datos y ordenarlas por importancia (Jongman *et al.*, 1995).

El modelo de ordenación de las variables obtenido del ACP se sometió a un AC en el programa WEKA para estimar la incertidumbre de la clasificación (Morate, 2008), en él se hicieron cuatro ejercicios de clasificación usando tres algoritmos:

- Clasificación por tablas de decisión con parámetros de búsqueda simple y por búsqueda exhaustiva (Kohavi, 1995; Mukerjee, 2012),
- Clasificación por construcción de excepciones a la regla inicial (RIDOR.-Ripple-Down-Rules) (Gaines y Compton, 1995) y
- Clasificación por reglas de partición (Frank y Witten, 1998).

En la tercera etapa se elaboró el modelo espacial de ambientes geomorfoedafológicos y se estableció su patrón de distribución definiendo las relaciones entre sus componentes, para ello, con el modelo espacial obtenido se agruparon aquellos polígonos que tuvieran las mismas características para definir los diversos ambientes representativos (estructural, deposicional, erosional, disolucional, residual o mixto).

En cada uno de los ambientes resultantes se verificaron sus componentes y la relación entre ellos. A partir de las geoformas presentes en un ambiente (planicies, lomeríos montaña, etc.) se identificó qué suelos se encontraban y se verificó la congruencia entre las estructuras y los grupos de suelo presentes. A estas dos características se sumó la relación con la vegetación desarrollada en ellos (selva mediana, tular, manglar, etc.) y finalmente el régimen de humedad a partir de la información del clima dominante para dicho espacio (w_0 , w_1 , w_2) de tal manera que las relaciones Ambiente-geomorfología-suelos-vegetación-clima fueran congruentes con la realidad, esto se contrastó con la información obtenida en campo en los diferentes sitios donde se colectaron muestras y datos y con ello se elaboró el mapa de ambientes geomorfoedafológicos de Quintana Roo.

5.3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los análisis aplicados para elaborar el modelo espacial de la distribución de los ambientes geomorfoedafológicos. En la primera parte se describen los resultados del análisis espacial de suelos y en la segunda parte se presentan la caracterización y definición de los diversos ambientes geomorfoedafológicos presentes en Quintana Roo

5.3.1 Modelo espacial de suelos

El primer análisis realizado fue un análisis de agrupamiento (AAG), en una primera clasificación se obtuvo la presencia de 869 grupos de unidades ambientales idénticas por sus atributos, disminuyendo el valor de certidumbre en la clasificación del AAG en función de las semejanzas entre los diferentes grupos de polígonos con atributos idénticos, eso permitió reducir la clasificación a solo 188 grupos o condiciones ambientales diferentes (Figura 5.1), este agrupamiento fue validado por tres pruebas Pseudo F, Pseudo T y Distorsión de Dunn. (Figura 5.2).

Al incorporar la información edafológica con la finalidad de poder predecir cuáles tipos de suelos son probables de encontrar en cada uno de los polígonos, de acuerdo a las características que definen a cada uno de ellos. El análisis mostró que 123 grupos contaban con al menos un grupo de suelo y hasta cinco como máximo, se usaron los tres más frecuentes para la elaboración del mapa.

Solo 65 de los grupos obtenidos del AAG no tuvieron ninguna asignación de suelos, estos grupos están constituidos por 103 polígonos (de 16456 totales) que representan el 0.6% del total y ocupan el 0.2% de la superficie del Estado.

El análisis de componentes principales permitió definir las fuentes de la variabilidad del conjunto de datos y ordenarlas por importancia, de este modo se pudieron definir las variables que tienen mayor peso en la asignación en función del conjunto de semejanzas de las clases formadas (Cuadro 5.3).

La prueba de Chi-cuadrada dio valores de cero, lo cual indica que los valores propios de las variables no son iguales ni independientes, demostrando así la relación que existe entre los factores formadores de suelos que se consideraron en el análisis y por lo tanto validando la aplicación del mismo.

El ACP mostró que son siete variables las que están influyendo en mayor medida en la distribución de suelos como puede verse en la Figura 5.3 en donde el punto de inflexión (codo) indica el cambio de la pendiente.

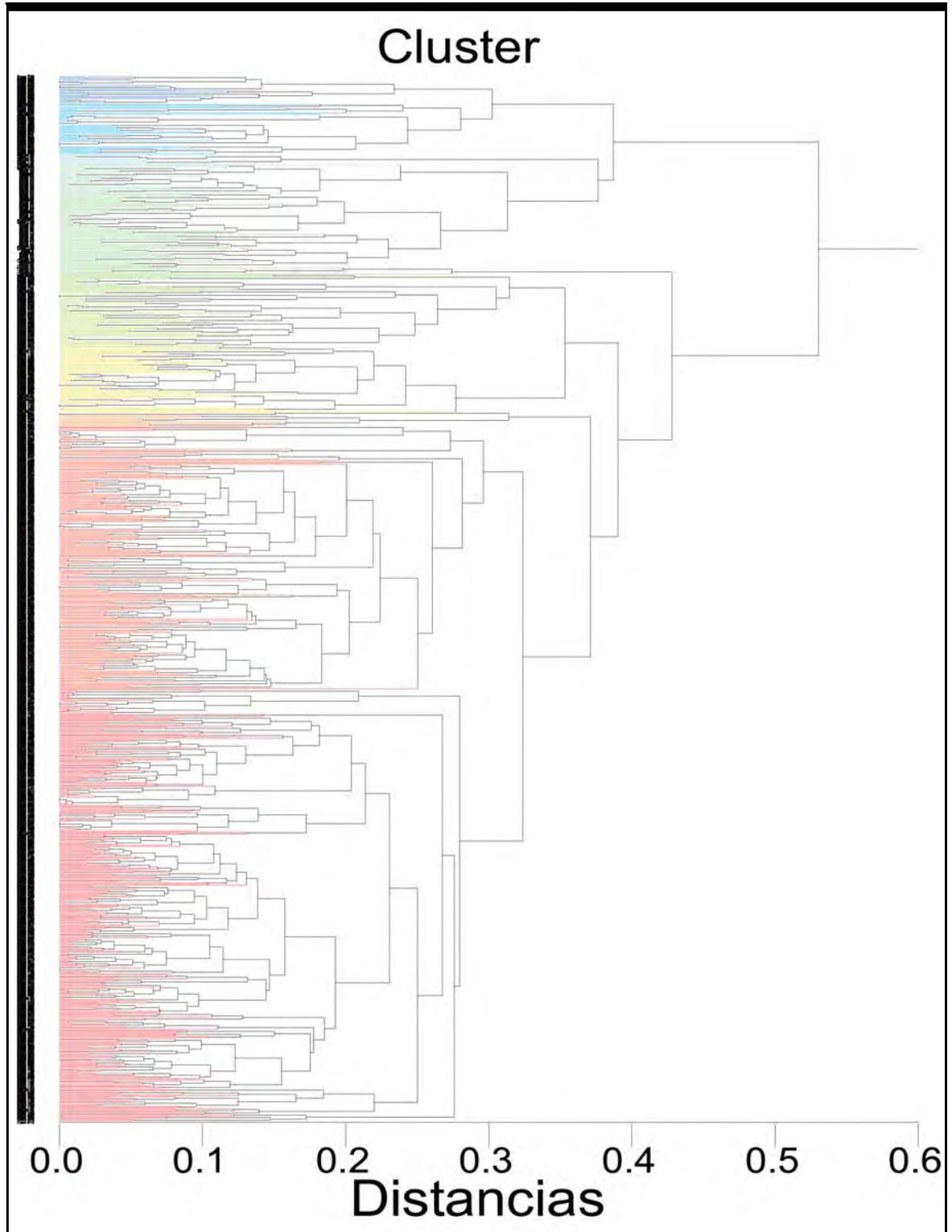


Figura 5.1. Dendrograma que muestra el patrón de agrupamiento de los polígonos en función de sus atributos.

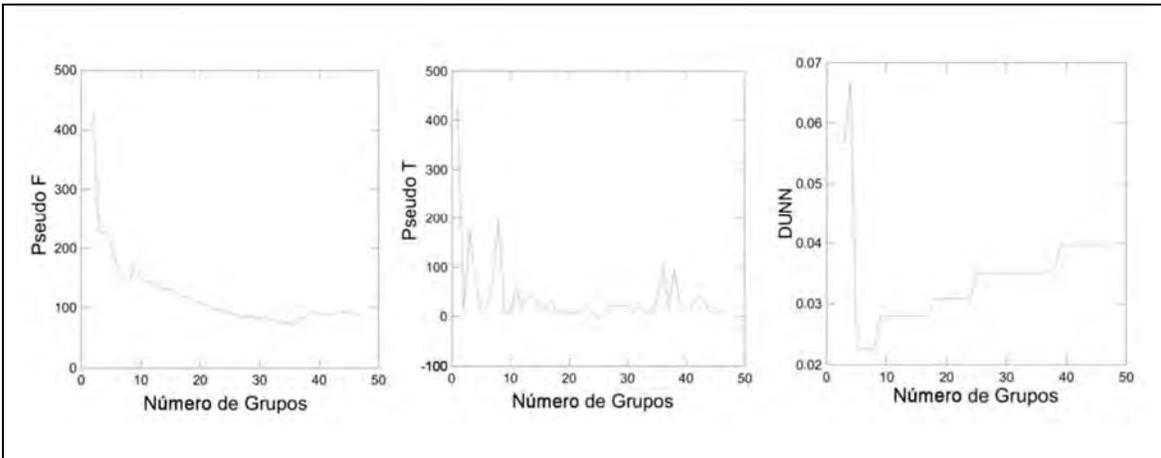


Figura 5.2. Pruebas de validación Pseudo F, Pseudo T y de Distorsión de Dunn del análisis de agrupamiento

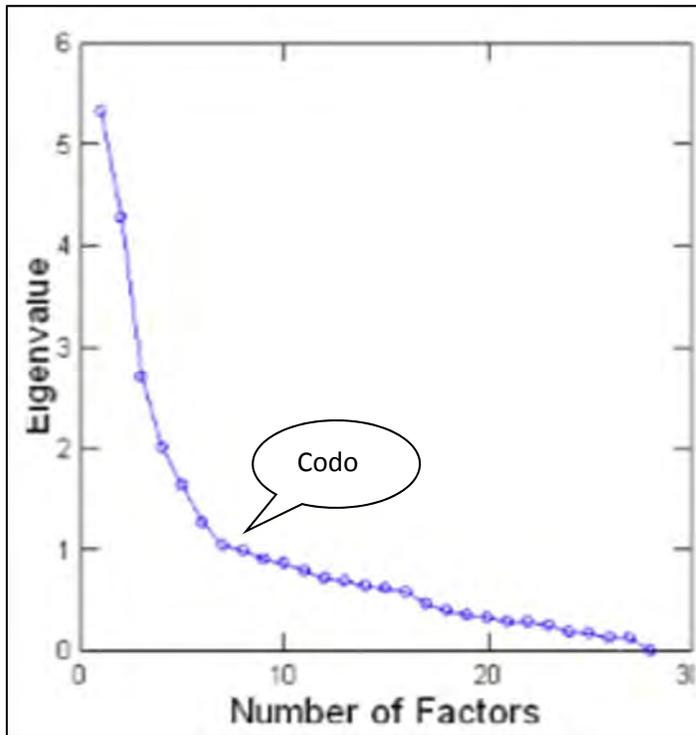


Figura 5.3. Grafica que muestra el peso relativo de las variables en la matriz de varianza del ACP.

Considerando el valor de las varianzas y su contribución, el análisis indica que la disección vertical y las formas kársticas obtuvieron los valores más altos y explican el 19% de la variación observada en la distribución geográfica de suelos (Cuadro 5.3), seguida por las densidades de karst, de fallas y la presencia de inundaciones ya sean temporales o extraordinarias. Estas cuatro variables explican el 51% de la variación.

El siguiente componente corresponde a un factor ambiental que tiene que ver con la distribución de temperatura y precipitación en el Estado, es decir el clima seguido por la presencia de cuerpos de agua temporales o permanentes para finalmente tener a la geología como el séptimo componente que explican en conjunto el 65% de la variabilidad de la distribución de suelos (Cuadro 5.3).

Cuadro 5.3. Resultados del análisis de componentes principales

No.	Componente	Valor del vector propio	Porcentaje de la varianza total	Porcentaje acumulado de la varianza
1	Disección vertical y forma Kárstica	5.32	19.0%	19%
2	Densidad kárstica	4.27	15.3%	34%
3	Densidad de fallas	2.70	9.6%	44%
4	Inundación	2.00	7.2%	51%
5	Clima	1.63	5.8%	57%
6	Cuerpos de agua	1.26	4.5%	61%
7	Edad de rocas	1.04	3.7%	65%

Los resultados obtenidos de los ejercicios del análisis de clasificación aparecen en el Cuadro 5.4, en él se observa que el porcentaje de polígonos correctamente clasificados está por arriba del 83% lo cual indica que la asignación de suelos realizada es acertada.

La diferencia entre los tres algoritmos en términos de porcentaje de incertidumbre (incorrectamente clasificados) es muy pequeña (solo 2.43 %); sin embargo al analizar las matrices de confusión respectivas, es posible ver que el algoritmo que resuelve de forma más balanceada las incertidumbre asociada a las asignaciones de suelos es el de reglas de partición (PART) y es al mismo tiempo el que ofrece la máxima reducción en la incertidumbre entre los algoritmos seleccionados de acuerdo a la matriz de confusión.

Al determinar el peso relativo de las siete variables proporcionadas a través de la selección de atributos de una jerarquización no supervisada mediante componentes principales y mediante la evaluación de subconjuntos de variables (con una búsqueda simple y una exhaustiva) se encontró que son tres variables las que tienen mayor peso en la distribución de suelos: las geoformas (la disección vertical y formas kársticas), el clima y la geología (litología).

Cuadro 5.4 Resultados del análisis de confusión para la clasificación de los polígonos usando todas las variables

Método	No. de polígonos examinados	No. de reglas	Polígonos correctamente clasificados	Polígonos incorrectamente clasificados
Tabla de decisión de búsqueda simple	16353	1119	83.26%	16.74%
Tabla de decisión de búsqueda exhaustiva	15353	1119	83.26%	16.74%
Construcción de excepciones (Ripple-Down-Rules)	16456	357007	84.19%	15.81%
Reglas de partición (PART)	16456	389	85.69%	14.31%

De manera sintética los resultados indican que la asignación de suelos con base en las variables seleccionadas y los grupos de suelo definidos con ellas es consistente y que tiene entre un 14% a 16% de incertidumbre, la cual se encuentra posiblemente asociada a imprecisiones en los datos. Esto indica que se requiere mayor de trabajo de campo en algunos sitios para poder afinar el modelo.

De los 13 grupos de suelo identificados, el grupo de suelo que ocupa la mayor parte del territorio es el Leptosol (48.8%) seguido por Gleysol y Phaeozems, estos tres en conjunto ocupan el 75.6% de la superficie estatal. Los grupos de suelo que como grupo principal ocupan menos del 1% de la superficie son Kastañozem, Regosol y Fluvisol (Cuadro 5.5).

En los polígonos puede encontrarse un grupo de suelo ocupando la mayor proporción de área y también se pueden encontrar otros grupos de suelos en menor proporción como se muestra en el Cuadro 5.6, esta situación es muy frecuente en el Estado, en áreas pequeñas se pueden encontrar suelos diferentes. Para calificar a los polígonos, solo se consideraron los tres suelos que ocupan la mayor área del mismo, dando como resultado 112 combinaciones posibles de suelos (Figura 5.4).

Cuadro 5.5. Grupos principales de suelos del estado de Quintana Roo

Grupo de suelo principal	No. polígonos	Área ocupada (Has)	%
Leptosol (LP)	7376	2452346.72	48.86%
Gleysol (GL)	3386	782927.46	15.60%
Phaeozems (PH)	1306	575975.62	11.47%
Vertisol (VR)	707	377514.64	7.52%
Luvisol (LV)	813	278484.66	5.55%
Cambisol (CM)	616	255075.29	5.08%
Solonchaks (SC)	291	114348.10	2.28%
Histosol (HS)	17	63380.86	1.26%
Arenosol (AR)	622	52623.74	1.05%
Nitisol (NT)	184	45745.75	0.91%
Kastañozems (KS)	98	19018.77	0.38%
Regosol (RG)	35	1701.36	0.03%
Fluvisol (FL)	5	266.54	0.01%
No dato	103	10767.21	0.21%
Cuerpo de agua	897	29194.10	0.58%
Total	16456	5019409.51	100.00%

Cuadro 5.6. Grupos de suelos asociados a los principales

GSP	ASOCIADOS								
LP	PH	LV	RG	VR	SC	NT	GL	HS	AR
GL	LP	LV	RG	VR	SC	PH	HS	AR	
LV	LP	PH	GL	VR	SC	NT	CM		
AR	LP	GL	RG	HS	SC	CM			
PH	LP	LV	GL	VR	CM				
KS	LP	LV	PH	VR	NT				
VR	LP	LV	GL	PH					
CM	LP	LV	PH	HS					
SC	LP	GL	KS	AR					
HS	LP	SC	RG						
FL	LP	LV	PH						
NT									
RG									

GSP= Grupo de suelo principal

5.3.2 Ambientes Geomorfoedafológicos (AGE)

Con base en la definición de ambientes de Zinck (2012) y considerando las características morfométricas (disección vertical, formas kársticas, densidad kárstica, densidad de fallas) junto con las características de régimen de inundación, los grupos de suelo presentes, la vegetación, el clima y la edad de la roca (Cuadro 5.3), para el Estado se identificaron siete ambientes geomorfoedafológicos (AGE) representativos y subtipos dentro de ellos (Cuadro 5.7 y Mapa de ambientes geomorfoedafológicos de Quintana Roo):

- Depositionales: Litoral (acumulativo), Palustre y Pseudopalustre, controlados por la deposición de materiales detríticos solubles y/o biogénicos transportados.
- Erosional: Litoral (erosivo), controlado por procesos de disección y remoción.
- Estructural: Tectokárstico, controlado por la geodinámica interna a través de la tectónica.
- Disolucional: Kárstico de caliza y Kárstico de Yeso, controlados por procesos de disolución de rocas generando erosión química.
- Mixto.

El **AGE Litoral** se presenta en la región de formación más reciente, de finales del Terciario (Plioceno) y del Cuaternario, se ubica en la zona costera, en la transición entre la parte continental y la parte marina y por tanto tiene influencia de ambos ambientes. De acuerdo



Figura 5.5 Paisaje típico del AGE Litoral

a sus características se presentan dos tipos: litoral erosivo-acumulativo en las zonas costeras del norte en donde se alternan playas arenosas y rocosas en cortas distancias, y litoral acumulativo en el sur, ocupan el 1.24 y 1.06% de la superficie del Estado respectivamente (Cuadro 5.8). En el AGE Litoral erosivo-acumulativo los suelos representativos son Arenosol/Gleysol/Histosol, sobre ellos se desarrolla vegetación de matorral costero, selva baja caducifolia y plantas halófitas. En

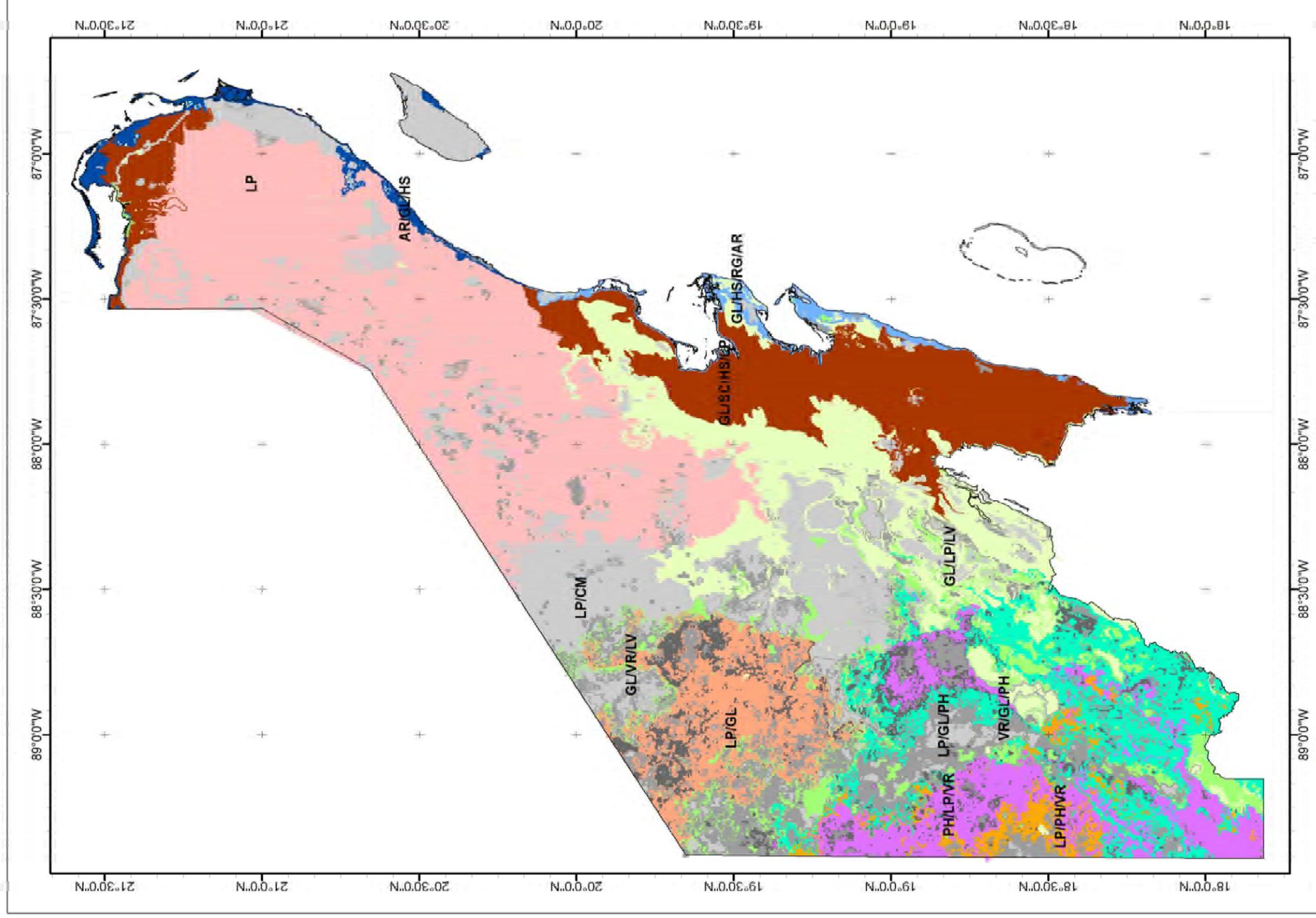
algunos sitios dentro de este ambiente pueden encontrarse asociaciones de suelos como Regosol/Gleysol/Histosol, Regosol/Arenosol en donde se desarrollan plantas xerófitas o Leptosol en costas rocosas. En el sur el AGE Litoral es principalmente acumulativo y los suelos representativos en este ambiente son Gleysol/Histosol/Regosol/Arenosol, la vegetación de manglar es la que ocupa mayor área.

Cuadro 5.7. Ambientes geomorfoedafológicos en Quintana Roo

AGE	Subtipos	Suelos	Vegetación
Litoral	erosivo	AR/GL/HS	Matorral
	acumulativo	GL/HS/RG/AR	Manglar
Palustre	acumulativo	GL/SC/HS/LP	Manglar, tular, popal, selva baja subperennifolia
Pseudopalustre	de planicies subhorizontales y onduladas	GL/LP/LV	Selva baja y mediana subperennifolias
	de planicies onduladas	GL/VR/LV	Selva baja y mediana subperennifolias, agricultura, pastizal cultivado
	de planicies acolinadas y lomeríos	VR/GL/PH	Selva mediana subperennifolia, agricultura, pastizal cultivado
Tectokarst	de planicies subhorizontales	LP	Selva mediana subcaducifolia y subperennifolia
	de planicies acolinadas y lomeríos	LP/GL	Selva mediana subperennifolia y pastizal cultivado
	de lomeríos y montaña	LP/PH/VR	Selva baja y mediana subperennifolia, pastizal cultivado
Karst	de planicies subhorizontales	LP/CM	Selva baja caducifolia, selva mediana subperennifolia, agricultura
	de planicies onduladas y acolinada	LP/GL/PH	Selva baja subcaducifolia, selva mediana subcaducifolia, agricultura
	de lomeríos	LP/LV/GL	Selva baja subperennifolia, selva mediana subperennifolia y subcaducifolia, pastizal cultivado
Karst de yeso	*	PH/LP/VR	Selva alta y mediana subperennifolia
Mixto	**		

* No presenta subtipos

** Los datos dependen del lugar y se puede apreciar en escalas 1:50000



Mapa de ambientes geomorfoedafológicos de Quintana Roo

Simbología

Ambientes y suelos representativos	Tecto-karst
Litoral	de planicie subhorizontal y ondulada, LP
Acumulativo, GL/HS/RG/AR	de planicies acclinadas, LP/IG/L
Erosivo-acumulativo, AR/GI/HS	de lomeríos y montañas, LP/PH/VR
Yeso, PH/LP/VR	Pseudopalustres
Karst	de planicie subhorizontal y ondulada, GL/LP/LV
de planicie subhorizontal, LP/ICM	de planicie ondulada, GL/VR/LV
de planicie ondulada y acclinada, LP/IG/LP/H	de planicie acclinada y lomerío, VR/IG/LP/H
de lomeríos, GL/LP/LV	Palustres
	Palustre, GL/SC/HS/LP

WGS_1984_UTM_Zone_16N
 Proyección: Transversa de Mercator
 Falso Este: 500000.0
 Falso Norte: 0.0
 Meridiano Central: -87.0
 Factor de escala: 0.9996
 Factor de origen: 0.0
 Unidad de origen: Metro (1.0)

Coordenadas Geográficas: EPSG: WGS_1984
 UTM: 16N (0.0174532825199433)
 Meridiano Primario: Greenwich (0.0)
 Datum: D_WGS_1984
 Estereografía: WGS_1984

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

1:1,500,000

0 5 10 20 30 40 50
 Kilómetros

Elaboración Propia
 Patricia Fríasgo Servón

Cuadro 5.8 Superficie ocupada por los diferentes ambientes geomorfoedafológicos

AGE	No. de polígonos	km	%
Tectokarst de planicie subhorizontal y ondulada	1132	11948.51	23.62
Karst de planicie subhorizontal	2822	7684.82	15.19
Palustre	444	5708.04	11.28
Karst de planicie ondulada y acolinada	5486	5464.91	10.80
Pseudopalustre de planicie subhorizontal y ondulada	1270	5424.13	10.72
Pseudopalustre de planicie acolinada y lomeríos	703	3448.34	6.82
Yeso	590	2753.51	5.44
Tectokarst de planicies acolinadas	216	2323.02	4.59
Pseudopalustre de planicie ondulada	1112	2201.61	4.35
Karst de lomeríos	1311	1653.00	3.27
Tectokarst de lomeríos y montaña	173	784.25	1.55
Litoral erosivo-acumulativo	540	627.63	1.24
Litoral acumulativo	621	534.33	1.06
Arrecifes	36	37.61	0.07
		50593.71	100.00

El **AGE Palustre** se presenta en las zonas de planicies bajas acumulativas que se encuentran cercanas a la costa en dónde el agua de lluvia se estanca de manera estacional



Figura 5.6 Paisaje del AGE Palustre

o semipermanente debido a la casi nula pendiente o en las zonas con surgimiento de cuerpos de agua subterránea o dónde el ascenso y descenso del manto freático permiten periodos de inundación. Ocupa el 11.28% del Estado, se presenta en dos zonas, uno sobre la formación del Plioceno (Carrillo Puerto) abarcando una gran área paralela a la costa en dónde la precipitación es abundante (Aw_2) y otra de menor área en el norte en un clima más seco (Aw_0) pero con la presencia de flujos de agua subsuperficial. Los suelos que se presentan en este ambiente son Gleysol/Solonchak/Histosol/Leptosol, la

vegetación que sobre ellos se desarrolla es principalmente manglar, tular popal y selva baja en las partes altas del relieve (sobre colinas y lomas).

El **AGE Pseudo-palustre** corresponde a las áreas de bajos inundables ubicadas



Figura 5.7 Paisaje del AGE Pseudo-palustre

inmediatamente después de la zona palustre, se encuentran en la zona de transición entre las planicies subhorizontales y las planicies onduladas en la porción centro-este del Estado, son zonas con menor precipitación que los palustres (Aw_1), tienden a inundarse en períodos muy lluviosos ya sea por la misma precipitación o porque el manto freático aumenta su nivel, por escurrimientos de las zonas con mayor altitud o en eventos especiales como la presencia de huracanes. Ocupan 21.89% de la

superficie estatal, se distribuye en tres tipos de geoformas: en planicies subhorizontales y onduladas ligeramente diseccionadas, en planicies onduladas y en zonas de lomeríos y montaña. Los primeros con menor disección vertical y mayor precipitación (Aw_1x'), se ubican a continuación del ambiente Palustre, sobre las formaciones del Mioceno, Oligoceno y Plioceno (Bacalar, Estero Franco y Carrillo Puerto), la poca pendiente favorece condiciones de hidromorfía y el desarrollo de suelos como Gleysol/Leptosol/Luvisol con vegetación de selva baja subperennifolia y selva mediana subperennifolia.

Hacia el oeste en las formaciones más antiguas de finales del Mesozoico (Calizas del Petén) sobre planicies onduladas los suelos que ocupan mayor superficie son la asociación Gleysol/Vertisol/Luvisol con selva mediana y baja subperennifolia además de zonas con agricultura y pastizal cultivado.

El tercer tipo se presenta sobre planicies acolinadas y lomeríos ligeramente diseccionados en el sur del Estado, los suelos representativos son Vertisol/Gleysol/Phaeozems, sobre ellos se desarrolla la actividad agrícola más importante del Estado.

El **AGE Tectokárstico** se encuentra en zonas donde se presentan dos características simultáneas: una densidad media o alta de fallas y una alta densidad de depresiones kársticas (dolinas, úvalas y poljes). Considerando la disección vertical, geología y suelos se



Figura 5.8 Paisaje del AGE Tectokárstico

presentan tres subtipos: de planicies subhorizontales y onduladas, de planicies acolinadas y de lomeríos y montaña. El Tectokarst de planicies subhorizontales es el que ocupa la mayor área (29.76%), se ubica en la zona norte del norte del estado sobre formaciones geológicas recientes (Plioceno y Cuaternario), la vegetación dominante es de selva mediana subperennifolia sobre suelos delgados, los Leptosoles, pero pueden encontrarse también áreas con presencia de Leptosoles/Luvisoles. Una segunda zona se encuentra sobre planicies

acolinadas en la porción centro-oeste del Estado sobre la formación del Eoceno (Chichen Itzá) en donde los suelos dominantes Leptosol/Gleysol son utilizados para pastizales cultivados. Una tercera zona con menor área, se localiza en las formaciones más antiguas del Estado (Icaiché) sobre lomeríos y montañas en la porción oeste, lo que ha permitido el desarrollo de suelos más profundos en las partes bajas, los suelos dominantes son Leptosoles/Phaeozems/Vertisoles donde se desarrolla vegetación de selva mediana subperennifolia.

El **AGE de Karst** se produce por los procesos de disolución de la roca caliza por efecto del agua proveniente de la precipitación y la vegetación, como resultado se desarrolla con mayor intensidad el relieve negativo exokárstico (dolinas, úvalas y poljes) y endokárstico



Figura 5.9 paisaje del AGE Kárstico

(cuevas y cavernas), ocupa el 29.26% de la superficie del Estado, una superficie similar al ambiente tectokárstico. En este AGE se presentan tres subtipos: en planicies subhorizontales al norte del Estado, en planicies onduladas y acolinadas ubicadas en la parte central y en lomeríos en la porción occidental. Sobre las planicies subhorizontales el ambiente kárstico se encuentra diseminado por toda la zona norte en pequeñas áreas entre zonas tectokársticas a forma de salpicadura y hacia

el sur en la parte central se ubican grandes áreas en donde el relieve empieza a ser más elevado. Los suelos representativos son Leptosol/Cambisol con vegetación de selva baja subperennifolia y selva mediana subperennifolia. Hacia el oeste la karsticidad va disminuyendo y las áreas ocupadas por este ambiente también, sobre las planicies

onduladas y acolinadas se desarrollan suelos más profundos, siendo los dominantes Leptosol/Cambisol/Luvisol con vegetación de selva baja y mediana subcaducifolia. Entre zonas de lomerío con selva mediana tanto subperennifolia como subcaducifolia y en algunos lugares selva baja subperennifolia se presentan Gleysol/Leptosol/Luvisol.

El **AGE de Karst de yeso**, se desarrolla en las formaciones geológicas más antiguas del Estado (Cretácico superior y Paleoceno), en el extremo oeste cerca de la frontera con el estado de Campeche, en la zona con mayor altura conformada por montaña, lomeríos y planicies onduladas, la asociación de suelos dominante es Phaeozem/Leptosol/Vertisol sobre los cuales se desarrolla vegetación de selva alta y mediana subperennifolia



Figura 5.10 Paisaje del AGE Karst de yeso

En algunas áreas del Estado como en el extremo norte, cuando se trabaja a una escala 1:50000 o de mayor detalle, es posible encontrar regiones que presentan en poca área varios AGE como en la zona norte, en Chiquilá, en dónde se encuentran áreas con AGE Litoral, Palustre, Pseudopalustre y Kárstico, en este caso estas zonas se definen como AGE Mixto.

En el Mapa de Ambientes Geomorfoedafológicos puede verse que los ambientes antes descritos se van sustituyendo unos a otros en función del cambio en las variables más determinantes para la formación de suelos, es decir el relieve, la altitud, el tipo de material parental, el régimen de inundación y las condiciones climáticas, de esta manera iniciando por la zona costera que es la zona más baja y desplazándonos hacia el oeste y sur del estado que es la zona más alta y antigua los ambientes y sus características se van remplazando del siguiente modo:

El AGE Litoral no lo define la sola presencia de zonas costeras, hay la conjunción de una serie de factores que favorecen la presencia de ese ambiente, por ejemplo, la Bahía de Chetumal, a pesar de ser una zona costera presenta características diferentes al resto de la costa, no es un entrante salino, presenta baja salinidad (entre 7 y 10 ppm) debido a que es la zona de desembocadura del Río Hondo y el sistema lagunar de Bacalar, parece más una ribera de río o laguna, dado que la Bahía de Chetumal tiene un comportamiento estuarino, por ello las zonas aledañas a la Bahía presentan AGE palustres y pseudopalustres, la características de AGE Litoral se manifiesta hasta la zona de la desembocadura de la Bahía en donde aumenta la salinidad y las condiciones se hacen más semejantes a las del frente marino.

En la zona costera del sur la influencia de la corriente marina del Caribe genera ambientes acumulativos y en la zona norte se genera alternancia entre ambientes erosivos y acumulativos dependiente del perfil de la costa (historia geológica), las características de los suelos en este espacio litoral están ligadas a la dinámica de las corrientes marinas y el

transporte de sedimentos haciendo que en los ambientes acumulativos del sur sean más frecuentes los Gleysoles e Histosoles en el espacio correspondiente a las bahías de Ascensión y Espíritu Santo; Regosoles y Arenosoles en la porción correspondiente a la zona de Costa Maya y en la porción del norte, donde el AGE es erosivo-acumulativo favorece la presencia de distintas mezclas de Arenosoles, Gleysoles e Histosoles.

En estas condiciones la vegetación está influenciada por dos factores; la cantidad de agua subsuperficial y subterránea y la profundidad a la que se encuentra. En el AGE acumulativo predomina el matorral costero y en el norte el matorral costero alternando con formaciones de selva baja.

De la costa hacia el oeste en las planicies subhorizontales la cercanía del manto freático, las abundantes precipitaciones y la frecuencia en la penetración de la cuña salina han favorecido la presencia del AGE Palustre en donde las condiciones de inundación han generado la presencia de suelos como los Gleysoles y Solonchaks junto con la vegetación característica de popal, manglar y tular.

A medida que aumenta la Disección Vertical se presenta una zona de transición entre los AGE Palustres y los AGE Kársticos y Tectokársticos, que corresponde a los AGE Pseudopalustres aquí la mayor parte del año se acumula gran cantidad de agua en la temporada de lluvias (régimen climático) dando condiciones intermedias entre zonas donde rápidamente se infiltra y las zonas donde queda acumulado en inundaciones permanentes. El AGE Pseudopalustre recibe materiales de las zonas altas y esa acumulación de materiales impermeabiliza o reduce la velocidad de infiltración del agua por ello los suelos presentes en este ambiente son aquellos con problemas de drenaje como Gleysoles y al mismo tiempo en zonas de planicies onduladas y acolinadas la acumulación de materiales ha permitido el desarrollo de Vertisoles y Luvisoles e incluso en zonas de montaña ligeramente diseccionada la presencia de Phaeozems, con suelos más profundos se desarrollan selvas medianas e incluso se presentan selvas altas, esta es la zona con mayor cantidad de áreas dedicadas a la agricultura en el estado, en este AGE hay mayor heterogeneidad de suelos en grandes superficies.

Los AGEs de karst y Tectokarst son los ambientes que ocupan la mayor superficie, se presentan en las zonas donde el agua no se acumula, se infiltra, el manto freático se encuentra a mayor profundidad favoreciéndose los procesos de disolución de la roca calcárea, allí es donde se encuentra la mayor cantidad de depresiones kársticas y fallas, los suelos característicos son los Leptosoles, pero en las depresiones donde se acumulan materiales se presentan Cambisoles, Luvisoles, Gleysoles. Los Nitisoles y Cambisoles se presentan en las planicies., En las zonas de mayor DV como lomeríos y acolinamientos disolutivos se tienen registrados Phaeozems.

Las AGEs kársticos de yeso se encuentran en zonas de mayor altura y más antiguas, presenta Leptosoles en las laderas de las pendientes y en los valles suelos de mayor profundidad donde se acumulan los materiales bajo la influencia de una fuerte proceso de karstificación independiente del material parental (yeso o caliza).

5.4 Discusión

El punto de partida para la elaboración de mapas debe ser conocer el medio físico tanto en su descripción como en su dinámica (Espinosa, 2005), esto se logra a través del análisis de los procesos que permiten la formación y la evolución del relieve, el origen y desarrollo de los suelos y las diferentes velocidades de desarrollo que el relieve y los suelos imprimen al paisaje. Por ello en este trabajo se construyó una base morfométrica fina a escala 1:50000 que produjo la definición de 11 geoformas producto de la disección vertical y la presencia de 3 tipos de geoformas kársticas negativas a las cuales están asociadas 112 combinaciones posibles de suelos, este nuevo conocimiento del medio físico de Quintana Roo es la que funge como base para la construcción del mapa.

Quintana Roo es un estado que presenta gran diversidad de ambientes; sin embargo, los mapas que se habían elaborado no lo reflejaban. El enfoque fisiográfico con el que fueron elaborados los mapas del INEGI en donde el tipo de roca y el relieve son los puntos de partida para definirlos presentan solo tres subprovincias fisiográficas para el Estado: Carso Yucateco, Carso y lomeríos de Campeche y Costa baja de Quintana Roo (INEGI, 2000b). Incorporando a la información morfométrica y edafológica la información hidrológica de las formas kársticas negativas, el clima y la vegetación se pudieron identificar para el Estado siete tipos de ambientes y 12 subtipos con esta metodología.

Estos ambientes encontrados dependen de los procesos dominantes y las combinaciones de ellos están consideradas dentro del modelo jerárquico definido por el enfoque geomorfoedafológico que al ser un sistema de clasificación jerárquico facilita y obliga a que la definición de los tipos de ambientes según Zinck (2012) sea precisa.

Estos resultados nos muestran al Estado como un sistema dinámico, ya que el enfoque permite definir zonas de transición entre los ambientes como ambientes mixtos, estos aspectos, componentes, interacciones y dinámica, ayudan a entender y explicar los procesos que tienen lugar en el Estado, como menciona Cotler (2003), la asociación de suelos refleja la influencia que tienen los factores formadores sobre ellos.

Una de las mayores ventajas que tiene la metodología aquí definida es la replicabilidad, al ser un sistema jerárquico y quedar bien definidos sus categorías deja de lado aspectos subjetivos; con ayuda de las nuevas tecnologías de información que permiten manejar y analizar grandes volúmenes de información en poco tiempo, hace posible su aplicación a otras áreas y a diversas escalas de manera relativamente directa (Gessler *et al.*, 1995; MacMillan *et al.*, 2000; Hartemink *et al.*, 2013).

Los análisis estadísticos aplicados AG, ACP y el AC indicaron que de las once variables sometidas, la disección vertical, las formas kársticas, el clima y la geología son las variables que tienen mayor peso para definir la distribución de los 14 grupos principales de suelos.

Esto indica que las formas del terreno tanto positivas (DV) como negativas (depresiones kársticas) son los factores que principalmente están definiendo la distribución espacial y desarrollo de los suelos al menos para las condiciones en el estado de Quintana Roo.

La vegetación no es una variable que permita determinar la distribución de suelos al menos en Quintana Roo, solo en el caso de algunos tipos de vegetación muy particulares como la presencia de manglar permite identificar un grupo posible de suelo pero no es un factor determinante, por ello un mapa de ambientes derivados solo de la interpretación de la vegetación debe también considerarse con reserva a la luz de los resultados aquí presentados, resultados similares fueron obtenidos por Leyva *et al.* (2009) en Costa Rica y por Peris *et al.* (1994) en España. Sin embargo, la vegetación sirve para lograr la congruencia con el relieve y los suelos, como en el caso de Planicies con depresiones kársticas, Gleysoles y selva baja subperennifolia.

La variabilidad en estudios de suelos de acuerdo a Hall y Olson (1991 en Bautista *et al.*, 2007) se presenta de forma sistemática y al azar. La variabilidad sistemática es predecible y se encuentra asociada al relieve (paisajes edáficos) y la variabilidad al azar se presenta cuando uno de los factores formadores del suelo se manifiesta o influye con mayor intensidad (HU, 2013; Lagacherie *et al.*, 2013; Mulder *et al.*, 2011), en la primera de ellas (variabilidad sistemática) tenemos el caso en el Estado de la presencia de Arenosoles en el ambiente Litoral y en la segunda (variabilidad al azar) tenemos el caso en el norte del estado en donde sobre planicies subhorizontales en condiciones similares hay dolinas que presentan inundación permanente y otras temporal o extraordinaria generando la presencia de diferentes suelos.

La caracterización de las formas del paisaje permite, por un lado, entender las relaciones existentes entre el terreno y los grupos de suelo y, por otro lado, identificar el grado de desarrollo de la asociación geoforma-suelos, por ejemplo, en Quintana Roo, según el análisis morfométrico y de suelos realizado para este trabajo, en la parte baja del sistema de planicies acolinadas es más frecuente la aparición de Leptosoles que en la parte alta del sistema, en donde los acolinamientos se encuentran en mayor densidad y con mayor inclinación, disminuye la presencia de Leptosoles y se incrementa la de suelos más ricos y profundos como los Phaeozems y Luvisoles; lo cual podría indicar que la amplitud de los valles intermontanos se relaciona con estas formaciones de suelos de manera semejante a como se relaciona la extensión de las catenas en el estado de Yucatán con los suelos asociados a ellas reportadas por Bautista *et al.*, (2004), existen otros trabajos en diferentes partes del mundo que muestran este tipo de relación (Berg y Oliveira, 2000a, 2000b; Fonseca, 2010; Hennemann y Nagelhout, 2004; Lo Curzio, 2009; Möller *et al.*, 2008).

Todos los atributos y relaciones entre los diferentes factores formadores de suelos hasta aquí discutidos están fuertemente ligados al Tiempo, tiempo que en la Península de Yucatán se manifiesta espacialmente al encontrarse las zonas más antiguas en la porción central-sureña de la Península (oeste y sur de Quintana Roo) y las más recientes en la periferia de la misma, la distribución y secuenciación de ambientes que representa el Mapa de Ambientes Geomorfoedafológicos de Quintana Roo refleja esa misma dependencia

temporal en las características de los ambientes, de modo tal, que con la debida reserva por la variabilidad misma que hemos observado en el territorio, es de esperar que el comportamiento general de los grupos de suelo más frecuentes y predominantes sean del mismo modo los menos evolucionados en la periferia y los más evolucionados y profundos hacia el centro de la Península tal como lo refiere Cabrera *et al.* (1994)

Independientemente de la uniformidad que define a cada uno de los AGE las irregularidades producidas por el proceso de karstificación forman depresiones, en donde la pedogénesis es diferente al entorno, los suelos que se forman son diferentes a los que se forman en los alrededores. En estos pequeños espacios la disponibilidad de agua es mayor, al hundirse el terreno, hay acumulación de materiales del entorno, en estos sitios la vegetación se desarrolla más rápidamente y aporta mayor cantidad de materia orgánica, la cual influye a su vez, en el tipo y velocidad del proceso pedogenético, por ello es posible encontrar en pequeñas distancias diversidad de suelos como lo ha reportado por Bautista *et al.* (2004, 2001) y Pereira *et al.* (2014).

5.5 Reflexiones finales del capítulo V.

La definición de ambientes para Quintana Roo con el enfoque Geomorfoedafológico contempló la síntesis de información generada en la caracterización de los componentes ambientales (clima, vegetación, suelos) y el análisis del relieve, disección vertical, depresiones kársticas, así como fallas y la roca a través de diversos análisis estadísticos (análisis de agrupamiento, análisis de componentes principales y análisis de clasificación) lo cual permitió elaborar el mapa con el patrón de distribución de los Ambientes Geomorfoedafológicos .

Se identificaron siete ambientes geomorfoedafológicos y once subtipos para Quintana Roo que reflejan la interacción de sus componentes y dinámica.

Los procesos kársticos, tectokársticos y la disección vertical son los que explican la variabilidad ambiental y la presencia de los grupos de suelos.

Esta investigación aporta un marco metodológico novedoso para ser aplicado en otros lugares y a diferentes escalas de detalle.

El mapa de ambientes geomorfoedafológicos elaborado con datos de los factores formadores de suelos y asociado a métodos matemáticos para inferir información en los lugares donde no se tienen datos es un primer insumo importante para la toma de decisiones.

El siguiente paso es completar la base de datos de suelos trabajando en aquellas zonas donde se tiene poca información para enriquecerla y elaborar el Mapa geomorfoedafológico de suelos a escala 1:250 000 y posteriormente a escala 1:50 000.

5.6 Referencias del capítulo V

- Bautista, F., Aguilar, Y., Rivas, H., Paez., R. 2007b. Los suelos del estado de Yucatán. In: *Importancia del binomio suelo-materia orgánica en el desarrollo sostenible*. Agencia Española de Cooperación Internacional” y el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Seguro de Murcia, España, pp. 11–42.
- Bautista, F., Batllori, S.E., Ortiz, P.M., Palacio, G., Castillo, G.M. 2005a. Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México 33–58.
- Bautista, F., Palacio, G., Carmona, E., Páez, R., Cantarel, W., Tello, H. 2007a. Distribución espacial y temporal de los paisajes edáficos de la Península de Yucatán. Presentado en *Memorias del XVII Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo*, México.
- Bautista, F., Palacio, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135, 308–321.
- Bautista, F., Estrada, H., Jiménez, J., González, A. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. *Terra Latinoamericana* 22, 243–254.
- Berg, M., Oliveira, J.B. 2000a. Variability of apparently homogeneous soils in São Paulo State, Brazil: I. Spatial analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 24, 377–391.
- Berg, M., Oliveira, J.B. 2000b. Variability of apparently homogeneous soils in São Paulo State, Brazil: II. Quality of soil maps. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 24, 393–407.
- Bertalanffy, L. 1976. *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, Á., Burgos, A. 2009. La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales : Instituto Nacional de Ecología : Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, México, D.F.
- Comisión Nacional Forestal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2011. *Inventario Forestal Nacional*. CONAFOR-SEMARNAT, México.
- Cotler, H. 2003. El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta ecológica* 33–42.
- Espinosa, R. 2005. Morfoedafogénesis: un concepto renovado en el estudio del paisaje. *Ciencia Ergo Sum* 12, 162–166.
- Fonseca, I.L. 2010. Modelação de formas de relevo para aplicação à cartografia de solos. Presented at the V Congresso Nacional de Geomorfologia, Porto, Portugal.
- Frank, E., Witten, I.H. 1998. Generating Accurate Rule Sets Without Global Optimization. Morgan Kaufmann, pp. 144–151.
- Gaines, B.R., Compton, P. 1995. Induction of Ripple-Down Rules Applied to Modeling Large Databases. Ed. Engineering Research Council of Canada. Canada.
- Gessler, P.E., Moore, I.D., McKenzie, N.J., Ryan, P.J. 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems* 9, 421–432.
- Halkidi, M., Batistakis, Y., Vazirgiannis, M. 2002. Clustering validity checking methods: part II. *ACM Sigmod Record* 31, 19–27.
- Hartemink, A.E., Krasilnikov, P., Bockheim, J.G. 2013. Soil maps of the world. *Geoderma* 207–208, 256–267.
- Havens, T.C., Bezdek, J.C., Keller, J.M., Popescu, M. 2008. Dunn’s cluster validity index as a contrast measure of VAT images, in: *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*. IEEE, pp. 1–4.
- Hennemann, G.R., Nagelhout, A. 2004. Searching for effective, low-cost methods to detect and assess wind erosion damage: the promise of small-format aerial photography (SFAP). *Wind Erosion and Dust Dynamics: Observations, Simulations, Modelling* 123.
- HU, X.Y. 2013. Application of Visible/Near-Infrared Spectra in Modeling of Soil Total Phosphorus. *Pedosphere* 23, 417–421.
- IDEAM. 2011. *Metodología para la elaboración del mapa de ecosistemas escala 1:100000*.

- INEGI. 2000b. Diccionario de datos fisiográficos 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2008a. Carta de Climas para la República Mexicana, 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2008b. Carta Edafológica serie II. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- IUSS. Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jongman, R.H., Ter Braak, C.J., Van Tongeren, O.F. 1995. Data analysis in community and landscape ecology. Cambridge university press.
- Kohavi, R. 1995. The Power of Decision Tables, in: Proceedings of the European Conference on Machine Learning. Springer Verlag, pp. 174–189.
- Lagacherie, P., Snee, A. R., Gomez, C., Bacha, S., Coulouma, G., Hamrouni, M.H., Mekki, I. 2013. Combining Vis–NIR hyperspectral imagery and legacy measured soil profiles to map subsurface soil properties in a Mediterranean area (Cap-Bon, Tunisia). *Geoderma* 209–210, 168–176.
- Leyva, J., Rocha, O., Mata, R., Gutiérrez, M. 2009. Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica: II. La vegetación en relación con el suelo. *Revista de Biología Tropical*. 57(3), 817-836.
- Lo Curzio, S. 2009. Identification of soil erosion landsurfaces by Landsat data analysis and processing. *Italian Journal of Remote Sensing* 25–36.
- MacMillan, R.A., Pettapiece, W.W., Brierley, J.A. 2000. An expert system for capturing and applying soil survey tacit knowledge to automatically link soils to landform position in soil-landform models. Artículo disponible en: http://www.env.gov.bc.ca/esd/distdata/ecosystems/wis/pem/tech_workshop/panel-papers/macmillan/applying-soil-tacit-knowledge.pdf
- MacMillan, R.B. 2004. Automated knowledge-based classification of landforms, soils and ecological spatial entities. Artículo en conferencia disponible en: <http://www.georeference.org/forum/e32412F39303135342F31322D426F624D61634D696C6C69616E2E646F63/12-BobMacMillan.doc>
- Mendoza, M., Bocco, G. 1998. La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica. *Serie Varia* 17, 25–55.
- Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., Lymburner, L. 2008. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 419–430.
- Morate, D.G. 2008. Manual DE Weka. Disponible através do e-mail diego.garcia.morate@mail.com.
- Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E., Mayr, T.R. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma* 162, 1–19.
- Mukerjee, P. 2012. Classification & Association Rule Generation. Vinod Gupta School of Management. India.
- Nelson, T.O. 1986. BASIC programs for computation of the Goodman-Kruskal gamma coefficient. *Bull. Psychon. Soc.* 24, 281–283. doi:10.3758/BF03330141
- Omran, M.G., Engelbrecht, A.P., Salman, A. 2007. An overview of clustering methods. *Intelligent Data Analysis* 11, 583–605
- Ortiz, C. 2010. Edafología, Octava. ed. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Pereira, A., Fragoso, P. 2002. Los Sistemas de Información Geográfica en el manejo de suelos. Presentado en el Simposio Regional sobre suelos y su manejo, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán.
- Pereira, A., Prezas, B., Olivares, J.A., Fragoso, P., Niño, C. 2013. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (Quintana Roo) - Statewide Program of Action on Climate Change (Quintana Roo), 1st ed. Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México.
- Pereira, A., Fragoso, P., Prezas, B. 2014. Relaciones agua-suelo-espacio en X'Cacel-X'Cacelito, Quintana Roo. Conferencia. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana. Puerto Vallarta, Jalisco, México.

- Peris, J., Sanchis, E., Roig, C. 1994. Relación suelo/vegetación en la plana cuaternaria del Golfo de Valencia. Cuadernos de Geografía 56, 155-162. España.
- Romesburg, C. 2004. Cluster analysis for researchers. Lifetime Learning Publications. USA.
- UQRoo. 2004a. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo - SEMARNAT - SEDUMA, México.
- UQRoo. 2004b. Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Laguna Bacalar (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México.
- Vázquez, M., Pereira, A., Fragoso, P., Rodríguez, J.A. 2011. Riqueza y biodiversidad de organismos edáficos del Corredor Biológico Mesoamericano (México, Belice y Guatemala). In: Avances en ciencia y tecnología en Quintana Roo. UQRoo-PyV, Chetumal, Quintana Roo, pp. 36–70.
- Zinck, J.A. 2012. Geopedología. ITC, Enschede, Netherlands.

Discusión General

La demanda de información de suelos es cada vez mayor y de acuerdo a Sánchez *et al.*, (2009) uno de los grandes retos en este siglo es elaborar mapas que puedan proporcionar esa información a los diferentes usuarios (agricultores, investigadores, políticos, empresarios, etc.) a la escala adecuada y de forma accesible, sin embargo los mapas existentes no cuentan con la resolución adecuada y fueron elaborados con técnicas antiguas, criterios cualitativos y poca precisión.

El desarrollo acelerado que han tenido en los últimos años las nuevas tecnologías (sensores remotos, sistemas de geoposicionamiento entre otras), así como los sistemas de información geográfica y los programas de cómputo estadístico permiten almacenar y procesar grandes cantidades de datos y con ello la aplicación de enfoques más integrales para elaborar nuevos mapas de suelos

Los mapas de suelos pueden clasificarse en tres órdenes de acuerdo de acuerdo a Behrens y Scholten (2006), los de primer orden consisten en mapas de suelos digitalizados que han sido elaborados de la manera clásica, los de segundo orden son mapas de suelo conceptuales elaborados por la sobreposición espacial de diferentes componentes ambientales pero sin un análisis matemático o estadístico profundo y los de tercer orden son mapas generados usando funciones de pedotransferencia y/o geoestadísticos y/o multicriterios y/o estadística multivariada y/o minería de datos.

Los mapas edafológicos elaborados por el INEGI a escala 1:250000 son de primer y segundo orden, fueron elaborados con un enfoque fisiográfico (roca y relieve) y presentan dos problemas fundamentales: el primero de ellos de acuerdo a (Mendoza y Bocco, 1998; Bocco *et al.*, 2009a) es que estos mapas carecen de un criterio bien definido para cada nivel propuesto (una jerarquización taxonómica), no incluyen categorías transicionales y esto es un problema central, ya que dificulta su replicabilidad, el segundo problema es señalado por Cotler (2003) y Hartemink *et al.* (2010), ellos resaltan que estos mapas presentan al suelo como un componente estático, no permiten entenderlo como un cuerpo natural dinámico, componente del paisaje, producto de la acción conjunta de cinco factores formadores. Un tercer problema radica en su lectura difícil y poco comprensible al estar desligados del relieve.

Algunas de las ideas en mente al abordar la elaboración de un nuevo mapa de suelos para el estado de Quintana Roo fueron las necesidades que surgen en los usuarios a partir de las limitaciones antes mencionadas para los mapas disponibles. A lo largo del trabajo estos problemas fueron resueltos al menos parcialmente tratando de utilizar un enfoque holístico, el enfoque geomorfoedafológico, para superar esa visión estática a través de la contribución de la geomorfología y de la edafología y estableciendo un sistema taxonómico jerárquico para la clasificación de las geoformas, que fácilmente se pueden reconocer en campo y sirven de marco de referencia para poder explicar la formación de los suelos y de este modo delimitar unidades en una regionalización natural (Zinck, 2005). A través de un sistema taxonómico bien definido, se deja de depender del criterio del experto y permite su replicabilidad en diversos ambientes y a diversas escalas de trabajo. Este enfoque mucho más integral mostró sin embargo algunas deficiencias, en parte debido a lo limitado de la

información edafológica que hay disponible al menos para Quintana Roo por sus propias características y por los estándares con los cuales fue elaborada la que hay disponible, de modo que fue necesario utilizar técnicas matemáticas multivariadas y de minería de datos para elaborar un modelo geomorfoedafológico digital que incluye otros elementos de juicio aparte de los mencionados estrictamente en el enfoque geomorfoedafológico.

Los mapas digitales se elaboran con una base de datos espacial de las propiedades de los suelos y sus factores formadores (Sánchez *et al.*, 2009), Behrens y Scholten (2006) en Alemania indican que pueden ser usados para predecir la presencia y propiedades de los suelos en áreas donde no hay información, consisten en muestreos y procesos estadísticos para medir la incertidumbre asociada, por su parte Hartemink *et al.* (2008) señalan que en series de tiempo pueden proporcionar información sobre las propiedades dinámicas del suelo, además a diferencia de los mapas basados en polígonos, se basan en píxeles y tienen resoluciones altas.

De este modo al introducir al sistema, y por tanto el mapa, los datos de los factores formadores (roca, relieve, clima, vegetación) y las propiedades físico-químicas de los suelos identificados en un sitio, nos permite inferir la presencia de los suelos en lugares en donde no tenemos muestra pero que comparte la misma información del resto de los factores. Haciendo referencia a lo expresado por Behrens y Scholten (2006) podemos agregar que claramente mientras mayor sea el número de variables manejadas y mayor la cantidad de datos verificables por variable entonces menor será la incertidumbre asociada con las inferencias que se pueden hacer.

Lo anterior pone de manifiesto que el mapa digital resultante puede ser tan dinámico como nuestro conocimiento del objeto que se representa, el suelo no es estático, como no lo es la naturaleza o nuestro conocimiento de la misma, estos mapas permiten ver la influencia de diversos factores que cambian al suelo a través de procesos morfodinámicos, pedogenéticos y en los últimos años por factores antrópicos.

El mapa de ambientes geomorfoedafológico a escala 1:500000 que se presenta como resultado de esta investigación puede catalogarse de acuerdo a los criterios de Behrens y Scholten como un mapa de tercer orden porque se utilizaron diversos criterios para elaborarlo entre los que destacan un enfoque geomorfopedológico en el análisis del relieve, una zonificación morfométrica objetiva y reproducible para la identificación de dichas formas del relieve a partir del criterio de la disección vertical, de las características del karst, del régimen de inundación y de la asociación espacial de las condiciones de clima y vegetación a las unidades morfométricas definidas.

La inclusión de todas estas variables permitió definir el espacio geográfico con mucha mayor precisión que si se hubiera usado solamente la información geológica y de relieve como se expuso anteriormente para algunos de los mapas en uso en el Estado. El mayor número de variables y la resolución para ellas permitió construir una base de datos con un número suficientemente grande de variantes como para asociar los diferentes tipos de suelos y condiciones que se tienen registrados para el Estado de acuerdo con la información de las bases de datos utilizadas y construidas tanto con información de otros estudios como con información proveniente directamente de muestreos de campo, estas bases de datos

de las propiedades físico-químicas de los suelos identificados en campo, analizadas en laboratorio y clasificados con base en criterios actualizados (WRB 2007) fueron analizadas estadísticamente con algoritmos de clasificación y relacionadas con las otras variables y atributos para inferir la probable presencia de un cierto tipo de suelo en función de la concurrencia de valores específicos de los otros criterios considerados.

Las ventajas que este mapa digital de ambientes geomorfoedafológicos presenta son:

- Tiene una base morfométrica sólida que puede ser medida, cuantificada y reproducida en otros lugares. En México existen de acuerdo a Bocco et al. (2005) y Priego et al. (2010) más de 30 índices morfométricos del relieve, en este trabajo se utilizó el modelo digital de elevación, la altimetría, la disección vertical y la densidad de depresiones kársticas para construir de manera semiautomatizada una zonificación e identificación del relieve adecuado a la escala de trabajo.
- Tiene una escala de mayor detalle. Los mapas edafológicos que se utilizan en el estado son a escala 1:250000 o menor, de acuerdo a Cotler (2003) fueron realizados con un fin meramente utilitario basado en las necesidades nacionales de planeación en las décadas de los 70s y 80s; sin embargo, las preguntas y necesidades actuales requieren de otras escalas y precisiones que esta metodología no puede responder. Los mapas digitales permiten moverse en las escalas de acuerdo a las necesidades de detalle específicas de un usuario. El mapa de AGE fue realizado a una escala mayor 1:50000 lo que permite fácilmente cubrir las necesidades de escalas menores como la planeación a escala nacional sin sacrificar las nuevas necesidades de mayor escala y resolución en la información
- Permite definir con precisión la categorías taxonómicas para los diferentes niveles de las geoformas (relieve modelado, paisaje geomorfológico, ambiente morfogenético). El enfoque geomorfoedafológico establece un sistema taxonómico jerárquico para la clasificación de las geoformas, que fácilmente se pueden reconocer en campo, y sirven de marco de referencia para poder explicar su formación y definir sus límites. Con un sistema taxonómico bien definido, se deja de depender exclusivamente del criterio del experto y permite su replicabilidad en diversos ambientes y a diversas escalas de trabajo. Las metodologías utilizadas en este trabajo fueron las de Priego et al. (2010) para la disección vertical, el Índice de Gravelius (Jardí, 1985) para la karsticidad y de Zinck (Zinck, 2012) para definir los ambientes. Si bien existen otras metodologías y técnicas, estas han permitido elaborar un mapa digital base sumamente coherente como lo muestran los análisis de incertidumbre realizados y no descartan la posibilidad de mejorar y enriquecer el mapa con otras metodologías y técnicas, así como con la inclusión de nuevos datos obtenidos por distintos procedimientos y técnicas multivariadas y de minería de datos.
- Es integral. El poder almacenar grandes cantidades de datos, su procesamiento y síntesis en la elaboración de mapas ha sido posible debido a la aplicación de un

enfoque integral que genera resultados espaciales coherentes entre los componentes de los ambientes (como vegetación-suelos, suelos-relieve) entre las diferentes capas de información utilizadas, , al mismo tiempo que al ser un mapa digital, es mucho más dinámico por las posibilidades que tienen las bases de datos actuales de ser actualizadas en cualquier momento sin tener que esperar procesos largos de edición y preparación del mapa impreso.

- Proporciona información de las características de los suelos y del ambiente en el que se encuentran los suelos (clima, vegetación, relieve, rocas). Los mapas actuales, la mayoría de ellos impresos, son inflexibles para estudios cuantitativos, difíciles de integrar con otra información tienen una escala que no ayuda mucho en preguntas específicas y se pierde información valiosa para los usuarios (agricultores, investigadores, tomadores de decisiones) ya que debe resumirse su información. El mapa digital de suelo cuenta con una base de datos espacial de las propiedades (físicas y químicas) de los suelos y sus factores formadores (roca, disección vertical, karsticidad, fallas, zonas de inundación, hidrología, clima y vegetación), además de poderse consultar a escalas que van desde la mayor escala de trabajo hasta las escalas más pequeñas según sea necesario.
- Se pueden inferir las características de un lugar y los suelos presentes en un lugar con una certidumbre razonable. Al introducir al sistema los datos de los factores, formadores y de los suelos identificados en un sitio y por medio de análisis estadísticos nos permite inferir la presencia de los suelos en lugares en donde no tenemos muestra pero que comparte la misma información del resto de los factores. En el caso del mapa digital elaborado para Quintana Roo se obtuvo un 83% de certidumbre para las inferencias de tipo de suelo realizadas.
- Presenta a los suelos como un recurso dinámico. Hartemink *et al.* (2010) y Cotler (2003) señalan que el enfoque geomorfoedafológico toma en cuenta la relación estrecha entre la forma del terreno y los procesos pedogenéticos por ello permite inferir la aptitud de los suelos a partir de las características de diagnóstico establecidas en la clasificación y permite realizar un seguimiento de la evolución de las propiedades del suelo en el tiempo y bajo distintos usos.
- Una clasificación de suelos actualizada. La clasificación de suelos ha cambiado a un ritmo acelerado en los últimos años, desde el sistema propuesto por la FAO en 1968 al sistema WRB 1999, con actualizaciones en 2006, 2007 y recientemente en el 2014, esto debido a que nuestro conocimiento sobre los suelos se ha ampliado y mejorado gracias al desarrollo de las nuevas tecnologías y técnicas de campo y laboratorio que nos han permitido tener mejor conocimiento de los procesos que intervienen en la formación y evolución de los suelos, este nuevo conocimiento no se ve reflejado en los mapas que se han venido utilizando. La cartografía que es consultada y utilizada en la mayoría de los estudios del Estado no se encuentra actualizada, es de los años 70 y 80 (INEGI Serie I) y WRB 1999 (INEGI Serie II) y a

escalas pequeñas (1:500000-1:250000). En esta investigación se utilizó la clasificación WRB 2007.

- La base de datos que conforman un mapa digital se puede actualizar más rápidamente, reflejándose casi inmediatamente la información que en el mapa en sí mismo representa. Algunas posibles respuestas a ¿por qué no se han actualizado y detallado los mapas de suelos actualmente en uso? son dadas por Lagacherie (2008) entre ellas se encuentra el que no se le ha dado la importancia que se debe al estudio de los suelos para la toma de decisiones, otra a que son estudios costosos, el manejo de las tecnologías modernas tanto de SIG como de estadística multivariada y de minería de datos y una tercera, porque no se ha impulsado el estudio de los suelos en las últimas décadas. A medida que se genere nueva información, ésta puede irse incorporando y el sistema puede ir actualizando y detallando los mapas gracias al incremento en la capacidad de almacenamiento de datos y a la velocidad de procesamiento que manifiesta la tecnología actualmente en uso.
- Fácil acceso. La información puede consultarse en línea. El uso de las nuevas tecnologías ha permitido proporcionar información actualizada, reproducible, verificable y relevante en donde los suelos se muestran como elementos dinámicos del paisaje a una población cada vez mayor y más demandante a través de tecnologías de proceso y transferencia de datos en formato digital como la Internet.

Desventajas:

- La buena calidad de los mapas resultantes depende de la calidad y cantidad de la información base tanto la correspondiente a los factores formadores del suelo como edafológica. En este sentido, se puede ver como una desventaja la calidad de alguna información requerida, porque no existe o está incompleta, pero también puede ser vista como una guía de trabajo, lo que hay que hacer a futuro, ya que la mejora en la calidad y cobertura de esa información, redundará en mejores mapas, con mayor capacidad para reflejar con exactitud la realidad y por tanto serán más útiles para la toma de decisiones.
- La selección de las técnicas de análisis adecuadas puede ser laboriosa y requerir un conocimiento previo del espacio a trabajar, además de equipo con capacidad adecuada para almacenar y procesar las técnicas seleccionadas.
- En muchos casos los elementos de juicio que permiten afinar el análisis de los factores formadores no está bien documentado, de modo que representan en algunos aspectos un reto para poder incorporar esa información a las bases de datos que conforman los mapas digitales de suelos.

- Fidelidad del modelo. Para Quintana Roo utilizar curvas de nivel cada 10 m causaron problemas en lugares con menos de 20 de altitud pero en aquellos lugares por arriba de 20 msnm el modelo es robusto.

Al ser Quintana Roo un territorio que no presenta grandes diferencias de altitud, fue necesario buscar elementos de juicio que permitieran afinar de manera integral el análisis de los factores formadores. La información base para el análisis morfométrico fueron las cartas topográficas 1:50000 para el estado, de donde se extrajeron los datos de las curvas de nivel a cada 10 m, las depresiones y los cuerpos de agua, siendo antecedentes los trabajos de Frausto *et al.* en el norte del Estado (Frausto e Ihl, 2008; Frausto *et al.*, 2010a, 2010b).

Las curvas de nivel en Yucatán como lo reporta Aguilar *et al.* (2010) y Bautista *et al.* (2004) fueron utilizadas para diferenciar el relieve, pero en Quintana Roo, por si mismas, no permitían captar la heterogeneidad que en campo puede observarse en lugares con altitud menor a 20 msnm; por tal motivo fue necesario buscar otra alternativa para tratar de captar esa heterogeneidad, una alternativa fue el uso de la disección vertical definida como la amplitud del relieve por km² que a través de una metodología elaborada por Priego *et al.* (2010), permitió definir formas del relieve de menor energía a la escala trabajada, de este modo se diferenciaron estas formas del relieve en planicies subhorizontales, planicies onduladas y planicies acolinadas. Con aquellos lugares con altitudes mayores, su representación a través de la DV permitió diferenciar el territorio de manera consistente.

A la escala de trabajo siguen presentándose algunos problemas en la representación de algunas zonas con alturas entre 0 y 20 msnm, lo cual podría solucionarse trabajando con curvas de nivel mayor detalladas o a una escala de mayor en esos lugares u otras técnicas (LiDAR).

La falta de información en este intervalo de trabajo, en términos de curvas de nivel, se superó parcialmente con la inclusión de la información de zonas de inundación que permitieron la identificación de depresiones (menores a 10 m de diferencial de altura) y que dan cuenta de la mencionada heterogeneidad del relieve en una escala vertical más fina

Por otro lado, la disolución de la roca calcárea produce relieve negativo (depresiones) el cual fue clasificado por su tamaño, régimen de inundación y densidad a través de técnicas ya descritas en el capítulo III, la alta densidad de depresiones kársticas en las zonas de altitud menor a 50 msnm nos permitieron apreciar que hay procesos dinámicos de disolución, acumulación e inundación que se desarrollan a velocidades diferentes a los que se encuentran en zonas de mayor altura, todo ello nos indica que la geomorfología del Estado dista mucho de ser plana y homogénea.

Esta base geomorfológica kárstica heterogénea tanto positiva (DV) como negativa (densidad kárstica), actuando junto con el clima (temperatura y precipitación) y la vegetación han permitido la distribución y el desarrollo de 13 grupos diferentes de suelos en el Estado e incluso es posible apreciar varios de ellos en espacios relativamente pequeños.

El proceso de karstificación produce depresiones, los suelos que se forman en ellas son diferentes a los que se desarrollan en los alrededores, al hundirse el terreno se acumulan de materiales y aumenta la disponibilidad de agua, ello favorece el desarrollo más rápido de la vegetación y la acumulación de materia orgánica, influyendo en el tipo y velocidad del proceso pedogenético, por ello es posible encontrar en pequeñas distancias diversidad de suelos.

La acción conjunta de los factores geomorfológicos, edafológicos, climáticos y bióticos a lo largo del tiempo ha permitido el desarrollo de siete ambientes geomorfoedafológicos y once subtipos que reflejan esa geodiversidad y biodiversidad, lo cual confirma que se trata de un sistema dinámico y no estático.

El uso de las nuevas tecnologías ha permitido elaborar mapas digitales que proporcionan información actualizada, reproducible, verificable y relevante en donde los suelos se muestran como elementos dinámicos del paisaje.

Conclusiones Generales

La contaminación, deforestación, erosión, pérdida de la biodiversidad, vulnerabilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria son temas en los que la información edafológica es esencial para elaborar planes y programas de uso, manejo y conservación; sin embargo, esta información ahora se encuentra actualizada y disponible a las escalas grandes y medianas.

La base geomorfoedafológica y el uso de análisis estadísticos facilita la generación de mapas digitales que integran la información de los cinco factores formadores de suelos (roca, relieve, clima, vegetación y tiempo) permitiendo inferir los suelos presentes en un lugar dónde no tenemos información con una certidumbre razonable (83%) a partir de las características y suelos presentes en lugares semejantes.

Las características kársticas, las fallas, los cuerpos de agua y el clima en Quintana Roo han dado origen a una diversidad de ambientes, el buen estado de conservación en que se encuentra la vegetación ha favorecido la creación de 26 áreas naturales protegidas, la principal actividad económica del Estado es el turismo y en menor grado se practican actividades agrícolas y forestales en un territorio que no tiene la monotonía que estudios anteriores a escalas menor reportan.

Quintana Roo es una gran zona kárstica en dónde se combina tanto relieve positivo como negativo, las formas que predominan son negativas (dolinas, úvalas y poljes), el 81% se ubica por debajo de los 50 msnm, las úvalas son las que se encuentran en mayor número y los poljes son los que ocupan mayor superficie. El régimen de inundación que predomina es el extraordinario.

En Quintana Roo hay diferencias altimétricas que han permitido el desarrollo de una geodiversidad (geológica, edafológica, altimétrica e hidrológica) que propicia la diversidad de ambientes. Las alturas se distribuyen en forma de franjas paralelas aumentando a partir de la zona costera hacia el oeste y hacia el sur y es en el extremo suroeste en donde se encuentran los valores máximos.

Hay una estrecha relación entre los componentes geomorfológicos con los componentes hidrológicos y edafológicos que permiten el desarrollo de una alta geodiversidad. La geodiversidad muestra tres grandes áreas: la zona oeste con valores medios y altos, la porción central con valores medios a muy bajos y las zonas costeras con valores medios a muy altos.

La riqueza y diversidad biológica se manifiesta a forma de mosaicos con más de diez clases diferentes, la mayor heterogeneidad se presenta del centro y hacia el sur del Estado. Hay una relación unidireccional entre los componentes geológicos y de relieve con la biodiversidad y una interacción bidireccional de la biodiversidad con los componentes hidrológico y edafológico lo que demuestra que la Geodiversidad está íntimamente relacionada con la biodiversidad a través de la relación sinérgica de los componentes de la primera.

Para el Estado se identificó la presencia de 13 grupos de suelo: Leptosol, Gleysol, Phaeozems, Vertisol, Luvisol, Cambisol, Solonchaks, Histosol, Arenosol, Nitisol, Kastañozems, Regosol, Fluvisol y en algunos sitios se llegan a encontrar hasta cinco de ellos en unas cuantas hectáreas.

En Quintana Roo se presentan siete Ambientes Geomorfoedafológicos con características y dinámica únicas producto de la heterogeneidad geomorfológica, climática, biológica y edafológica:

- AGE Litoral con dos subtipos: erosivo y acumulativo, en el primero se encuentran asociaciones de suelos Arenosoles/Gleysoles/Histosoles y en el segundo predomina Gleysol/Histosol/Regosol/Arenosol.
- AGE palustre subtipo acumulativo con presencia de Gleysoles/Solonchaks/Histosoles/Leptosoles.
- AGE Pseudopalustre con tres subtipos: de planicies subhorizontales y onduladas en donde se desarrollan Gleysoles/Leptosoles/Luvisoles; de planicies onduladas con Gleysoles/Vertisoles/Luvisoles y lomeríos con Vertisol/Gleysol/Phaeozems.
- AGE Tectokarst es el que ocupa la mayor superficie del Estado, se encuentran tres subtipos: de planicies subhorizontales con predominancia de Leptosoles: de planicies acolinadas y lomeríos con asociación de Leptosoles/Gleysoles; de lomeríos y montaña.
- AGE Kárstico con tres subtipos: de planicies subhorizontales los suelos presentes son Leptosol/Cambisol; de planicies onduladas y acolinadas con Leptosol/Gleysol/Phaeozems; de lomeríos con Gleysol/Leptosol/Luvisol
- AGE de Yeso en donde los Phaeozems/Leptosol/Vertisol son los suelos dominantes.
- AGE mixto que puede apreciarse a escalas mayores a 1:50000.

Los procesos kársticos, tectokársticos y la disección vertical son los que explican la mayor parte de la variabilidad ambiental y la presencia de los diversos grupos de suelos.

El grupo de suelo presente en la mayor parte de los ambientes asociado con otros suelos es el Leptosol (48.8%) seguido por el Gleysol, estos dos suelos junto con los Phaeozems ocupan el 75.6% de la superficie estatal.

Esta investigación aporta un marco metodológico novedoso en la caracterización morfométrica del relieve kárstico, en la medida de la geodiversidad y en la caracterización y definición de ambientes geomorfoedafológicos, para ser aplicado en otros lugares y a diferentes escalas de detalle. Proporciona una visión integral del territorio, convirtiéndose en un insumo importante para la planeación y definición de estrategias de uso y manejo del suelo en función de la vocación específica de cada ambiente y para la toma de decisiones en el Estado.

Para dar respuesta a las preguntas de investigación se elaboraron como productos finales de los análisis planteados en los objetivos específicos las Figuras: 2.6 Fallas y densidad de fallas, 3.4 Distribución de depresiones kársticas en el estado de Quintana Roo, Figura 2 del

apéndice Geodiversidad, Figura 4.9 Geodiversidad y Áreas Naturales Protegidas de Quintana Roo, Figura 5.4 Grupos de suelo asociados en Quintana Roo y el Mapa de ambientes geomorfoedafológicos. Con los análisis elaborados y los productos obtenidos se ha cumplido el objetivo de la investigación.

Como toda investigación y todo trabajo aún quedan preguntas por resolver y trabajo por hacer, entre ellas pueden considerarse:

- Afinar las técnicas geomorfométricas para eliminar artefactos que aparecen por la misma técnica o por la calidad de los datos.
- Incorporar mayor cantidad de datos de suelos, en especial en aquellas áreas en donde son pocos o no hay, que permitan reducir la incertidumbre.
- Trabajar en los procesos de generalización y de atribución a través del uso de diversas técnicas estadísticas.
- Trabajar a escalas de mayor detalle que permitan caracterizar mejor el lugar para entender mejor los procesos que ahí se están desarrollando como el caso de los ambientes mixtos

APÉNDICE

GEODIVERSITY OF A TROPICAL KARST ZONE IN SOUTHEAST MEXICO³

Abstract

The Yucatan Peninsula in southeastern Mexico is the largest karstic area of the country; however, there are just a few studies on the geodiversity for the region. The objective of this study is the identification and qualification of the diversity of elements of the relief, considering geomorphology, geology, hydrology and soil properties as components of the geodiversity. To calculate the geodiversity, a simple additive model of thematic diversity was used, according to the methodology of Jačkova and Romportl.

The geodiversity in the east of the Yucatan Peninsula manifests as a north to south banding. The coastal portion presents values ranging from medium to very high, in the central portion it ranges from medium to very low and in the western portion, where the oldest geological formations are have high and very high values.

Introduction

The term geodiversity was first used in 1993 to describe the variety of nature not alive (highlighted, soils, climate, water bodies and rock). Gray (2008b) defines the term geodiversity as the natural diversity of traits of geological, geomorphological and soils, including their relationships, properties, interpretations and systems. In recent years at the international level this concept has gained acceptance in a large number of countries as a new paradigm geological (Gray, 2008a).

The methods for the evaluation and assessment of geodiversity are still rare; some seek to establish objective indicators through qualitative or quantitative scales with the use of various models and indexes. Some of the techniques have been derived from their equivalents for the study of biodiversity (Ibanez and Garcia 2002; Serrano and Ruiz 2007; Benito *et al.* 2009; Cantú *et al.* 2004; Zwolinski and Stachowiak 2012; Xavier-da-Silva and Carvalho 2004; Pike 2000)

In Mexico, there are no studies on the geodiversity of one of the most extensive karst massifs of the country as is the Yucatan Peninsula. However, there are some descriptions of its geology and geomorphology at medium and small scales that reported a relative homogeneity of the area (Lugo *et al.*, 1992; Bautista *et al.*, 2011).

³ Capítulo de libro publicado en: Frago-Servón, P., Pereira, A., Frausto, O., Bautista, F., 2015. Geodiversity of a Tropical Karst Zone in South-East Mexico. In B. Andreo *et al.*, eds. *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Environmental Earth Sciences. Springer Berlin Heidelberg, pp. 609–618. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-17435-3_68.

The objective of this study is the identification and qualification of the diversity of elements of the relief, geological, hydrological and soil as components of the geodiversity of the east of the Yucatan Peninsula on the basis of a zoning derived from the relative heights of geofoms and publicly available information according to the methodology of Jačkova and Romportl (2008).

Study area

The Yucatan Peninsula in the southeast of the country is a large karstic platform in whose east portion is located the area of study, between 17 ° 49' and 21 ° 36' north latitude and 86° 44' and 89 ° 24 ' 52" west longitude. The altitude of the area ranges from 0 meters in the coastal area to the east and north up to a maximum altitude of 380 meters above sea level in the southwest.

The dominant climate is the subtype warm humid with rainfall in summer (INEGI 2005). The high amount of precipitation and the high capacity of infiltration cause the greatest amount water, (near the 80%) to move to basement level and the remaining 20% is distributed between what the vegetation intercepts, surface runoff and the direct recruitment of the water bodies: flood zones, lagoons and cenotes (UQRoo, 2004a) . The reduced topographic slope contributes to that the surface runoffs are few, low-flow and very short-stroke.

Materials and methods

For the present work we use the wealth of attributes per unit of study, the units were defined by the analysis of the relative heights of terrain formations, we used the 80 topographic charts of the INEGI (2005b) covering the area of study in vector format. From the synthetic chart was built a Digital Elevation Model (DEM) by interpolation in raster format; with horizontal resolution 1:50000 and vertical resolution of 10 m (Chen and Yue 2010; Yue *et al.* 2007; Takagi y Shibasaki 1996). This DEM was used to make the measurement of the relative heights of the land formations with the technique proposed by (Á. Priego *et al.*, 2010). The resulting representation in m/km² was used to build a zoning of the territory as a base for the allocation of the various attributes. To calculate the geodiversity we used an additive model for the categories of thematic diversity considering four aspects related to the heterogeneity of the field: Geology, relief, soils and Hydrology according to the methodology of Jačkova and Romportl (2008).

Geology was simplified to the count of the different geological structures that are reported within each of the areas defined based on the relief. Pedological diversity was processed in a similar way, using the primary groups of soil or of greater dominance as identifiers. The diversity of the relief was defined based on an analysis of the relative heights of the land formations for each unit. The hydrography was worked out on the basis of the existing records in the cartography of the INEGI (2005b) bodies of water and depressions with permanent flood; the hierarchy was based on the types and number of bodies of water or depressions flooded by each of the areas defined by the relief.

The richness for each of the above components are divided into five classes one being the lowest that represents the less diverse and five the highest (Table 1).

The total Geodiversity (G) was calculated by adding the geologic (Dg), pedological (Ds), hydrological (Dh) and relief (Dr) diversities.

The full range of geodiversities was divided into five classes with the Jenks algorithm (Jenks, 1977), which generates the classification shown in Table 1. All the processes of identification, quantification or attribute mapping was carried out in a geographic information system managed with ArcGIS® 9.3.

Table 1. Categorizations of the diversity of attributes of the territory (thematic diversity).

Category	Score	Attribute
Geology		
Very High	5	More than 4 geological formations in the unit
High	4	4 Geological formations in the unit
Media	3	3 Geological formations in the unit
Low	2	2 Geological formations in the unit
Very Low	1	1 Geological formation in the unit
Pedology		
Very High	5	8-9 Groups of soil in the unit
High	4	6-7 Groups of soil in the unit
Media	3	4-5 Groups of soil in the unit
Low	2	2-3 Groups of soil in the unit
Very Low	1	1 Group of soil in the unit
Relative Height		
Very High	5	Relative Height of 60 to 250 m/km ²
High	4	Relative Height of 30 to 60 m/km ²
Media	3	Relative Height of 15 to 30 m/km ²
Low	2	Relative Height of 2.5 to 15 m/km ²
Very Low	1	Relative Height < 2.5 m/km ²
Hydrology		
Very High	5	More than 4 types of body of water in the unit
High	4	4 Types of body of water in the unit
Media	3	3 Types of body of water in the unit
Low	2	2 Types of body of water in the unit
Very Low	1	0 - 1 type of body of water in the unit

Geological Diversity

In the northern portion, that of lower height (Figure 1A) there is a low geological diversity, this large area is limited to the coast by a strip that goes from 1000 to 1500 m wide at its southern part up to 20 km in the northern part, here proliferate deposits of the Quaternary. The areas that have very high and high diversities are mostly located in the southern and western parts, at the oldest geological formations corresponding to different ages of the tertiary period, these are combined with deposits of the quaternary mainly fluvial and lacustrine in the valleys and lower parts of the basins (UQRoo, 2004a). In coastal areas

there is a great mix of spaces with deposits of the quaternary like eolic, coastal, lake and swamp deposits; mix that generates high values of geologic diversity.

Pedological Diversity

In the area, 12 soil groups are present; the figure 1B shows the zones with the five categories of diversity, it stresses the central-west and south with values high and very high. In these spaces, the dominance of the Leptosols is offset with interleaving surfaces of Gleysols, Luvisols, Phaeozems and Vertisols. These areas coincide with that in which the altimetric diversities, geological and hydrological are medium and high. However, Gleysols are slightly concentrated in the lower portions of the structures where the altimetric diversity decreases toward plains with undulations and gullies. The other set of spaces that expresses a very high diversity of soils is associated with water bodies in the south-southeast of the State and its system of effluents that branches off to the coast. There are two areas with low diversity of soils in the center and a little more north in the study area.

Diversity of relative heights

In Figure 1C can be seen the diversity of relative heights for the study area, it is apparent that it is distributed in the form of parallel strips from the coastal area with very low energy (category 1); increasing toward the west and south to the extreme southwest the highest values were recorded. The intermediate transitional area range from medium to high, there are alternating spaces of low, medium and even high diversity coexisting. Excels in this distribution a series of narrow stripes that correspond to small spaces in which the combination of landforms increases the geodiversity and highlight areas of transition between those with relatively homogeneous diversity.

Diversity of the surface hydrology

About the surface water bodies Figure 1D show that near 50% of the territory is located within the categories of high and very high diversity. Such areas are distributed mainly in the west, central, northern and in some coastal areas, in these there is an abundance of water bodies characteristic of karst areas such as the so-called cenotes and lagoons, the vast majority of which are connected to the groundwater table. In the central part of the State and to the north, in the plains are large areas with low diversities, matching with geologic formations from the tertiary barely altered and with areas of permanent or semi-permanent floods such those found west of the bays.

Geodiversity

The geodiversity of east portion of the Peninsula shows three large areas (Figure 2). The first of them, the region with the greatest geodiversity in the western portion, is the oldest geological area of the State; here the relief with elevations over the 70 meters above sea level promotes the formation of areas of erosion and accumulation that allow the development of several floors, accumulation areas and runoff of water.

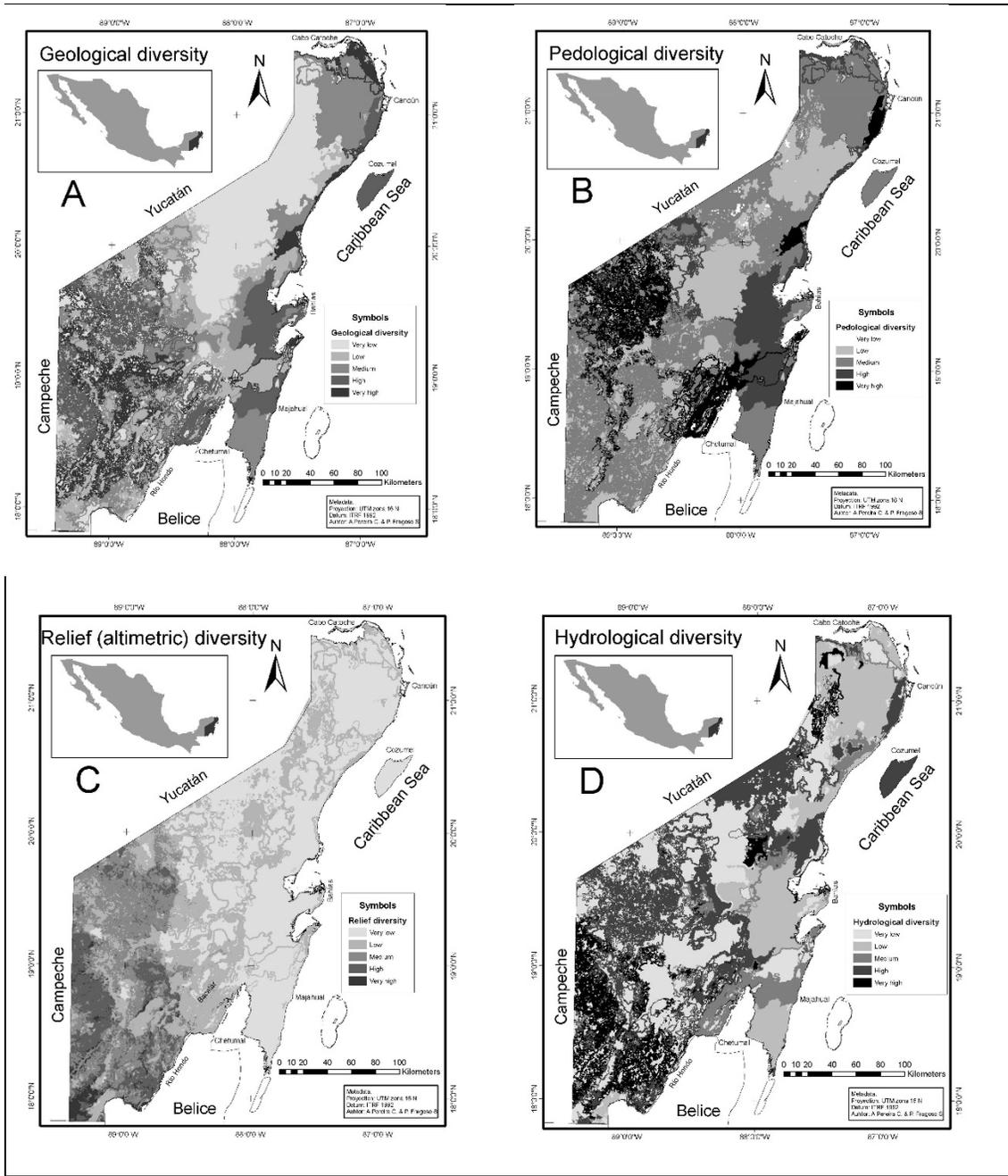


Figure 1. Geological diversity, pedological, and hydrological altimetric of Quintana Roo.

A. Geologic diversity based on number of types of surface materials by ages. B. Pedological diversity based on number of types of soil per unit. C. Altimetric diversity or energy of the relief on the basis of the relative heights of the forms of terrain. D. Hydrological diversity based on number and type of water bodies and depressions with permanent flood

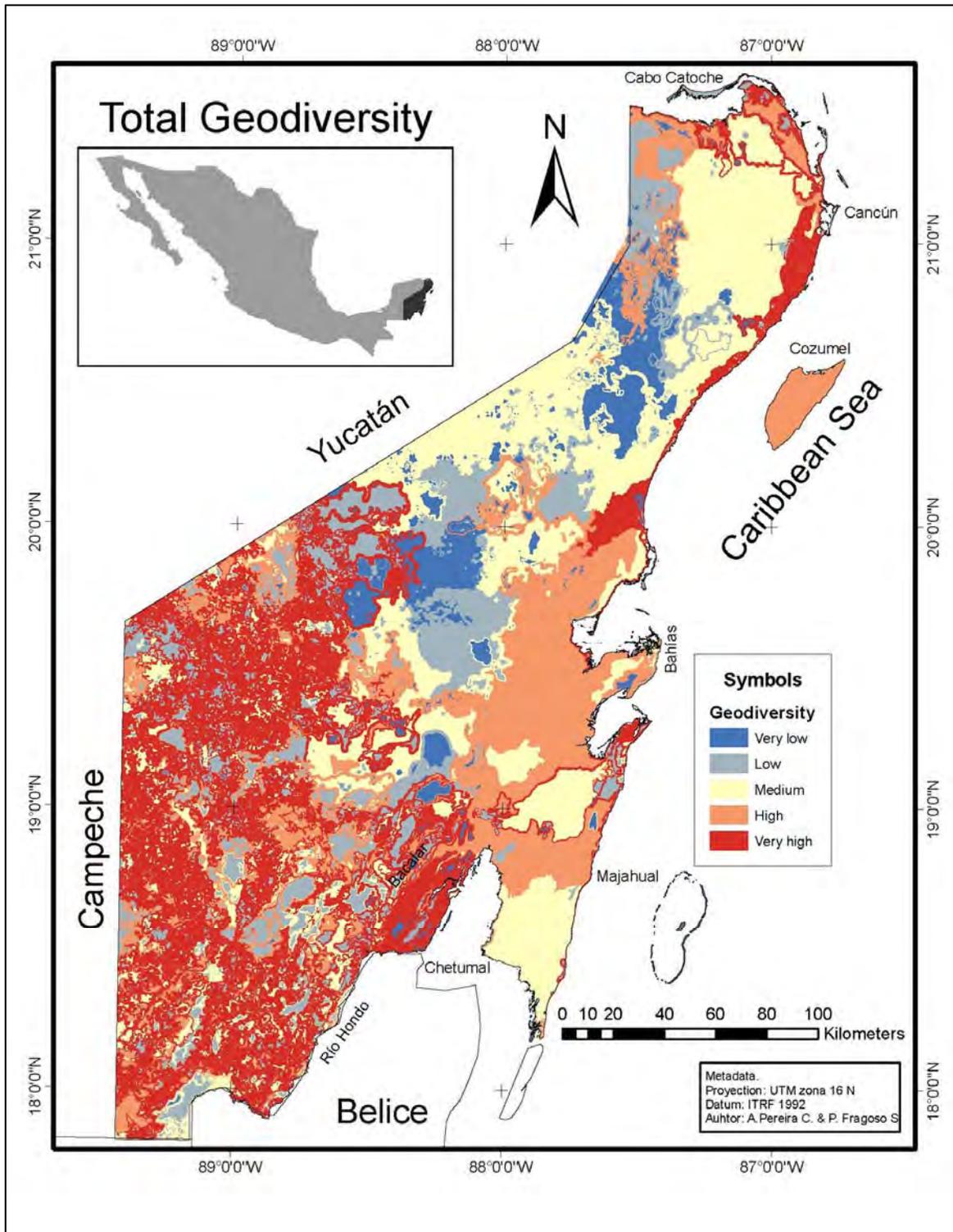


Figure 2. Geodiversity of Quintana Roo in accordance with the model $G=Dg+of+Dr+Dh$.

This distribution emphasizes the area west and south of the State where there are discontinuous spaces in which the dominance of geodiversities is high and very high. Some valleys with medium geodiversities and intermountain plains which geodiversity is low, due to the existence of strong discontinuities in the local groups both from the point of view of the morphometric, geological, hydrological and Pedological attribute.

The intermediate zone between the area of altitude higher to 70 meters above sea level and that with less than 20 meters above sea level presents values of geodiversity from low to very low. This homogeneous zone is located on the geological formation of the Pliocene, sufficiently far away from the coast to do not have a strong influence on her and with a gradient such that it will allow the water to drip and does not accumulate and thus there is no such an abundance of water bodies exposed.

The area to the east, in spite of being the area with the smaller heights, is an area where again there is geodiversity medium to very high. In this area, there are a large number of bodies of water formed by the dissolution of the limestone rock and the shallow depth of the groundwater table. The same dissolution of the rock allows the formation of negative forms of stress in which the accumulation of materials enables the development of the soils with differentiated characteristics making it an area rich in alluvial and lacustrine deposits. In areas close to the coast lacustrine deposits, swamp and coastal environments develop the transition sea-land as the wetland areas where there are soils and characteristic vegetation, all this contributes to high geodiversity of the area of lower height.

Discussion

The use of the term geodiversity is increasing every day, but the methodologies for evaluation and assessment are still limited, so far, most of the studies use qualitative methods in which the delimitation of the geomorphological units and the inventory of the components of the geodiversity (geology, soils, relief and hydrology) are the starting point for analysis.

The energy of the karstic Yucatan Peninsula relief is scarce when compared with other areas of the country or the world, in which the volcanic formations generated structures and wildest landscapes. However, on the one hand they are not comparing two objects of the same nature, the Peninsula is a large deposit of sedimentary platform character and on the other hand, the comparisons are made in terms of classification criteria for national or continental scales, not to regional scales.

The work of description of the geodiversity of the Polish Carpathians considered that a structure with more than 50 m of relative height is of very high geodiversity Zwolinski (2010). In the present work, this value is defined as high geodiversity because in the area we find recognizable landforms with heights of more than 100 m.

The techniques employed were efficient to handle the attributes used. The morphometric technique used succeeded to highlight both, strong changes in the geological formations, as small variations within them despite the low energy of the relief.

The results obtained allow us to ensure that a study with detailed information could provide important insight about the spatial distribution of biological diversity. Also for the identification of areas of high species richness; for the design of protected natural areas; or definition of conservation strategies; (Priego *et al.* 2003; Parks and Mulligan 2010); and for the identification of environmental or ecosystem services (Gray, 2011). Such detailed information could allow the use of more advanced diversity indexes, among other techniques to define geodiversity.

These results clearly show that the geodiversity fosters diversity of environments; however, to the extent that we know the details of the highlighted attributes at larger scales can foster our knowledge and understanding of the great diversity of environments in the karst of the portion east of the Yucatan Peninsula. For this reason, it is necessary to ensure the completion of studies in detail to enable the recognition, identification and registration of the geodiversity that translates into environmental heterogeneity and diversity of species.

Conclusions

In the east portion of the Yucatan Peninsula, there are differences other than altimetric ones that have allowed the development of a wide range of geodiversity.

The methodology of Jačkova and Romportl (2008) Used in the present study as a model of simple additive categories of thematic diversity works for the karst features in the area.

Despite the fact that richness counts were useful to estimate geodiversities, more quantitative approaches will give more precise results and a deeper insight of the phenomenon with the same traits like geology, soil types, altimetric units and hydrology as it was defined by Gray (2008b) and Kozłowski (Marshal (2004).

This work is the first for the area in which it was reported the altitudinal floors zoning to substantiate that the apparent homogeneity of the relief is not such and to support that in such large karst plains there is a wide diversity of environments product of the morphometric and structural heterogeneity of the territory.

There are areas with very high to very low geodiversity in well-defined spaces and major contributors whose attributes are equally well defined. We identified three major areas: the area to the west with values of geodiversity medium to very high, an intermediate zone in the central part in where the values of geodiversity range from medium to very low, and a third area, in the part of lower height and toward the coastal zone where the geodiversity has medium to very high values.

References

- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135, 308–321.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Magri, O., Meza, P. 2009. Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1433–1445.
- Cantú, C., Gerald Wright, R., Michael Scott, J., Strand, E. 2004. Assessment of current and proposed nature reserves of Mexico based on their capacity to protect geophysical features and biodiversity. *Biological Conservation* 115, 411–417.
- Chen, C., Yue, T. 2010. A method of DEM construction and related error analysis. *Computers & Geosciences* 36, 717–725.
- Gray, M. 2008a. Geodiversity: developing the paradigm. *Proceedings of the Geologists' Association* 119, 287–298.
- Gray, M. 2008b. Geoheritage 1. Geodiversity: a new paradigm for valuing and conserving geoheritage. *Geoscience Canada* 35.
- Gray, M. 2011. Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation* 38, 271–274.
- Ibáñez, J.J., García, A. 2002. Diversidad: biodiversidad edáfica y geodiversidad. *Edafología* 9, 329–385.
- INEGI. 2008a. Carta de Climas para la República Mexicana, 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2005. Cartas Topográficas, 1:50000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- Jačková, K., Romportl, D. 2008. The relationship between geodiversity and habitat richness in Šumava national park and Křivoklátsko Pla (Czech Republic): a quantitative analysis approach. *Journal of Landscape Ecology* 1, 23–38.
- Jenks, G. 1977. Optimal data classification for choropleth maps. University of Kansas Dept of Geography.
- Kozłowski, S. 2004. Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. *Przegląd Geologiczny* Vol. 52, 833–83.
- Lugo, J., Aceves, J., Espinasa, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología. UNAM* 101, 143–150.
- Parks, K.E., Mulligan, M. 2010. On the relationship between a resource based measure of geodiversity and broad scale biodiversity patterns. *Biodiversity and Conservation* 19, 2751–2766.
- Pike, R.J., 2000. Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24, 1–20.
- Priego, Á., Bocco, G., Mendoza, M.E., Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes, 1st Ed, Planeación Territorial. SEMARNAT/INE/CIGA-UNAM, México, D.F.
- Priego, Á., Moreno, P., Palacio, J.L., López, J., Geissert, D. 2003. Relación entre la heterogeneidad del paisaje y la riqueza de especies de flora en cuencas costeras del estado de Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*.
- Serrano Cañadas, E., Ruiz Flaño, P. 2007. Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial: el caso de Tierras Caracena (Soria). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 79–98.
- Takagi, M., Shibasaki, R. 1996. An interpolation method for continental DEM generation using small scale contour maps. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 31, 847–852.
- UQRoo. 2004. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo - SEMARNAT - SEDUMA, México.
- Xavier-da-Silva, J., de Carvalho-Filho, L.M. 2004. Geodiversity: Some simple geoprocessing indicators to support environmental biodiversity studies. *Directions Magazine* 1–4.
- Yue, T. X., Du, Z. P., Song, D.J., Gong, Y. 2007. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology* 91, 161–172.

- Zwoliński, Z. 2010. The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. *Landform Analysis* 11, 77–85.
- Zwoliński, Z. Stachowiak, J., 2012. Geodiversity map of the Tatra National Park for geotourism. *Quaestiones Geographicae* 31, 99–107.

Bibliografía

- Aguilar, Y. 2014. Modelo conceptual y cartográfico de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas en karst tropical, con un enfoque geopedológico y uso de árboles de decisión. Tesis Doctoral. Centro de Investigación en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aguilar, Y., Mendoza, M., Frausto, O., Bollo, M., Bautista, F. 2010a. Spatial distribution of karstic depressions in tropical karst plains. Presentado en la Reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana, Geos, México, pp. 115–116.
- Aguirre, A., Bezaury, H., de la Cueva, H., Mach, I., Peters, E., Rojas, S., Santos, K. (Compiladores). 2010. Islas de México, un recurso estratégico. Instituto Nacional de Ecología, The Natural Conservancy, Grupo de Ecología y Conservación de Islas, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México.
- Allen, P.A., Allen, J.R. 2013. Basin analysis: principles and application to petroleum play assessment. John Wiley & Sons.
- Barea, J. 1995. Geología del karst desde el punto de vista del espeleólogo. Boletín espeleológico SECJA 1, 46–52.
- Bautista, F., Aguilar, Y., Rivas, H., Paez, R. 2007a. Los suelos del estado de Yucatán. En: Importancia del binomio suelo-materia orgánica en el desarrollo sostenible. Martínez M, Cabañas D editores. Agencia Española de Cooperación Internacional y el Centro de Edafología y Biología Aplicada de Segura de Murcia, España 13–42.
- Bautista, F., Batllori, E., Ortiz, M., Palacio, G., Castillo, M. 2005a. Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México 33–58.
- Bautista, F., Díaz, S., Castillo, M., Zinck, J.A. 2005b. Spatial heterogeneity of the soil cover in the Yucatan Karst: Comparison of Mayan, WRB, and Numerical Classifications. Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie 38, S81.
- Bautista, F., Estrada, H., Jiménez, J.J., González, J.A. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. Terra Latinoamericana 22, 243–254.
- Bautista, F., Jiménez, J., Navarro, J., Manu, A., Lozano, R. 2003a. Microrrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. Terra 21, 1–11.
- Bautista, F., Palacio, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. Geomorphology 135, 308–321.
- Bautista, F., Palacio, G. 2005. Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche : Universidad Autónoma de Yucatán : Instituto Nacional de Ecología, Campeche; Yucatán, México.
- Bautista, F., Palacio, G., Carmona, E., Páez, R., Cantarel, W., Tello, H. 2007b. Distribución espacial y temporal de los paisajes edáficos de la Península de Yucatán. Presentado en Memorias del XVII Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo, México.
- Bautista, F., Sampedro, E., Pérez, M., Aponte, G., González, M. 2003b. Geoformas, agua y suelo en la Península de Yucatán. Naturaleza y Sociedad en el área Maya. Pasado, presente y futuro, Academia Mexicana de Ciencias, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, México 21–35.
- Bautista, F., Zinck, J.A. 2010. Construction of an Yucatec Maya soil classification and comparison with the WRB framework. Journal of ethnobiology and ethnomedicine 6, 4269–6.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar-Briones, E., Torres-Talamante, O. 2007. Los cenotes de la península de Yucatán. Arqueología mexicana 14, 32–35.
- Behrens, T., Scholten, T. 2006. Digital soil mapping in Germany—a review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 169, 434–443.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Magri, O., Meza, P. 2009. Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. Earth Surface Processes and Landforms 34, 1433–1445.

- Berg, M. van den, Oliveira, J.B. 2000. Variability of apparently homogeneous soils in São Paulo State, Brazil: I. Spatial analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 24, 377–391.
- Bertalanffy, L. 1976. Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones. Fondo de Cultura Económica, México.
- Blair, R.W. 1986. Karst landforms and lakes. *Geomorphology from space: A global overview of regional landforms*. NASA Special Publication, SP-486, Washington DC 402–446.
- Blyth, H., De Freitas, H. 1998. *Geología para ingenieros*, Cuarta. ed. CECSA.
- Bocco, G., Mendoza, M.E., Velázquez, A., Torres, A., Torres, M.A. 1996. Regionalización ecológica del estado de Michoacán. Informe Técnico. DERN. Morelia, Michoacán.
- Bocco, G., Mendoza, M., Velázquez A. 2001. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping - A tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology* 39 (3-4): 211 - 219.
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, Á., Burgos, A. 2009. La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Instituto Nacional de Ecología: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, México, D.F.
- Bocco, G., Santander, A.G.P., Avalos, H.C. 2005. La geografía física y el ordenamiento ecológico del territorio. Experiencias en México. *Gaceta ecológica* 23–34.
- Bonet, F., Butterlin, J. 1962. Stratigraphy of the Northern Part of the Yucatan Peninsula. *New Orleans Geological Society* 52–57.
- Bosák, P. 2008. Karst processes and time. *Geologos* 14, 15–36.
- Bruno, D.E., Calcaterra, D., Parise, M. 2008. Historical instability and recent slope evolution of the Ilice Torrent catchment, Calabria, Italy. *Physical Geography* 29, 179–194.
- Burnett, M.R., August, P.V., Brown, J.H., Jr, Killingbeck, K.T. 1998. The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity I. A Patch-Scale Perspective. *Conservation Biology* 12, 363–370.
- Butterlin, J., Bonet, F. 1963. Mapas geológicos de la Península de Yucatán. Talleres Gráficos de la Nación.
- Cabrera, E., Sánchez, A. 1994. Comunidades vegetales en la frontera México Belice. In: *Estudio Integral de La Frontera México Belice, Recursos Naturales*. Centro de investigaciones de Quintana Roo, México, pp. 17–35.
- Cantú, C., Wright, R., Scott, J., Strand, E. 2004. Assessment of current and proposed nature reserves of Mexico based on their capacity to protect geophysical features and biodiversity. *Biological Conservation* 115, 411–417.
- Carcavilla, L., Durán, J.J., López-Martínez, J. 2008. Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico. *Geo-Temas* 10, 1299–1303.
- Cervantes, Y., Cornejo, S., Lucero, R., Espinosa, J., Miranda, E., Pineda, A. 1990. Atlas Nacional de México volumen II. Instituto de Geografía, UNAM.
- Chávez, G. 1996. Geomorfología de la Cuenca del Río Tijuana aplicada al análisis de uso de suelo a nivel regional. Tesis Maestría en Ciencias (Geología). División de Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. México.
- Chen, C., Yue, T. 2010. A method of DEM construction and related error analysis. *Computers & Geosciences* 36, 717–725.
- Chiappy, C., Gama, L., Giddings, L., Rico, V., Velázquez, A. 2000. Caracterización de los paisajes terrestres actuales de la península de Yucatán. *Investigaciones Geográficas (Mx)* 28–39.
- Chiles, J.P., Delfiner, P. 1999. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Wiley Interscience, New York.
- CNA. 2012. Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua [WWW Documento]. URL <http://smn.cna.gob.mx/> (acceso 1.10.14).
- COESPO. 2011. Anuario estadístico de población. Comisión Estatal de Población. Gobierno del Estado de Quintana Roo, México.
- Coke, J. 2004. Geography of caves in Quintana Roo. *Association for Mexican Cave Studies Activities Newsletter* 27, 93–97.
- CONAFOR. 2009. Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009 (Reporte técnico). Comisión Nacional Forestal, México.

- CONAFOR-SEMARNAT. 2011. Inventario Forestal Nacional. Comisión Nacional Forestal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- CONABIO. 1995. Atlas de Reservas de la Biosfera y otras áreas naturales protegidas. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP.
- Cotler, H. 2003. El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta ecológica* 33–42.
- Cotler, H., López, C., Martínez, S. 2011. ¿Cuánto nos cuesta la erosión de los suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos en México. *Investigación ambiental* 3(2) 31-43
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L.M., Sommer, I., Carmona, E. 2008. Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones geográficas* 81–104.
- De Matauco, A. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la AGEN* ° 38, 311–329.
- Denizman, C. 2003. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies* 65, 29–35.
- De Pedraza, G.J. 1996. Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones. Rueda, España.
- De Waele, J., Gutiérrez, F., Parise, M., Plan, L. 2011. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. *Geomorphology* 134, 1–8.
- Ek, A. 2011. Vegetación. In: Pozo, C., Armijo, N., Calmé, S. (Eds.), *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un Análisis Para Su Conservación*. 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.
- Escalante, T., Cordero, V.S., Morrone, J.J., Linaje, M. 2007a. Áreas de endemismo de mamíferos terrestres de México: un caso de estudio usando modelos de nicho ecológico, análisis de Parsimonio de endemismos y ajustes de goloboff. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América* 32, 151–159.
- Escalante, T., Szumik, C., Morrone, J.J. 2007b. Áreas de endemismos de los mamíferos de México: Reanálisis y comparación con estudios previos. *Darwiniana* 45, 41–43.
- Escobar, A. 1990. Geografía general del Estado de Quintana Roo. Gobierno del estado de Quintana Roo. Fondo de fomento editorial.
- Espinasa, P.R. 1990. Carso. In: *Atlas Nacional de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Espinosa, R. 2005. Morfoedafogénesis: un concepto renovado en el estudio del paisaje. *Ciencia Ergo Sum* 12, 162–166.
- Flores, G., Rivas, D. 2000. Tipos de vegetación en México.
- Fonseca, I.L. 2010. Modelação de formas de relevo para aplicação à cartografia de solos. Presented at the V Congresso Nacional de Geomorfologia, Porto, Portugal.
- Ford, C., Williams, P. 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Frank, E., Witten, I.H. 1998. Generating Accurate Rule Sets Without Global Optimization. Morgan Kaufmann, pp. 144–151.
- Frausto, O., Ihl, T. 2008. Capítulo 2. Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. In: *Estudio Geohidrológico Del Norte de Quintana Roo*, México. pp. 41–54.
- Frausto, O., Ihl, T., Giese, S., Cervantes, A., Gutiérrez, M. 2010. Vulnerabilidad a la inundación en las formas exocársticas del noreste de la Península de Yucatán. VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física Universidad de Coimbra. Portugal, p.16
- Frausto, O., Ihl, T., López, J.R., Goldacker, S., Chale, G., Giese, S., Wurl, J., Careaga, P., Bacab, R. 2006. Áreas susceptibles de riesgo en localidades de pobreza extrema en el sur de Yucatán. *Teoría y Praxis* 87–103.
- Frelüh, M. 2003. Geomorphology of Karst Depressions: Polje or Uvala—a Case Study of Luèki Dol. *Acta carsologica* 32, 2.
- Frisia, S., Borsato, A. 2010. Karst. *Developments in sedimentology* 61, 269–318.
- Gaines, B.R., Compton, P. 1995. Induction of Ripple-Down Rules Applied to Modeling Large Databases. Ed. Engineering Research Council of Canada. Canada.

- Gómez, N., Escalante, T., Rodríguez, G., Linaje, M., Morrone, J.J. 2012. Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mastofauna. *Revista mexicana de biodiversidad* 83, 258–272.
- Gaona, S.T., de Anda, G., Villasuso, M. 1980. Cenotes, karst característico: mecanismo de formación. *Inst. Geol. Rev* 4, 32–36.
- Gao, Y., Alexander, E.C., Barnes, R.J. 2005. Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. *Environmental Geology* 47, 1083–1098.
- Gao, Y., Zhou, W. 2008. Advances and challenges of GIS and DBMS applications in karst. *Environmental Geology* 54, 901–904.
- García, E. 1983. Apuntes de climatología, tercera. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, G., Padilla, J., Salazar, E. 2000. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico del estado de Quintana Roo. In: Vester, F.M.H. (Ed.), *Influencias de Huracanes En El Paisaje de Yucatán Consideraciones Para El Diseño de Corredores Biológicos Y Su Monitoreo*. Reporte de trabajo, CICY, UQROO, UNAM, ECOSUR, pp. 32–53.
- Gessler, P.E., Moore, I.D., McKenzie, N.J., Ryan, P.J. 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems* 9, 421–432.
- Goldacker, S., Frausto, O. 2005. Identification of areas at risk of flooding in the south de Yucatan peninsula, Mexico. Presentado en *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*, UACH, México, pp. 483–496.
- Goldscheider, N., Drew, D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*, 26. Psychology Press.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford university press.
- Gray, M. 2008a. Geodiversity: developing the paradigm. *Proceedings of the Geologists' Association* 119, 287–298.
- Gray, M. 2008b. Geoheritage 1. Geodiversity: a new paradigm for valuing and conserving geoheritage. *Geoscience Canada* 35.
- Gray, M. 2011. Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation* 38, 271–274.
- Gupta, A. 2011. *Tropical geomorphology*. Cambridge University Press.
- Gutiérrez, M. 2008. *Geomorfología*. Pearson/Prentice Hall, Madrid.
- Gutierrez, C., Ortiz, J., Flores, J., Zamora, P., Domínguez, M., Villegas, P. 2011. Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia de Nohalal- Sudzal Chico, Tekax, Yucatán, México. *Floresta Veracruzana* 13, 7–14.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., Black, W. 2007. *Análisis multivariante*, 5th ed. Prentice Hall, Madrid.
- Halkidi, M., Batistakis, Y., Vazirgiannis, M. 2002. Clustering validity checking methods: part II. *ACM Sigmod Record* 31, 19–27.
- Hartemink, A.E., Hempel, J., Lagacherie, P., McBratney, A., McKenzie, N., MacMillan, R.A., Minasny, B., Montanarella, L., de Mendonça Santos, M.L., Sanchez, P. 2010. A New Digital Soil Map of the World. In: *Digital Soil Mapping*. Springer, pp. 423–428.
- Hartemink, A.E., Krasilnikov, P., Bockheim, J.G. 2013. Soil maps of the world. *Geoderma* 207–208, 256–267.
- Hartemink, A.E., McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M. de L. 2008. *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer Science & Business Media.
- Havens, T.C., Bezdek, J.C., Keller, J.M., Popescu, M. 2008. Dunn's cluster validity index as a contrast measure of VAT images, in: *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008*. 19th International Conference on. IEEE, pp. 1–4.
- Hennemann, G.R., Nagelhout, A. 2004. Searching for effective, low-cost methods to detect and assess wind erosion damage: the promise of small-format aerial photography (SFAP). *Wind Erosion and Dust Dynamics: Observations, Simulations, Modelling* 123.
- Héraud-Piña, M. 1996. *Le Karst du Yucatan: Pays des Mayas*. Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux.
- Huang, H. 2007. *Geomorphologic investigations on karst terrain: A gis-assisted case study on the island of Barbados*. McGill University.

- HU, X.Y. 2013. Application of Visible/Near-Infrared Spectra in Modeling of Soil Total Phosphorus. *Pedosphere* 23, 417–421.
- Ibáñez, J.J., García, A. 2002. Diversidad: biodiversidad edáfica y geodiversidad. *Edafología* 9, 329–385.
- Ibarra, G., Villaseñor, J.L., Duran, R. 1996. Riqueza de especies y endemismo del componente arbóreo de la Península de Yucatán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 57, 49–77.
- IDEAM. 2011. Metodología para la elaboración del mapa de ecosistemas escala 1:100000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. https://www.siac.gov.co/documentos/Metodologia_constru_mapa_ecosistemas_síntesis.doc
- Ihl, T., Frausto, O., Rojas, J., Giese, S., Goldacker, S., Bautista, F, Bocco, G. 2007. Identification of geodisasters in the state of Yucatán, Mexico. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen* 246, 299–311.
- INEGI. 2000a. Cartas Geológicas 1:250000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2000b. Diccionario de datos fisiográficos 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2002. Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2005. Cartas Topográficas, 1:50000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2008a. Carta de Climas para la República Mexicana, 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2008b. Cartas Edafológicas serie II, 1:250000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2009. Cartas De Uso del Suelo y Vegetación serie IV, 1:250000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2011. México en Cifras [WWW Documento]. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. URL <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=23> (acceso 1.10.14).
- IUSS, Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jačková, K., Romportl, D. 2008. The relationship between geodiversity and habitat richness in Šumava national park and Křivoklátsko Pla (Czech Republic): a quantitative analysis approach. *Journal of Landscape Ecology* 1, 23–38.
- Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de geografía* 19, 41–68.
- Jenks, G. 1977. Optimal data classification for choropleth maps. University of Kansas Dept of Geography.
- Jenks, G. 1967. The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography* 7, 186–190.
- Jiang, B., Liu, X. 2012. Scaling of geographic space from the perspective of city and field blocks and using volunteered geographic information. *International Journal of Geographical Information Science* 26, 215–229.
- Jiménez, R. 2013. Clasificación y caracterización de los suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico (Maestría en Ciencias). Colegio de Posgraduados, Cárdenas, Tabasco.
- Jongman, R.H., Ter Braak, C.J., Van Tongeren, O.F. 1995. *Data analysis in community and landscape ecology*. Cambridge university press.
- Kohavi, R. 1995. The Power of Decision Tables, in: *Proceedings of the European Conference on Machine Learning*. Springer Verlag, pp. 174–189.
- Kozłowski, S. 2004. Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. *Przegląd Geologiczny Vol. 52*, 833–83.
- Krasilnikov, P., Reyna, T. 2007. La regionalización edáfica del territorio de México. Presentado en *Memorias Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo*, México.
- Kueny, J.A., Day, M.J. 2002. Designation of protected karstlands in Central America: a regional assessment. *Journal of Cave and Karst Studies* 64, 165–174.

- Kusky, T.M. 2009. Encyclopedia of earth science. Infobase Publishing.
- Lagacherie, P. 2008. Digital soil mapping: A state of the art. In: Digital Soil Mapping with Limited Data. Springer, pp. 3–14.
- Lagacherie, P., Sneep, A.-R., Gomez, C., Bacha, S., Coulouma, G., Hamrouni, M.H., Mekki, I. 2013. Combining Vis–NIR hyperspectral imagery and legacy measured soil profiles to map subsurface soil properties in a Mediterranean area (Cap-Bon, Tunisia). *Geoderma* 209–210, 168–176.
- Lazcano, C. 1985. The deep cenotes: Association for mexican cave studies. *Activitates newsletter* 15, 70–75.
- Leyva, J., Rocha, O., Mata, R., Gutiérrez, M. 2009. Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica: II. La vegetación en relación con el suelo. *Revista de Biología Tropical*. 57(3), 817-836.
- Lo Curzio, S. 2009. Identification of soil erosion landsurfaces by Landsat data analysis and processing. *Italian Journal of Remote Sensing* 25–36.
- Lopez-Ramos, E. 1975. Geological Summary of the Yucatan Peninsula. In: Nairn, A.E.M., Stehli, F.G. (Eds.), *The Gulf of Mexico and the Caribbean*. Springer US, pp. 257–282.
- López-Ramos, E. 1981. Paleogeografía y tectónica del Mesozoico de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 5, 158–177.
- Lugo, J. 1990. El relieve de la República Mexicana. *Instituto de Geología* 9, 82–111.
- Lugo, J., Aceves, J., Espinasa, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología. UNAM* 101, 143–150.
- Lyew-Ayee, P., Viles, H.A., Tucker, G.E. 2007. The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 165–179.
- McBratney, A. Field, D. Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma* 213, 203-213.
- MacMillan, R., Pettapiece, W., Brierley, A. 2000. An expert system for capturing and applying soil survey tacit knowledge to automatically link soils to landform position in soil-landform models. Artículo disponible en: http://www.env.gov.bc.ca/esd/distdata/ecosystems/wis/pem/tech_workshop/panel-papers/macmillan/applying-soil-tacit-knowledge.pdf
- MacMillan, R.B. 2004. Automated knowledge-based classification of landforms, soils and ecological spatial entities. Artículo en conferencia disponible en: <http://www.georeference.org/forum/e32412F39303135342F31322D426F624D61634D696C6C69616E2E646F63/12-BobMacMillan.doc>
- Magdalene, S., Alexander C. 1995. Sinkhole distribution in Winona County, Minnesota, revisited. University of Minnesota.
- Mecham, 2005. Quintana Roo Speleological Survey [www Document]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrss.htm> (accessed 12.19.13).
- Mendoza, M., Bocco, G. 1998. La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica. *Serie Varia* 17, 25–55.
- Mendoza, M., Plascencia, H., Alcántara, C., Rosete F., Bocco, G. 2009. Análisis de la aptitud territorial. Perspectiva biofísica. *Serie planeación territorial*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT (ISBN 978-968-817-917-8)
- Mendoza, M., Velázquez A., Larrazábal, A., Toledo, A. (compiladores). 2010. Atlas Fisicogeográfico de la Cuenca del Río Tepalcatepec. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT y Colegio de Michoacán (ISBN 978-968-817-916-1).
- Mendoza, M., Bocco, G. Características biofísicas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Geomorfología. En: Cram, S., L. Galicia e I. Israde Alcántara, (compiladores). 2010. Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: un análisis de la geografía del lago y su entorno socioambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Migoñ, P. 2010. *Geomorphological landscapes of the world*. Springer.
- Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., Lymburner, L., 2008. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 419–430.
- Morales, J.J. 2009. La península que surgió del mar. Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de Yucatán, Mérida, Yucatán [México].
- Morate, G. 2008. Manual DE Weka. Disponible através do e-mail diego. garcia. morate@ mail. com.

- Moreno, C. 1992. Fundamentos de Geomorfología. Trillas, México.
- Mulder, L., de Bruin, S., Schaepman, E., Mayr, R. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma* 162, 1–19.
- Mukerjee, P. 2012. Classification & Association Rule Generation. Vinod Gupta School of Management. India.
- Nelson, T.O. 1986. BASIC programs for computation of the Goodman-Kruskal gamma coefficient. *Bull. Psychon. Soc.* 24, 281–283. doi:10.3758/BF03330141
- Nichols, W.F., Killingbeck, K.T., August, P.V. 1998. The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity II. A Landscape Perspective. *Conservation Biology* 12, 371–379.
- Ochoa, M., Flores, O. 2006. Áreas de Diversidad y Endemismo de la Herpetofauna Mexicana. UNAM., México.
- Omran, M.G., Engelbrecht, A.P., Salman, A. 2007. An overview of clustering methods. *Intelligent Data Analysis* 11, 583–605
- Ordóñez, I., García, M. 2010. Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *Revista Electrónica de Medioambiente* 15–35.
- Orians, G.H., Dirzo, R., Cushman, J.H., Medina, E., Wright, S.J. 1995. Tropical forest biodiversity and ecosystem functioning. In: Watson, R.T., Heywood, V.H. (Eds.), *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge University Press, pp. 339–345.
- Ortiz C. 2010. Edafología, Octava. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Ortiz, M., 1988. Perfiles geomorfológicos complejos. Serie Varia, IG-UNAM, México.
- Palacio, G., Noriega, R., Zamora, P. 2012. Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como “bajos inundables”. El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 0.
- Palacio, G., Medina, V., Bautista, F. 2005. Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: enfoques geomorfológico, pedológico y geopedológico. In: *Caracterización Y Manejo de Suelos En La Península de Yucatán*. UACAM-UADY-INE, México.
- Parise, M., Waele, J., Gutierrez, F. 2009. Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst. *Environmental Geology* 58, 235–237.
- Parks, K.E., Mulligan, M. 2010. On the relationship between a resource based measure of geodiversity and broad scale biodiversity patterns. *Biodiversity and Conservation* 19, 2751–2766.
- Paviopoulos, K., Evelpidou, N., Vassilopoulos, A. 2009. *Mapping geomorphological environments*. Springer, New York.
- PEMEX. 1967. *Prospección geológico petrográfica de la Península de Yucatán*. Petróleos Mexicanos, México.
- Pereira, A., Fragoso, P. 2002. Los Sistemas de Información Geográfica en el manejo de suelos. Presentado en el Simposio Regional sobre suelos y su manejo, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán.
- Pereira C., A., Prezas H., B., Olivares M., J.A., Fragoso S., P., Niño C. 2013. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (Quintana Roo) - Statewide Program of Action on Climate Change (Quintana Roo), 1st ed. Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México.
- Pereira, A., Fragoso, P., Prezas, B. 2014. Relaciones agua-suelo-espacio en X'Acel-X'Acelito, Quintana Roo. Conferencia. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Peris, J., Sanchis, E., Roig, C. 1994. Relación suelo/vegetación en la plana cuaternaria del Golfo de Valencia. *Cuadernos de Geografía* 56, 155-162. España.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., Marin, L. 2002. The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review* 44, 191–221.
- Pike, R.J. 2000. Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24, 1–20.
- Prado, S.A. 1998. Estrategia preliminar para la aplicación de la política de gestión del agua por cuenca en la región xii, Península de Yucatán [WWW Documento]. Consejo de Cuencas. URL http://siga.cna.gob.mx/siga/regionales/peninsula_yucatan/CONGOAX2.htm (acceso 12.5.12).

- Prezas, B. 2011a. Áreas naturales protegidas en Quintana Roo. In: Riqueza Biológica de Quintana Roo: Un Análisis Para Su Conservación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) ; Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) ; Gobierno del Estado de Quintana Roo ; Programa de Pequeñas Donaciones-México, México, D.F. : San Cristóbal de Las Casas, Chiapas : Chetumal : Mérida, Yucatán, México, pp. 300–309.
- Prezas, B., Pereira, A., Gamboa, H. 2003. Zonas de importancia para la conservación de fauna silvestre en el área sujeta a ordenamiento ecológico, región Bacalar, Quintana Roo. Presentado en el VIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales y II Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, Querétaro, México.
- Priego, Á., Bocco, G., Mendoza, M.E., Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes, 1st Ed, Planeación Territorial. SEMARNAT/INE/CIGA-UNAM, México, D.F.
- Priego, Á., Moreno, P., Palacio, J.L., López, J., Geissert, D. 2003. Relación entre la heterogeneidad del paisaje y la riqueza de especies de flora en cuencas costeras del estado de Veracruz, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía.
- QRSS. 2011. Quintana Roo Speleological Survey [www Documento]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrssesp.htm>
- Roglic, J. 1972. Historical review of morphologic concepts. Karst: Important Karst Regions of the Northern Hemisphere. Elsevier, Amsterdam 1–18.
- Romesburg, C. 2004. Cluster analysis for researchers. . Lifetime Learning Publications. USA.
- SAGARPA, Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural y pesca. 2012. Anuario estadístico de producción agrícola [www Documento]. Portal OEIDRUS. URL <http://www.oeidrus.qroo.gob.mx/>
- Sanchez, P.A., Ahamed, S., Carré, F., Hartemink, A.E., Hempel, J., Huising, J., Lagacherie, P., McBratney, A.B., McKenzie, N.J., de Lourdes, M. 2009. Digital soil map of the world. Science 325, 680–681.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A. 2005. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. Geoderma 126, 117–128.
- SEMA. 2011. Programa sectorial preservación ambiental y recursos naturales 2011-2016. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente, Quintana Roo, México.
- Serrano, E., Ruiz, P. 2007. Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial: el caso de Tiermes Caracena (Soria). Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles 79–98.
- Siart, C., Bubbenzer, O., Eitel, B. 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high-resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. Geomorphology 112, 106–121.
- Takagi, M., Shibasaki, R. 1996. An interpolation method for continental DEM generation using small-scale contour maps. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31, 847–852.
- Toledo, V.M., Moguel, P. 1992. Ecología, geografía y producción rural: El problema de la conceptualización de la naturaleza. Relaciones 12, 7–22.
- UQRoo. 2004a. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México.
- UQRoo. 2004b. Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Laguna Bacalar (Reporte técnico). Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México.
- Vázquez, M., Pereira, A., Fragoso, P., Rodríguez, J.A. 2011. Riqueza y biodiversidad de organismos edáficos del Corredor Biológico Mesoamericano (México, Belice y Guatemala). En: Avances en ciencia y tecnología en Quintana Roo. UQRoo-PyV, Chetumal, Quintana Roo, pp. 36–70.
- Viramontes, O., Escobaza, L., Pinedo, C. 2007. Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. Tecnociencia 1(3), 21–31.
- White, W.B. 1988. Geomorphology and hydrology of karst terrains. Oxford University press New York.
- Xavier-da-Silva, J., de Carvalho-Filho, L.M. 2004. Geodiversity: Some simple geoprocessing indicators to support environmental biodiversity studies. Directions Magazine 1–4.
- Yue, T.X., Du, Z.P., Song, D.J., Gong, Y. 2007. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. Geomorphology 91, 161–172.
- Zinck, J.A. 1989. Physiography and Soils. ITC, Netherlands.

- Zinck, J.A. 1994. Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century. FAO-ITC, Enschede, Netherlands.
- Zinck, J.A. 2005. Suelos, información y sociedad. In: Caracterización Y Manejo de Los Suelos de La Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales Y Ambientales. Universidad de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, México, pp. 9–19.
- Zinck, J.A. 2012. Geopedología. ITC, Enschede, Netherlands.
- Zwoliński, Z. 2010. The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. *Landform Analysis* 11, 77–85.
- Zwoliński, Z., Stachowiak, J. 2012. Geodiversity map of the Tatra National Park for geotourism. *Quaestiones Geographicae* 31, 99–107.