

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

Patricia Fragoso-Servón¹, Francisco Bautista^{2*}, Oscar Frausto¹ y Alberto Pereira¹

¹ Universidad de Quintana Roo, Boulevard Bahía s/n colonia del Bosque, Chetumal, C. P. 77019 Quintana Roo, México.

² Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México,
Antigua Carretera a Pátzcuaro, col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C. P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

* leptosol@ciga.unam.mx

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 trabajo 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, uvalas 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 uvalas. 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 uvalas las más abundantes y los poljes los que ocupan mayor superficie. Las dolinas y uvalas 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 uvalas y la inundación temporal en los poljes.

Palabras clave: karst, morfometría, depresiones, dolinas, uvalas, poljes, régimen de inundación, Quintana Roo, México.

ABSTRACT

The occurrence of floods in karst depressions is often crucial for economic activities related to the agriculture, the infrastructure of human settlements and the tourism. The aim of this study was the characterization (size, shape and density) of the karst depressions in the Quintana Roo State, southeastern Mexico, and the type of flood associated. Eighty INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) topographic maps scale 1:50,000 were used to build an altimetry map with equidistance every 10 m. Karst depressions, water bodies and areas subject to flooding were identified. Karst depressions (sinkholes, uvala and poljes) were classified using the following criteria: those with area larger than 1 km² were classified as poljes, otherwise they were classified by their shape using the compactness index: those with values between 1.0 and 1.04 were classified as sinkholes and those with values greater than or equal to 1.3 were classified as uvala. Karst depressions with compactness index between 1.04 and 1.3 were classified using a discriminant analysis. The database was complemented with the identification of exposed water bodies with diameters greater than 10 m and less than 50 m using 2009 LandSat7 and GeoEye imagery, Spot and Global Image from Google Earth by mean of Google Earth Pro v.7.01. A convolution algorithm was used to interpolate a continuous surface of probable karst depressions density. Jenks algorithm was used to split the entire density range into three categories: low, medium and high. We identified 2890 karst depressions occupying an area of 1147.05 km², being uvalas the most abundant and poljes the more extensive. Sinkholes and uvalas are present across the entire state, whereas poljes are present mainly in valleys. The greatest amount of karst depressions is located in the plains; extraordinary flood regime is the most frequent in sinkholes, uvalas and poljes followed by permanent flood regime in sinkholes and uvalas, and temporally flood in poljes. Finally, the differentiation of the territory was achieved through an analysis of the density of negative forms of relief and flooding processes, being this differentiation the central contribution of this study.

Key words: karst, morphometry, landforms, sinkhole, uvala, poljes, flooding regime, Quintana Roo, Mexico.

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

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 uvalas que cuando se expanden forman poljes (Bautista *et al.*, 2005). Esta sucesión ahora es considerada anticuada; según Roglic (1972) la formación de poljes está controlada estructuralmente y no está relacionada a las uvalas; 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-Luchena (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 uvalas 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, uvalas 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, uvalas 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 uvalas, 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.*, 2006; 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-Elorza, 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-Pereña, 1990; Lugo-Hubp, 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-Elorza (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 y Ihl, 2008; Frausto-Martínez *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.

ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación

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 (PEOT, 2004) (Figura 1).

Clima

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.

Geología

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-Crespo y García-Rodríguez, 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 clásicas 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 *et al.* 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-Hubp *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 *et al.*, 2005), otra, la de mayor extensión, desde el norte hasta el centro-este del estado y una tercera en la zona limítrofe con Campeche (PEOT, 2004).

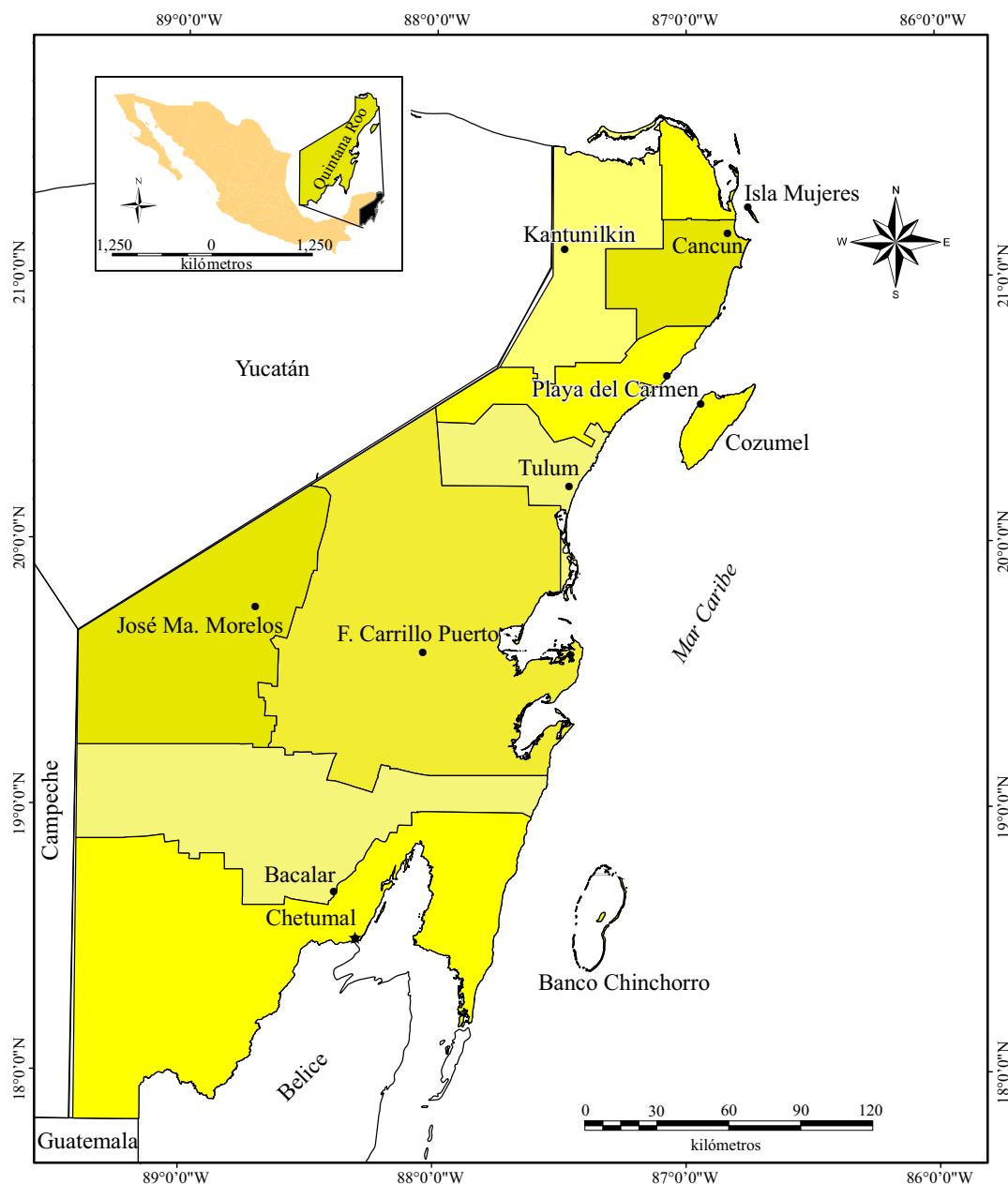


Figura 1. Ubicación del Estado de Quintana Roo. Se muestra la división en municipios y las localidades más importantes.

Relieve y suelos

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-Zamora *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-Hubp *et al.*, 1992; Frausto *et al.*, 2008; Frausto-Martínez *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, 1986; Lugo-Hubp *et al.*, 1992) en la que predominan Lepstosoles, Solochacks y Arenosoles en los cordones litorales (Bautista *et al.*, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Insumos y altimetría

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, 2008).

Caracterización de las depresiones kársticas y sus regímenes de inundación

Las DK son en esencia porciones de la superficie de la tierra que se encuentran hundidas respecto a sus alrededores (Kusky, 2005; Allen y Allen, 2009) de modo tal que pueden ser consideradas como micro o nanocuencas y por tanto ser estudiadas con las mismas herramientas.

Las DK con área superior a 1 km² fueron clasificadas como poljes (Frelih, 2003; Ford y Williams, 2007); las que presentaron menor área fueron clasificadas por su forma utilizando el índice de compacidad o índice de Gravelius (*Ic*) 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; González 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.

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

El círculo es la figura geométrica bidimensional más compacta, es decir, aquélla para la cual la relación perímetro-superficie es mínima; el coeficiente *Ic* es igual a 1 cuando la forma es perfectamente circular y puede alcanzar un valor de tres en el caso de formas muy alargadas (González de Matauco, 2004; Viramontes *et al.*, 2007). Aquellas DK con un *Ic* entre 1.0 y 1.04 fueron clasificadas como dolinas y aquellas cuyo *Ic* fue mayor o igual a 1.3 se clasificaron como uvalas. Para no introducir elementos de carácter subjetivo en la clasificación, las DK con *Ic* 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 uvalas. Las variables independientes son métricas: área del círculo equivalente y perímetro de la DK. La función discriminante para dos grupos es:

$$D = b_1X_1 + b_2X_2$$

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 uvala, se generalizan quedando solo la uvala que es la formación de mayor jerarquía; y b) un

procedimiento semejante se siguió en los casos de dolinas y uvalas 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; Pereira-Corona, 2005).

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, 2008; Aguilar-Duarte *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 (Goovaerts, 1997; Chiles y Delfiner, 1999).

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 utilizan 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 *et al.* 2012; ESRI, 2013).

RESULTADOS

Mapa altimétrico

Los registros de altura en Quintana Roo van desde 1 msnm en las zonas costeras hasta un máximo de 380 m en el extremo sur (Figura 2). La altura va ascendiendo 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 ayu-

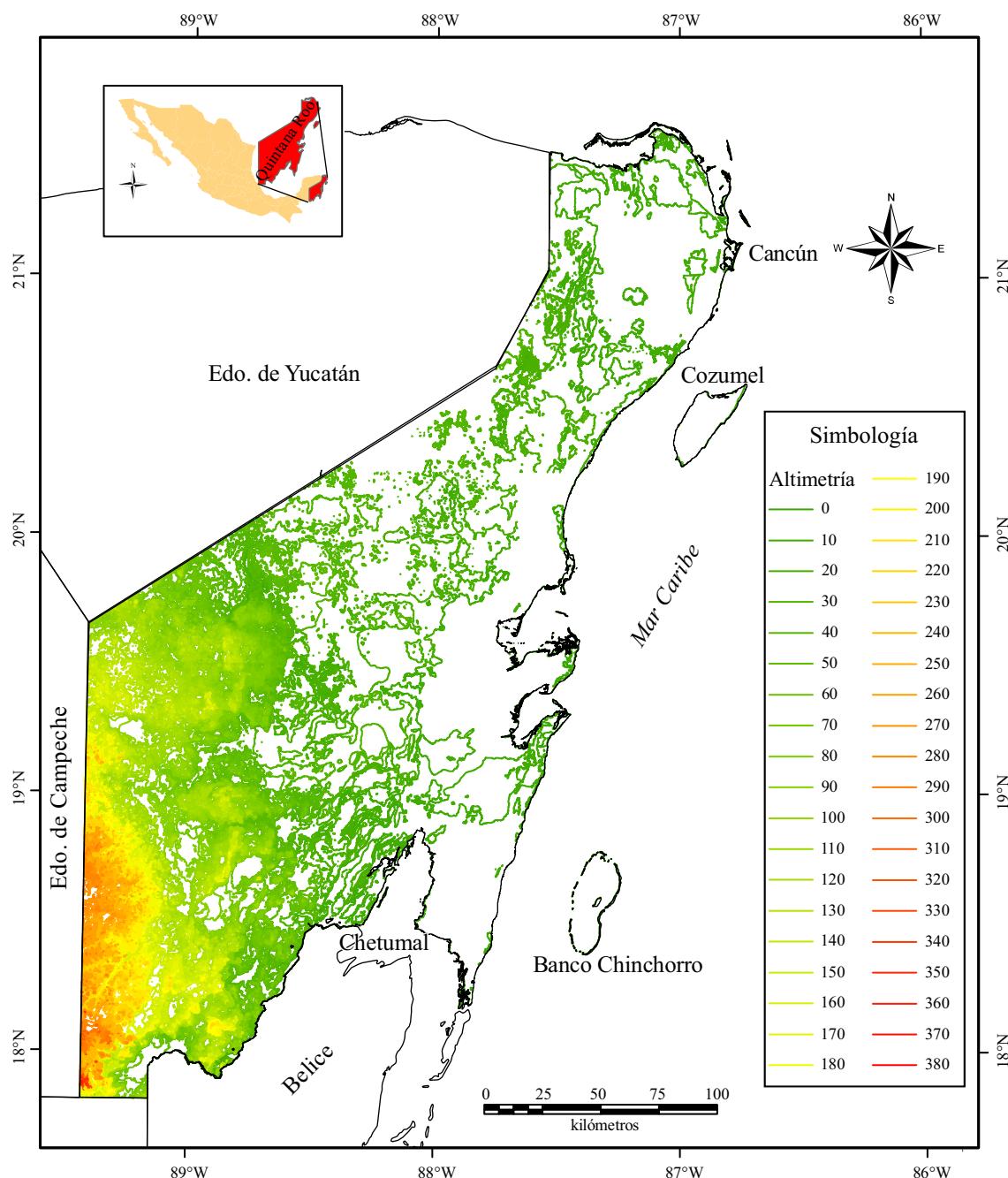


Figura 2. Pisos altimétricos y curvas de nivel obtenidos para el Estado de Quintana Roo.

dan a definir y contrastar áreas de planicies, colinas, lomeríos y montaña (Figura 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 uvalas, el 35.1% son dolinas y solo el 5.9 % son poljes (Tabla 1).

Las uvalas 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).

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 4) se encontró que para las tres formas (dolinas, uvalas y poljes) el régimen de inundación extraordinario es el más frecuente; el de menor frecuencia para dolinas y uvalas es el de inundación temporal y para los poljes, mientras que la menor frecuencia es para aquellos con inundación permanente.

Entre las formas con régimen de inundación extraordinaria las

Tabla 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	371	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>
<i>Total DK</i>	<i>2890</i>	<i>1147.04</i>		

uvalas se encuentran en mayor cantidad (805) y los poljes son los que ocupan mayor superficie (541.6 km²).

En la Figura 5 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 uvalas con régimen de inundación extraordinaria las que presentan mayor número y superficie en los cuatro pisos altitudinales.

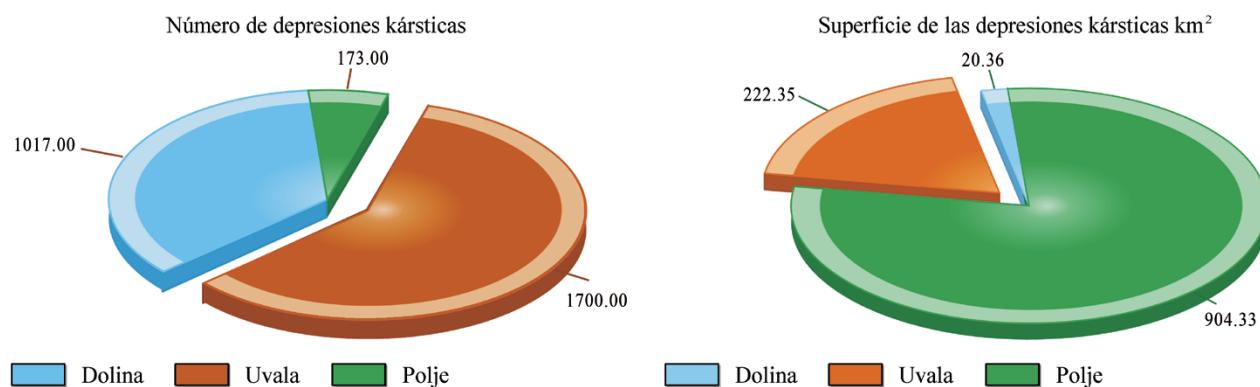
El 85% de dolinas se encuentra por debajo de los 50 msnm, predominando el régimen de inundación extraordinaria, y conforme aumenta la altitud hasta los 170 msnm van disminuyendo en cantidad y área; por encima de este nivel hay un ligero incremento en su número con respecto a los dos anteriores pisos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

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 6, 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

Figura 3. Número y área (km²) ocupada por formas exokársticas negativas.

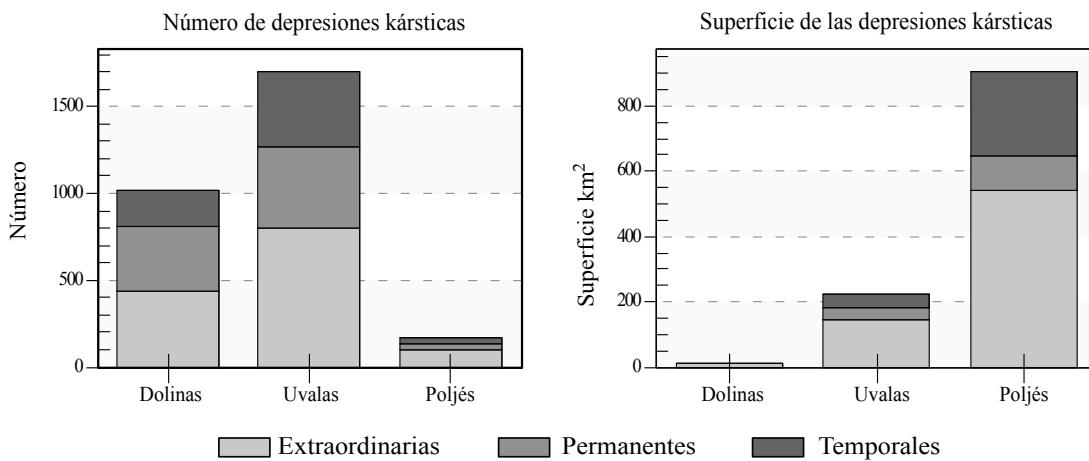


Figura 4. Distribución de depresiones kársticas por régimen de inundación.

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.

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, 2009; Migon, 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 uvalas y facilita la tipología de las DK (Denizman, 2003; González 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-Duarte 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 6). El uso del I_c como criterio de diferenciación entre las dolinas y uvalas no es suficientemente eficiente para hacer una clasificación automatizada en el SIG con los límites de corte establecidos por Aguilar-Duarte (2010), por lo que fue necesario el uso de un análisis multivariado discriminante para incrementar la eficiencia del reconocimiento de las DK.

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 uvalas cuando los límites de corte establecidos para el I_c 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 Wysocky (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-Elorza (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 uvalas 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 Schoeneberger y Wysocky (2005), ello podría explicar la existencia de concentraciones de dolinas y uvalas 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.

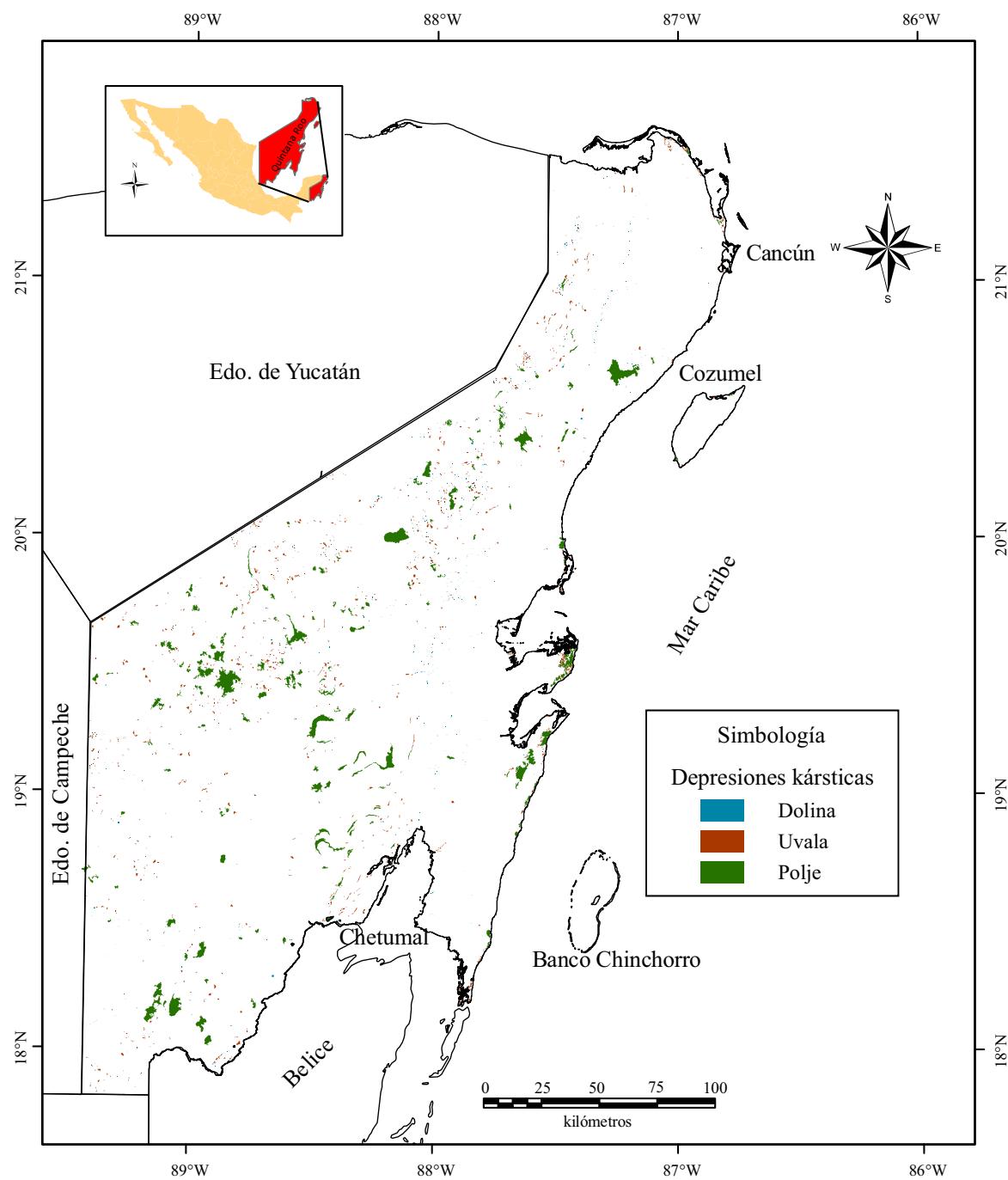


Figura 5. Distribución de depresiones kársticas en el Estado de Quintana Roo.

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 Wysocky (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 uvalas 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-Luchena (1995) y Salomon (2005, *en* Gutiérrez-Elorza, 2008). Por su parte, Bautista *et al.* (2005) describen este proceso indicando que los controles estructurales asociados a

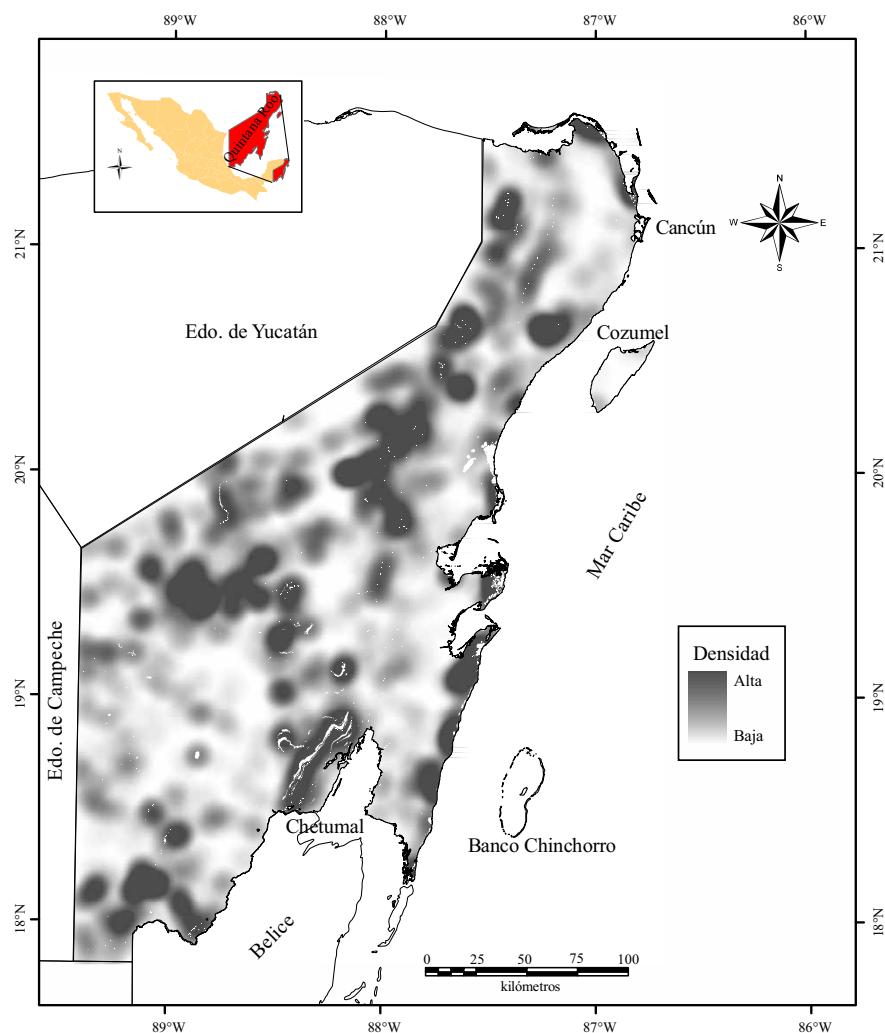


Figura 6. Densidad de formas exokársticas en el Estado de Quintana Roo.

la margen activa del centro de Quintana Roo son favorables para la formación de uvalas.

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 8).

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 9).

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.

La naturaleza porosa de la roca caliza en todo el estado favorece que gran parte del volumen que no es evapotranspirado se infiltre rá-

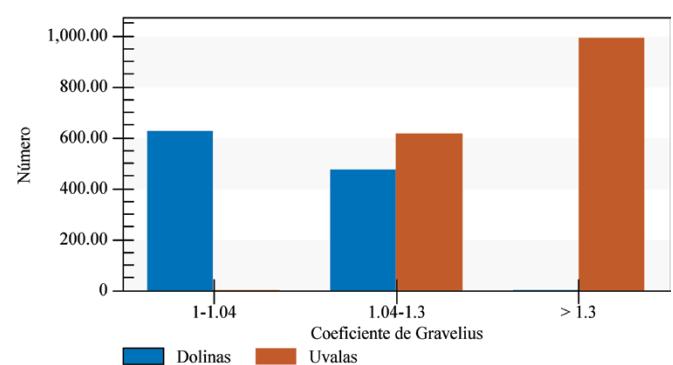
Figura 7. Distribución de dolinas y uvalas de acuerdo con su coeficiente de Gravelius (I_C).



Figura 8. Polje utilizado con fines recreativos.

pidamente y fluya hacia la costa subterráneamente (PEOT, 2004). 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.* (2005) mencionan que la densidad puede estar relacionada a un factor estructural como la distribución de fallas en el Estado de Quintana Roo.

CONCLUSIONES

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 uvalas 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



Figura 9. Forma exokárstica usada para agricultura

sur del estado se forman pisos de altitud que pueden favorecer la formación de uvalas y en el sur se alternan planicies, lomeríos y colinas redondeadas que pueden estar favoreciendo la formación de dolinas con inundación permanente y uvalas 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.

AGRADECIMIENTOS

Por las facilidades dadas para el uso de la información cartográfica del estado de Quintana Roo y el apoyo financiero agradecemos al proyecto "Elaboración del programa estatal de acción ante el cambio climático" de la Universidad de Quintana Roo. A la DGAPA por el financiamiento al proyecto IN223110 "Diseño del mapa geopedológico de México a escala 1:500 000 con ventanas 1:250 000 en zonas volcánicas y de karst tropical". A los árbitros por sus valiosos comentarios a la versión previa.

REFERENCIAS

- Aguilar-Duarte, Y., Mendoza-Cantú, M., Frausto-Martínez, O., Ihl, T., Bollo-Manent, M., Bautista-Zúñiga, F., 2010, Spatial distribution of karstic depressions in tropical karst plains, *en Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana A. C.*, Nov. 2010: GEOS, 30, 115-116.
- Allen, P.A., Allen, J.R., 2009, Basin analysis: principles and applications: New York, John Wiley & Sons., 560 pp.
- Barea-Luchena, J., 1995, Geología del Karst desde el punto de vista del espeleólogo: Boletín Espeleológico SECJA, 1, 46-52.
- Bautista, F., Palacio, G., Ortiz-Pérez, M., Batllori-Sampedro, D., Castillo-González, M., 2005, El origen y manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán, *en* Bautista, F., Palacio, G. (eds.), Caracterización y Manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales: México, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología, 33-58.
- 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.
- Blair, R.W., 1986, Karst Landforms and Lakes (en línea): NASA, Geomorphology from Space, Chapter 7, <<http://disc.gsfc.nasa.gov/geomorphology/>>.
- Bonet, F., Butterlin, J. 1962, Stratigraphy of the northern part of the Yucatán Peninsula, Guide Book: Field Trip to Peninsula of Yucatan: USA, New Orleans, New Orleans Geological Society, 52-57.
- Bosák, P., 2008, Karst process and time: Geologos, 14, 19-36.
- Bruno, D., Calcaterra, D., Parise, M., 2008, Historical instability and recent slope evolution of the Ilice Torrent catchment, Calabria, Italy: Phisical Geography, 29, 179-194.
- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olguín, S., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J.M., Miranda-Víquez, E., Pineda-Velázquez, A., 1990, Clasificación de Regiones Naturales de México 2, *en* Atlas Nacional de México, Tomo II, IV. Naturaleza, Regionalización física, IV.10.2: México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chiles, J.P., Delfiner P., 1999, Geostatistics, Modeling Spatial Uncertainty: New York, Wiley Series in Probability and Statistics, 695 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2012, Servicio Meteorológico Nacional: <<http://smn.cna.gob.mx>>, consultado enero de 2012.
- Denizman, C., 2003, Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwanne river basin, Florida: Journal of Cave and Karst Studies, 65(1), 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., 1986, Geografía general del estado de Quintana Roo: Chetumal,

- Gobierno del Estado de Quintana Roo, Fondo de Fomento Editorial, 140 pp.
- Espinasa-Pereña, R., 1990, Carso (Karst), *en* Atlas Nacional de México, Tomo II, IV. Naturaleza, Relieve, Geomorfología II, IV.3.4: México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, IV.3.4.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2013, Knowledge base (en línea): <<http://support.esri.com/en/knowledgebase/techarticles/detail/26442>>, consulta: 29 de enero de 2013.
- Ford, D., Williams, P., 2007, Karst hidrogeology and geomorphology: England, John Wiley and Sons, 554 pp.
- Frausto, O., Ihl, T., 2008, Mapas de formas exokársticas del norte de Quintana Roo a escala 1:50000, *en* Gutiérrez-Aguirre, M.A., Cervantes-Martínez, A. (eds.), Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo, 45-58.
- Frausto, O., Mattes, L., Ihl, T.J., Cervantes, A., Giese, S., 2008, Groundwater quality monitoring on northeast Yucatan Peninsula, Mexico, *en* 20th Salt Water Intrusion Meeting, June 23-27, Naples, Florida, USA, Proceedings Book, 80-83, <<http://www.swim-site.nl/pdf/swim20/file099-102.pdf>>.
- Frausto-Martínez, O., Ihl, T., Giese, S., Cervantes A., Gutiérrez, M., 2010, Vulnerabilidad a la inundación en las formas exokársticas del noreste de la Península de Yucatán, *en* VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física, II Seminário Ibero-American de Geografia Física: Portugal, Universidad de Coimbra, 16 pp.
- Frelih, M., 2003, Geomorphology of karst depressions: polje or uvala -a case of Lucki dol: *Acta carsologica*, 32(2), 105-119.
- Frisia, S., Borsato, A., 2009, Karst, *en* Alonso-Zarza, Tanner, L.H. (eds.), Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments and Processes: Elsevier, Developments in Sedimentology 61, 269-318.
- García, E., 1983, Apuntes de Climatología: Universidad Nacional Autónoma de México, tercera edición, 153 pp.
- García, G., Padilla, J., Salazar, E., 2000, Geomorfología del estado de Quintana Roo, proyecto preliminar: México, Colegio de la Frontera Sur, 32-52.
- Gao, Y., Zhou, W., 2008, Advances and challenges of GIS and DBMS applications in karst: Environmental Geology, 54, 901-904.
- Gao, Y., Alexander, E., Barnes, R., 2005, Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution: Environmental Geology, 47, 1083-1098.
- González de Matauco, A.I., 2004, Análisis morfométrico de la cuenca y red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas, Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 38, 311-329.
- Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for Natural Resource Evaluation: Oxford University Press, 483 pp.
- Gupta, A., 2011, Tropical Geomorphology: United Kingdom, Cambridge University Press, 400 pp.
- Gutiérrez-Elorza, M., 2008, Geomorfología: Madrid, Pearson/Prentice Hall, 920 pp.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., Black, W., 2007, Análisis multivariante: Madrid, Prentice Hall, 5^a edición, 768 pp.
- Huang, H., 2007, Geomorphologic investigations on karst terrain: a GIS-assisted case study on the island of Barbados: Montréal, Québec, McGill University, Department of Bioresource Engineering, tesis de Maestría en Ciencias, 95 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2008, Base de datos geográficos. Diccionario de datos topográficos (vectorial). Escala 1:50000. México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- 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., Jia, T., 2012, Scaling of Geographic Space as a Universal Rule for Map Generalization (en línea): arXiv:1102.1561, <<http://arxiv.org/abs/1102.1561>>, consulta 13 de febrero de 2013.
- 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., 2005, Encyclopedia of Earth Science: New York, NY, Facts on File Science Library, 510 pp.
- López-Ramos, E., 1975, Geological summary of the Yucatan Peninsula, *en* Naim, A.E.M. (ed.), The Gulf of Mexico and the Caribbean: New York, Plenum Press, 257-282.
- Lugo-Hubp, J., 1990, El relieve de la república Mexicana: Revista del Instituto de Geología, 9 (1), 82-111.
- Lugo-Hubp, H.J., Aceves-Quesada, J.F., Espinoza-Pereña, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 10(2), 143-150.
- Lyew-Ayee, P., Viles, H.A., Tucker, G.E., 2006, The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst: Earth Surface Process and Landforms 32, 165-179.
- Magdalene, S., Alexander, E.C., Jr., 1995, Sinkhole distribution in Winona County, Minnesota revisited, *en* Beck, B.F., Person, F.M. (eds.), Karst geohazards, Proceedings of the Fifth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impact of Karst, Gatlinburg, Tenn., 2-5 April, 1995: Rotterdam, Balkema, 43-51.
- Migon, P., 2010, Geomorphological Landscapes of the World: Springer Netherlands, 375 pp.
- Ordoñez-Crespo, I., García-Rodríguez, M., 2010, Formas Kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México): M+A Revista electrónica de Medio Ambiente, 9, 15-35.
- Parise, M., De Waele, J., Gutierrez, F., 2009, Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst: Environmental Geology, 58, 235-237.
- PEOT (Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo), 2004, Informe técnico: México, Universidad de Quintana Roo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, 634 pp.
- Pereira-Corona, A. (coordinador), 2005, Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la región Laguna de Bacalar: México, Universidad de Quintana Roo-Gobierno del Estado-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- 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, *en* Memorias del 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: México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universivad Nacional Autónoma de México, 104 pp.
- Roglic, J., 1972, Historical review of morphologic concepts, *en* Herak, M., Stringfield, V. (eds.), Karst -Important Regions of the Northern Hemisphere: Amsterdam, Elsevier, 1-18.
- Schoeneberger, P., Wysocky, D., 2005, Hidrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management: Geoderma 126, 117-128.
- Siart, B., Bubanzer, O., Etel, B., 2009, Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study: Geomorphology, 112, 106-121.
- Viramontes, O., Escobedo, L., Pinedo, C., Pinedo, A., Reyes, V., Román, J., Pérez, A., 2007, Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua: Tecnociencia Chihuahua, 1(3), 21-31.
- White, W., 1988, Geomorphology and hydrogeology of karst terrains: USA, Oxford University Press, 465 pp.

Manuscrito recibido: Febrero 18, 2013

Manuscrito corregido recibido: Agosto 4, 2013

Manuscrito aceptado: Febrero 2, 2014