



KARST EN LA CIUDAD: PLANIFICACIÓN DEL ESPACIO URBANÍSTICO DE LA CIUDAD DE COZUMEL, MÉXICO †

[KARST IN THE CITY: URBAN SPACE PLANNING OF COZUMEL CITY, MEXICO]

Oscar Frausto-Martínez*¹, Orlando Colín Olivares²
and José Francisco Rodríguez Castillo¹

¹Laboratorio de observación e investigación espacial, Universidad de Quintana Roo. Avenida Andrés Quintana Roo s/n, esq. Calle 110 sur, Col. Maravilla. C.P. 77600, Cozumel, Quintana Roo, México.

²Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Av. Héroe de Nacozari Sur, Núm. 2301, Jardines del Parque. C. P. 20276, Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Email. ofrausto@uqroo.edu.mx*, orlando.colin@inegi.org.mx,

franciscomanejador@gmail.com

*Corresponding author

SUMMARY

Background: The growth of the urban slick represents one of the most significant challenges to territorial planning in karst territories. This growth undermines the city's planning systems, generating irregular settlements, disarticulated human settlements, lack of services, coupled with ignorance of ecosystems, a situation that is typical of cities in the northeast of the Yucatan peninsula. The absence of a knowledge system of the physiographic characteristics of the territory has overlooked the karst characteristics of this region, adapting the buildings to a highly complex urban system. **Objective:** This work aims to develop a model for the recognition of karst depressions and its assessment based on the use of urban land in order to guide karst action policies in the city. **Methodology:** The study was carried out in the city of Cozumel, Mexico. For this, the cartographic bases were developed in order to recognize the depression units in the city, which were derived from data from seven INEGI LiDAR datasets, with a resolution of 5 m in the horizontal axis, constructing a mosaic dataset that covers the urban stain of the city. Through a management of the original LAS data, an altitude contour map (from 0 to 17 meters) was modeled with an equidistance of 0.25 m in the vertical axis and with polygons of 25m² of resolution; subsequently, the positive and negative level contours (depressions) were differentiated. Which were characterized and differentiated by their origin (natural or anthropogenic), type (sinkhole, uvala or polje), depth (from 0.25 to 4.5 m), land use and population density at the city block level. **Results:** 1,219 depressions were recognized, of which 59% are orb and orb to oval sinkholes with less than 1 m depth. Four sectors of the city are distinguished with medium and high housing density, high population density and high density of depressions (between 50 and 90%). **Implications:** The identification of the units is based on the principles of remote perception and geographic information systems, so that some spatial units will be overestimated in their number or underestimated in their territorial context of the urban area of the city of Cozumel. **Conclusions:** Most of the sinkholes and uvalas are located in private and business properties (mainly nurseries, ornamental gardens and water vending), government (in the form of theme parks, within land and public parks) and in vacant lots (most are characterized by being open-air dumps) and about 30% is located in the road system. The present analysis model can be implemented in all the northern cities of Quintana Roo under an ecosystem services scheme of these karst units.

Key words: territorial management, city planning, impacts, karst, human settlements.

RESUMEN

Antecedentes: El crecimiento de la mancha urbana representa uno de los retos más significativos en la planificación territorial en territorios kársticos. Este crecimiento rebaza los sistemas de planificación de la ciudad, generando asentamientos irregulares, asentamientos humanos desarticulados, falta de servicios, aunado al desconocimiento de los ecosistemas, situación que es típica de las ciudades del nororiente de la península de Yucatán. La ausencia de un sistema de conocimiento de las características fisiográficas del territorio ha pasado por alto las características kársticas de esta región, adaptando las construcciones a un sistema urbano de alta complejidad. **Objetivo:** desarrollar un modelo de reconocimiento de depresiones kársticas y su valoración en función del uso del suelo urbano con el fin de orientar las políticas de acción para el manejo del karst en el contexto urbano. **Métodos:** El estudio se llevó a cabo en la ciudad

† Submitted June 22, 2020 – Accepted January 6, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

de Cozumel, México. Para ello, se elaboraron las bases cartográficas con el fin de reconocer las unidades de depresiones en la ciudad, las cuales se derivaron de los datos de siete archivos LiDAR de INEGI, con resolución a 5 m en la horizontal, construyendo un mosaico que cubre la mancha urbana de la ciudad. A través de un manejo de los datos LAS de origen, se modeló un mapa de contornos de altitud (de 0 a 17 metros) con una equidistancia de 0.25 m en la vertical y con polígonos de 25m² de resolución; posteriormente, se diferenciaron las curvas de nivel positivas y negativas (depresiones), las cuales fueron caracterizadas y diferenciadas por su origen (naturales o antropogénicas), tipo (dolina, úvala o polje), profundidad (de 0.25 a 4.5 m), uso del suelo y densidad de población a nivel manzana.

Resultados: se reconocieron 1219 depresiones, de las cuales el 59 % son dolinas redondas y redondas a ovaladas con menos de 1 m de profundidad. Se diferencian cuatro sectores de la ciudad con uso de suelo habitacional de densidad habitacional media y alta, alta densidad de población y con alta densidad de depresiones (de entre 50 y 90 %).

Implicaciones: La identificación de las unidades se fundamenta en los principios de percepción remota y sistemas de información geográfica, por lo que algunas unidades espaciales estarán sobreestimadas en su número o subestimadas en su contexto territorial del área urbana de la ciudad de Cozumel.

Conclusiones: La mayor parte de las dolinas y úvalas se ubican en propiedades particulares y negocios (principalmente viveros, jardines ornamentales y expendedoras de agua), gubernamentales (a manera de parques temáticos, dentro de terrenos y parques públicos) y en lotes baldíos (la mayoría se caracterizan por ser basureros al aire libre) y cerca del 30% se ubica en el sistema de vialidades. El presente modelo de análisis se puede implementar en todas las ciudades del norte de Quintana Roo bajo un esquema de los servicios ecosistémicos de estas unidades kársticas.

Palabras clave: gestión territorial, manejo del territorio, impactos, asentamientos humanos.

INTRODUCCIÓN

Los instrumentos de planificación territorial en territorios kársticos se centran en la potencialidad de desarrollo regional a través de la instauración e implementación de actividades económicas y sus restricciones y tiene su antecedente en las investigaciones de Liszkowski (1975), White (1988), Cooper (2002) y Parise *et al.*, (2004) quienes destacan los elementos azonales de alta heterogeneidad y complejidad a nivel geotopos, relieve estructural y riesgos naturales asociados. Lo anterior determina una fragilidad de este tipo de sistemas con alta vulnerabilidad a la intervención de las actividades humanas (Beck, 1996, Brinkmann y Parise, 2012, White *et al.*, 1986). En específico, Fleury (2009), señala los principios de la gestión pública de terrenos kársticos centrado en las necesidades de los tomadores de decisiones.

El estudio sobre la susceptibilidad de territorios kársticos en México ha sido prospectivo, reconociendo la exposición del territorio a escalas generales (Escolero *et al.*, 2002, Espinasa-Pereña, 2007, Frausto-Martínez *et al.*, 2010, Lugo-Hubp *et al.*, 1992, Martínez-Salvador *et al.*, 2019) y su diferenciación en función a los movimientos del terreno ya sea por hundimientos o subsidencias (Hernández, 2019, Ihl *et al.*, 2007, Oropeza *et al.*, 1999). Además, se ha señalado un énfasis en la diversidad en las escalas de implementación en México (Aguilar *et al.*, 2013, Colin-Olivares *et al.*, 2019, Frago-Servón *et al.*, 2020, Frausto-Martínez *et al.*, 2018).

En México, las iniciativas de planificación urbana en territorios kársticos tienen su referencia en los inventarios de dolinas y cuevas desarrollado a nivel local y que, bajo iniciativa de ley, se llevó a un reglamento municipal (H. Ayuntamiento de Mérida, 2014, H. Ayuntamiento de Solidaridad, 2017, H.

Ayuntamiento de Tulum, 2018) o nivel estatal (Gobierno del Estado de Yucatán, 2014), en el cual se establecen los permisos y autorizaciones para el uso de las depresiones kársticas y cuevas. Sin embargo, los reglamentos están enfocados a la regulación de actividades recreativas - turísticas, la protección - manejo ambiental, y se deja de lado el carácter exploratorio y de inventarios, el reconocimiento de riesgos asociados y la vulnerabilidad de los sistemas, siendo su único referente los atlas de riesgo centrado en procesos (gravitacionales, de ladera o movimiento superficiales del terreno) (CENAPRED, 2014).

Ante esta problemática, el presente estudio tiene por objeto desarrollar un modelo de reconocimiento de depresiones kársticas y su valoración en función del uso del suelo urbano con el fin de orientar las políticas de acción del karst a nivel ciudad que permitan actualizar los inventarios y censos, sobre todo en una región donde se carece de reglamentos y normas que permitan realizar diagnósticos con alcance prospectivo en los planes de crecimiento y manejo urbano. Para ello, se implementó el modelo en la ciudad de Cozumel, México, con la manipulación de datos abiertos LiDAR con resolución horizontal de 5 m y vertical de hasta 16 m. En ese contexto, se implementaron tratamientos espaciales de percepción remota y álgebra de mapas, reconociendo la asociación entre formas kársticas, uso del suelo y densidad de población.

Generalidades

Recientemente, la inclusión de elementos kársticos en los planes de desarrollo urbano y regulación es prioritario. Por un lado, se incluyen las formas principales ya sea por su singularidad, espectacularidad o por sus problemáticas asociados. Así, los montículos, valles ciegos, dolinas o cavernas

se vuelven parte de los atractivos o patrimonios locales que, bajo un esquema de valor, servicios ecosistémicos o vínculos socioculturales serán regulados por las administraciones locales (Williams y Ziegler, 2014).

Esta necesidad fue resaltada por White *et al.*, (1986), quienes ponen de manifiesto en la década de los ochenta la prioridad de tener en cuenta que las sociedades humanas deben evitar tener un impacto en el paisaje que ocupan; sobre todo en entornos frágiles como los terrenos kársticos. Los asentamientos humanos (de rápido crecimiento, alta densidad y de explotación extensiva), ubicadas sobre sistemas kársticos, alteran las condiciones necesarias para el equilibrio en esos sistemas, siendo una preocupación la escala de la resolución de los estudios a nivel urbano (Frausto-Martínez *et al.*, 2018).

La cartografía de los sistemas kársticos en el sureste se ha abordado desde una visión prospectiva a escalas medias y pequeñas (Aguilar *et al.*, 2013, Fragoso-Servón *et al.*, 2014, Frausto-Martínez y Ihl, 2008, Ihl *et al.*, 2007) y a escalas medias y grandes centradas en la planificación del sistema urbano o municipal (Colin-Olivares *et al.*, 2019, Frausto-Martínez *et al.*, 2018, Hernández, 2019). En específico, para las ciudades y sus problemas de urbanización, Koch *et al.*, (2016), Fragoso-Servón y Pereira-Corona (2018), Contreras y Frausto-Martínez (2019), señalan los referentes en cuestión a los problemas geotécnicos (hundimientos, agrietamientos y de construcción), de contaminación de agua subterránea en la ciudad y su relación con los asentamientos irregulares.

Así, el reto de la planificación de las ciudades es la identificación de las formas kársticas a escala detallada, realizar los inventarios, reconocer los servicios ecosistémicos y evaluar la competencia con el uso del suelo, por lo que se sigue una aproximación técnica centrada en el uso de las tecnologías para generar insumos en el reconocimiento y la caracterización de las unidades a través de la percepción remota en relieves de bajo contraste (Colin-Olivares *et al.*, 2019, Frausto-Martínez *et al.*, 2018) su compatibilidad con el uso del suelo y los servicios ecosistémicos de Williams y Ziegler (2014)

Síntesis físico-geográfica

La isla de Cozumel se ubica en el sector nororiental de la península de Yucatán; se ubica en el norte del estado de Quintana Roo; es un territorio insular entre las coordenadas extremas, al norte 20° 36', al sur 20°16' de latitud norte; al este 86° 44' y oeste 87° 20' de longitud oeste (INEGI, 2018). De acuerdo con los datos del INEGI (2018), tiene como colindancias al norte y al sur con el municipio de Solidaridad y el Mar Caribe; al este, con el Mar Caribe y al oeste con el

municipio de Solidaridad. El municipio tiene una extensión total 647.33 km² lo que representa el 1.27 % del estado. La isla tiene alrededor de 39 kilómetros de largo y una anchura media de 12.8 kilómetros. El clima es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano. La temperatura promedio anual es de 25.5 grados Celsius y las precipitaciones alcanzan los 1 504 milímetros anuales (Frausto-Martínez *et al.*, 2018). Los ciclones afectan de manera constante, aumentando la cantidad de lluvias en el verano. La isla está cubierta en casi toda su extensión por selva mediana subperennifolia cuya flora principal son: zapote, chacah, ramón, etcétera. En el 2016 contaba con un total de 100,363 habitantes de los cuales 50,396 son hombres y 49,966 son mujeres (COESPO, 2019).

La isla de Cozumel se forma entre el Mesozoico y Cenozoico a través de un sistema discordante de fallas de tipo pilar – graben o macizo tectónico, en la península de Yucatán, y cuya posición no ha cambiado en los últimos 200,000 años (Ward, 2004); en sí, la isla es un pilar tectónico con presencia de episodios de ascenso y descenso del nivel del mar coincidente con los periodos glaciares de hace 121 000 a 60000 años atrás (Kambesis y Coke, 2013), con un incremento en las dimensiones insulares durante los episodios donde el nivel del mar registró su máximo retroceso hace 15000 – 20000, generando grandes depósitos carbonatados alrededor de la isla (Ward, 1997) (Figura 1).

Este cuerpo insular se destaca por su alta karstificación, de dimensiones superficiales pequeñas entre 5 y 300 m, con profundidad de hasta 7 m (Frausto-Martínez *et al.*, 2018), siendo un parámetro coincidente a lo largo de la costa nororiental de la península de Yucatán y cuyos trabajos gruesos no han señalado con detalle (Fragoso-Servón *et al.*, 2014, Frausto-Martínez y Ihl, 2008). Para Kambesis y Coke (2013), esta densidad inusitada de depresiones y cavernas con profundidades de hasta 60 metros puede deberse a procesos de karstificación eogenética (un proceso de disolución de carbonatos durante una etapa temprana o penecontemporánea a la diagénesis). Este sistema de depresiones y cuevas eogenéticas de las pequeñas islas carbonatadas, en su mayor parte, no están involucradas significativamente en el drenaje superficial. Lo anterior, se refleja en el sistema de distribución de las cuevas que se limitan principalmente las unidades geológicas y las zonas hidrológicas: cuevas fluviales en el contacto entre carbonatos y rocas impermeables subyacentes, cuevas verticales a lo largo de fracturas de margen de plataforma; bolsillos freáticos (agujeros de plátano) a lo largo de la capa freática, y cuevas de margen lateral donde se forman cámaras de mezcla en la "interfaz" costera de agua dulce y salada (Vacher y Mylroie, 2002).

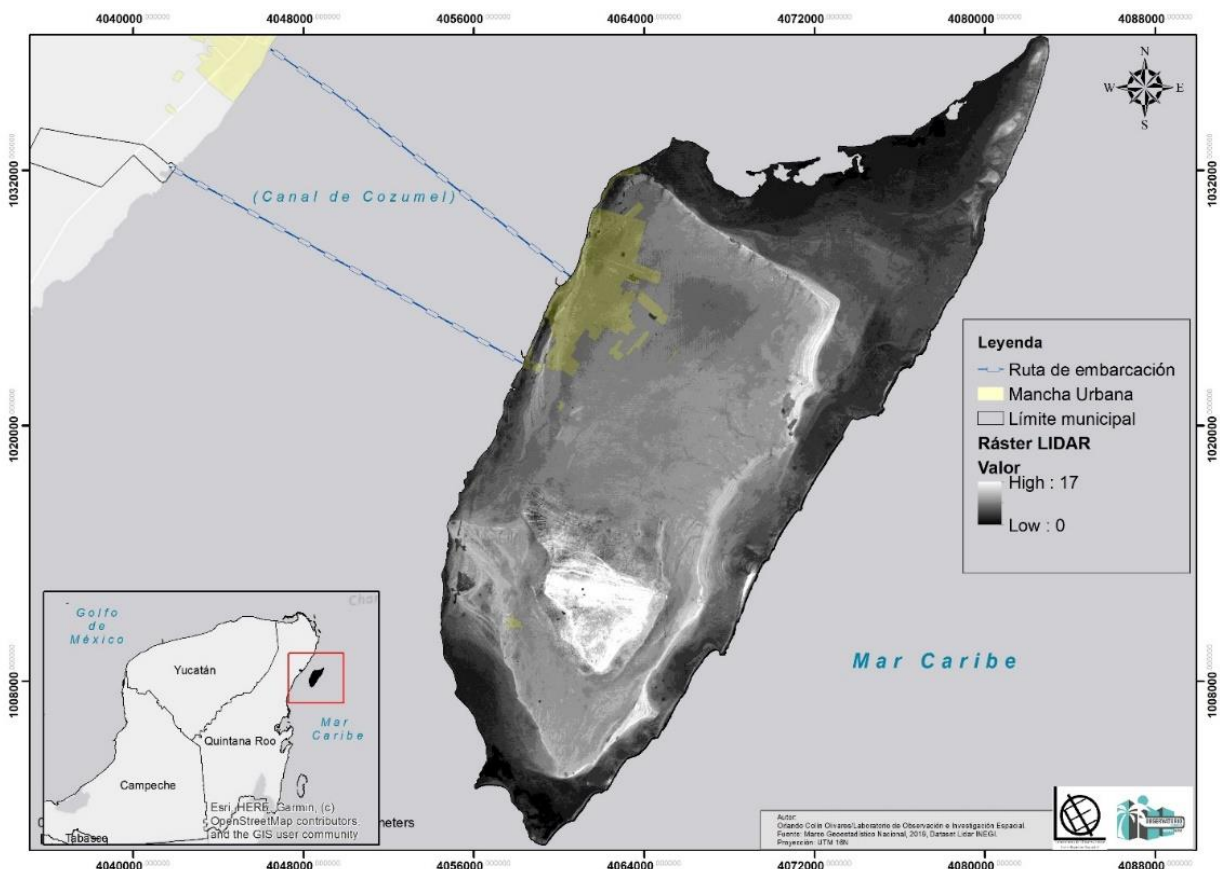


Figura 1. Mapa de ubicación de la isla de Cozumel. (Elaboración propia con base en datos LiDAR de INEGI, 2012 y 2019).

MÉTODOS Y TÉCNICAS

Área de estudio

La zona urbana de la isla de Cozumel cuenta con 100,363 habitantes (COESPO, 2019). La población se concentra en la zona urbana de San Miguel de Cozumel, cuya extensión territorial es de 2469.09 ha (INEGI, 2019); la ciudad es compacta, concentrando una densidad de población de 40.64 habitantes /km². Para el análisis de estudio se tomó como referencia el sistema de amanzanamiento y vialidades de (INEGI, 2018) (ver figura 2).

Técnicas y herramientas

La fase de técnicas y herramientas se dividió en tres apartados con el fin de lograr los objetivos y metas de la investigación (Figura 3):

Primera fase. Identificación y reconocimiento de depresiones kársticas de la zona urbana de Cozumel. Para ello, se tomó como referencia el proceso descrito por Frausto-Martínez *et al.*, (2018) y Colin-Olivares *et al.*, (2019), que persigue la diferenciación de depresiones en relieves de bajo contraste altitudinal

utilizando datos LiDAR. Posteriormente, se procesaron los datos de 32 archivos digitales de INEGI (2012), correspondiente a datos del terreno para generar un mosaico LiDAR para construir un marco de curvas de nivel que se procesaron, primeramente, en ArcGis 10.7 y, después, en Global Mapper 18. A partir de estas curvas de nivel, se interpolaron los datos para generar el modelo ráster del TIN (red irregular de triángulos), cuyo producto principal es el modelo digital de elevación y sus subproductos (modelos de pendientes, sombreado, terreno y el modelo 3D de elevaciones). Con estos insumos se reconocen las depresiones del terreno.

Segunda fase. Diferenciación del tipo de formas en función de sus características morfológicas. Para ello se reconocieron los elementos de largo y ancho de cada depresión (se diferenciaron y tipificaron de acuerdo con la relación ancho/largo, conocido como índice de elongación (Basso *et al.*, 2013, Kobal *et al.*, 2015, Telbisz *et al.*, 2016); se identificó la profundidad de cada unidad, con una resolución de 0.25 cm, y se diferenció la unidad en función de su génesis (exokárstica y antropogénica) y por tipo de forma (dolina, úvala o polje) de acuerdo con los principios de (Fragoso-Servón *et al.*, 2014).

Tercera fase: Reconocimiento de los usos del suelo. Se consideraron los datos vectoriales del sistema urbano de uso del suelo (PDU, 2018). Se destacaron las siguientes categorías: a) tipo de densidad habitacional (alta, baja, media), b) vialidades y c) zonas y servicios urbanos. Finalmente, se realizaron recorridos de campo con el fin de corroborar las vinculaciones entre las depresiones, su tipo y el uso del suelo (Figura 4), además de su confrontación con los problemas y elementos de presión, estado y respuesta que guarda la gestión de las depresiones en la ciudad.

RESULTADOS

Los hallazgos se presentan en dos apartados: características morfológicas de las depresiones, y las depresiones en el contexto urbano.

Características morfológicas de las depresiones

Por medio del uso de insumos de percepción remota, es posible la identificación de 1219 depresiones. Sin embargo, para el análisis se consideraron aquellas cuya resolución espacial de la capa de vectores es mayor a 25 m² y con profundidad a partir de -25 cm (1198

depresiones), siendo la máxima de -6.75 m. Cerca del 59 % de las depresiones tienen menos de 1 m de profundidad, 19% entre 1 y 4 m, y el 21% más de 4 m de profundidad (Figura 5).

En el caso del tipo de forma y su categoría según el índice de elongación, debido a la escala de detalle en que se trabajó, se adaptaron los límites que señala Frago-Servón *et al.*, (2014), que resultó en cuatro categorías que se exponen en la tabla 1. Así, el 7.5% corresponde a unidades de dolinas de forma redonda, las cuales no superan los 3.5 m de profundidad. La segunda categoría corresponde a una transición entre dolinas y úvalas, con índices de 1.25 a 1.75, siendo 395 unidades y no supera los 4 m de profundidad. Las úvalas representan el 16 % de las unidades y presentan formas de transición entre ovaladas y rectangulares, con un índice máximo de 2.0 y la profundidad máxima es de 6.75 m. Finalmente, los poljes u otras formas mayores (cuerpos de agua y canteras), presentan índices superiores de hasta 7.74 y profundidades de 6.75 m., representan el 43% del total de las unidades (ver Figura 6). Cabe considerar que se eliminaron 21 unidades con menos de 25 m².

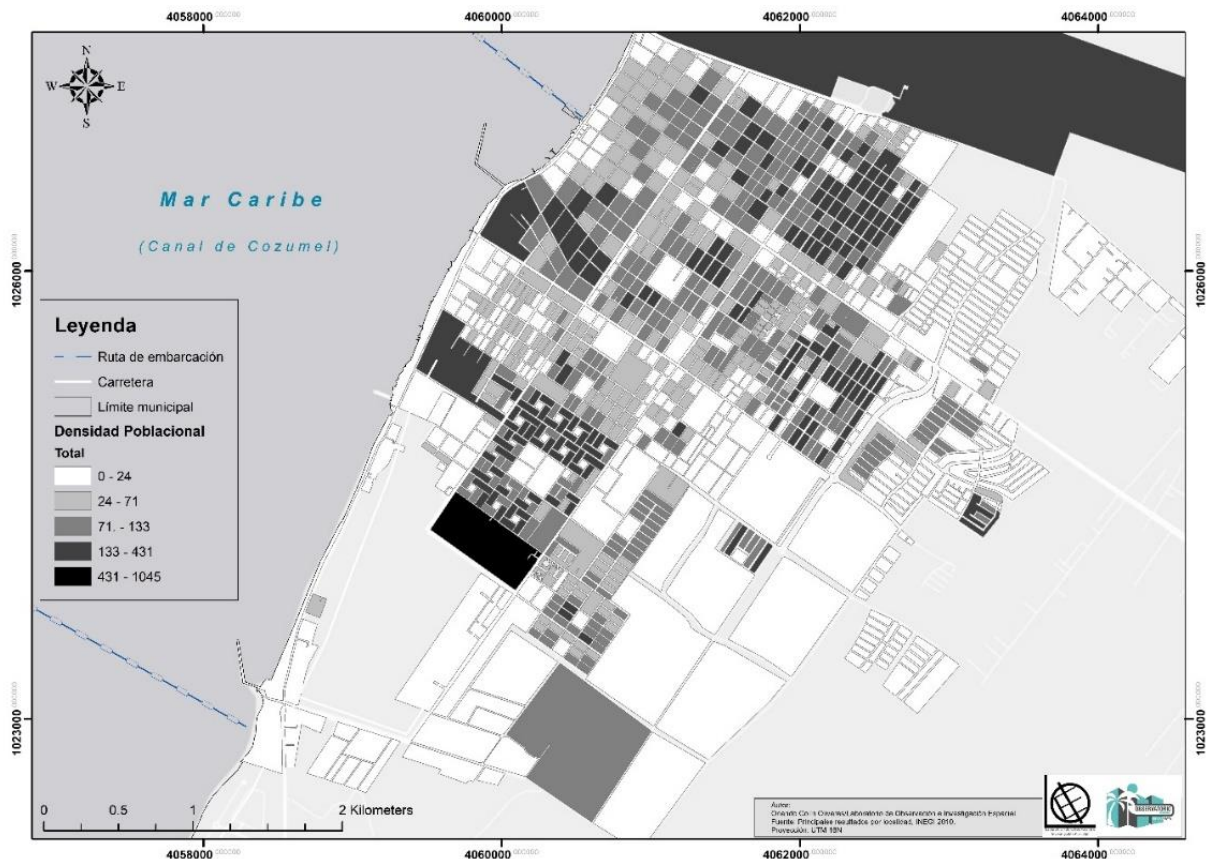


Figura 2. Mapa de densidad de población a nivel manzana para el área urbana de la ciudad de Cozumel. (Elaboración propia con base en INEGI, 2018).

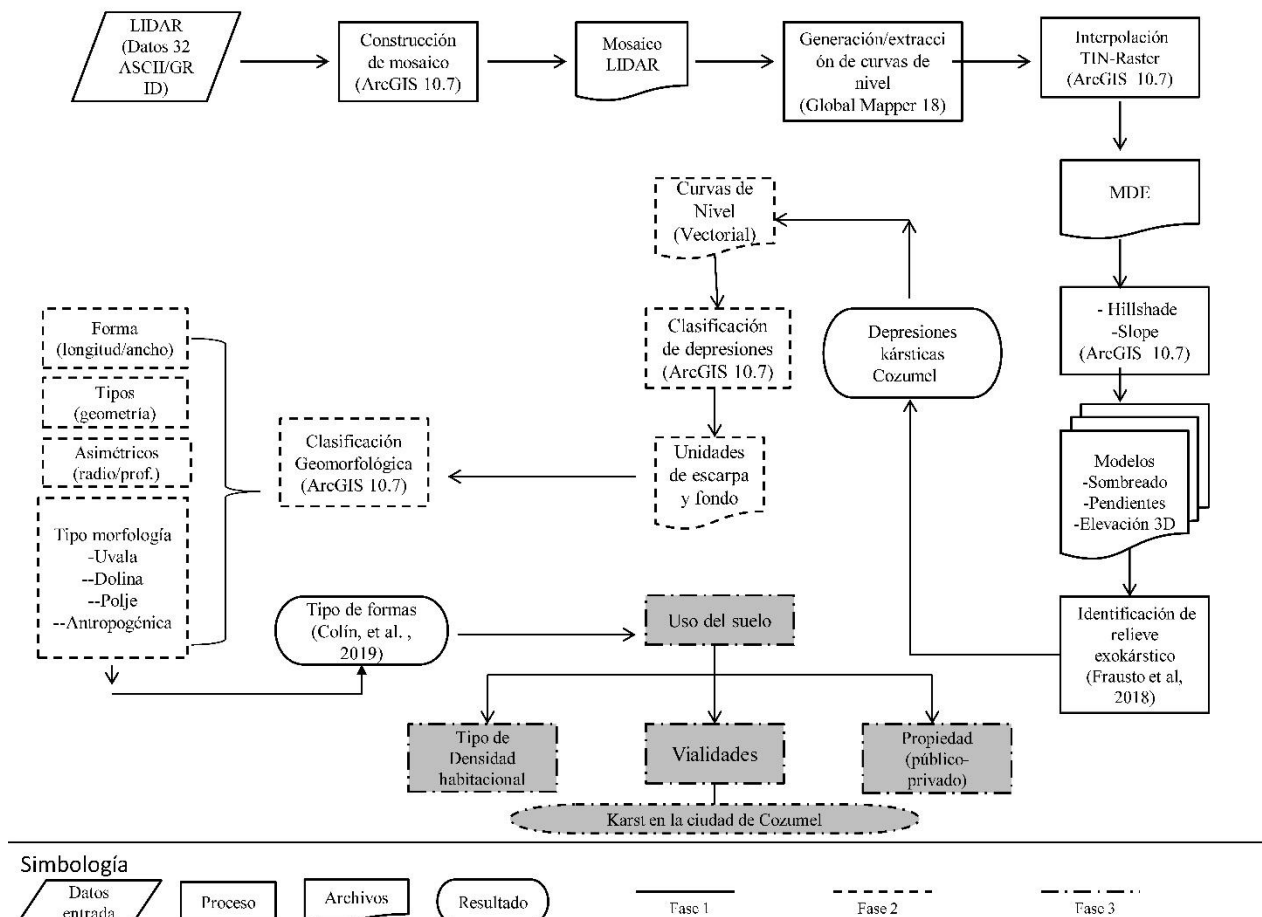


Figura 3. Diagrama metodológico para el estudio de karst en la ciudad.

Relación de área y profundidad. La resolución de los datos LiDAR es a 5 m en la horizontal, motivo por el cual se consideraron para el análisis aquellas depresiones con más de 25 m², descartando 184 unidades (que representan el 15% del total). Se realizó una relación entre área y profundidad de la depresión (ver figura 6), donde se reconocen cuatro categorías en función del área, con su representación porcentual respectiva (Tabla 2): pequeñas (menor a 25m², 18.11%); medianas (entre 25 y 100 m², 19.61 %); grandes (entre 100 y 500 m², 18.52%) y Muy Grandes (> 1000 m², 28.38%).

La relación entre la forma de la unidad (índice de elongación), el tipo de unidad (dolinas, dolina – úvala, úvala y polje), su categoría (diferenciación por área en m²) y el área, nos permite diferenciar 1014 depresiones, donde el 60% es de carácter irregular – rectangular, señalando un eje mayor de disolución. Asimismo, se reconoce una diferenciación en cuanto a la profundidad, siendo los 3.0 m una frontera entre las unidades pequeñas y medianas, con respecto a las grandes y muy grandes. La tabla 3 sintetiza las relaciones de los parámetros morfológicos de las depresiones de la ciudad de Cozumel. Ver Figura 8.

La distribución de las depresiones en el contexto urbano.

La zona urbana se subdivide en ocho zonas. Las primeras corresponden al uso habitacional urbano (de densidad alta, media y baja) y habitacional turístico (residencial), comercial, de equipamiento y mixto. Además, de la zona industrial, turística, de amortiguamiento y verde. Su distribución es típico de una ciudad litoral, a manera de sistemas paralelos, de la costa hacia el interior, se reconocen las zonas de uso turístico, residencial turístico y equipamiento, a las de uso urbano de baja a alta densidad. Cabe destacar, que en la última franja se ubican los asentamientos irregulares de viviendas (Las Fincas, Huertos Familiares y Ranchitos) (Ruiz *et al.*, 2015). Por otro lado, se diferenciaron a las manzanas de la ciudad en cinco zonas de acuerdo con su densidad de población, correspondiente a las unidades de uso del suelo habitacional y siendo los valores de hasta 1045 habitantes por manzana (Figura 9). La distribución de las depresiones por áreas de densidad urbana y zonas de uso, así como de densidad de población a nivel manzana se muestra en la figura 10.

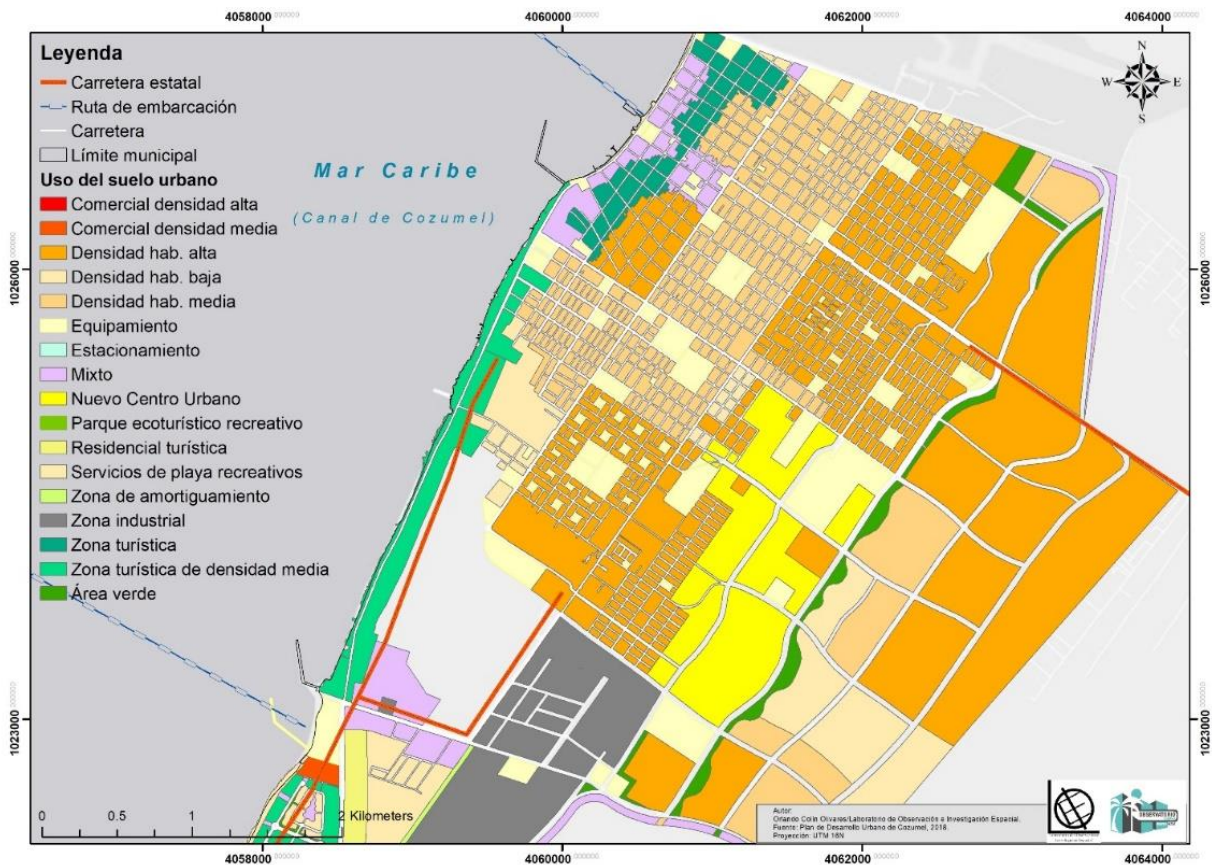


Figura 4. Mapa de uso del suelo a nivel manzana para el área urbana de la ciudad de Cozumel. (Elaboración propia con base en PDU, 2018).

Intervalos en metros	Unidades	Frecuencia
< -1	717	58.9344
-1 a -2	41	3.3607
-2 a -3	42	3.4426
-3 a -4	161	13.1967
-4 a -5	245	20.0820
-5 a -6	9	0.7377
> -6	3	0.2459
Total	1198	100

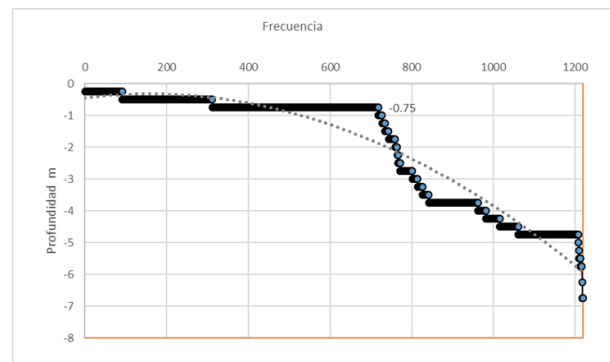


Figura 5. Intervalos y gráfica de distribución de profundidad de las depresiones identificadas. (Elaboración propia).

Tabla 1. Índice de elongación forma, categoría de unidades y porcentaje en el universo de estudio.

Índice	Forma	Categorías	Unidades	%
< 1.25	Redondas	Dolinas	90	7.51
1.25 a 1.75	Redondas a Ovaladas	Dolinas – úvalas	395	32.97
1.75 a 2.0	Ovaladas a rectangulares	Úvalas	197	16.44
> 2.0	Rectangulares	Poljes u otros	516	43.07
Total			1198	100

Fuente: Elaboración propia.

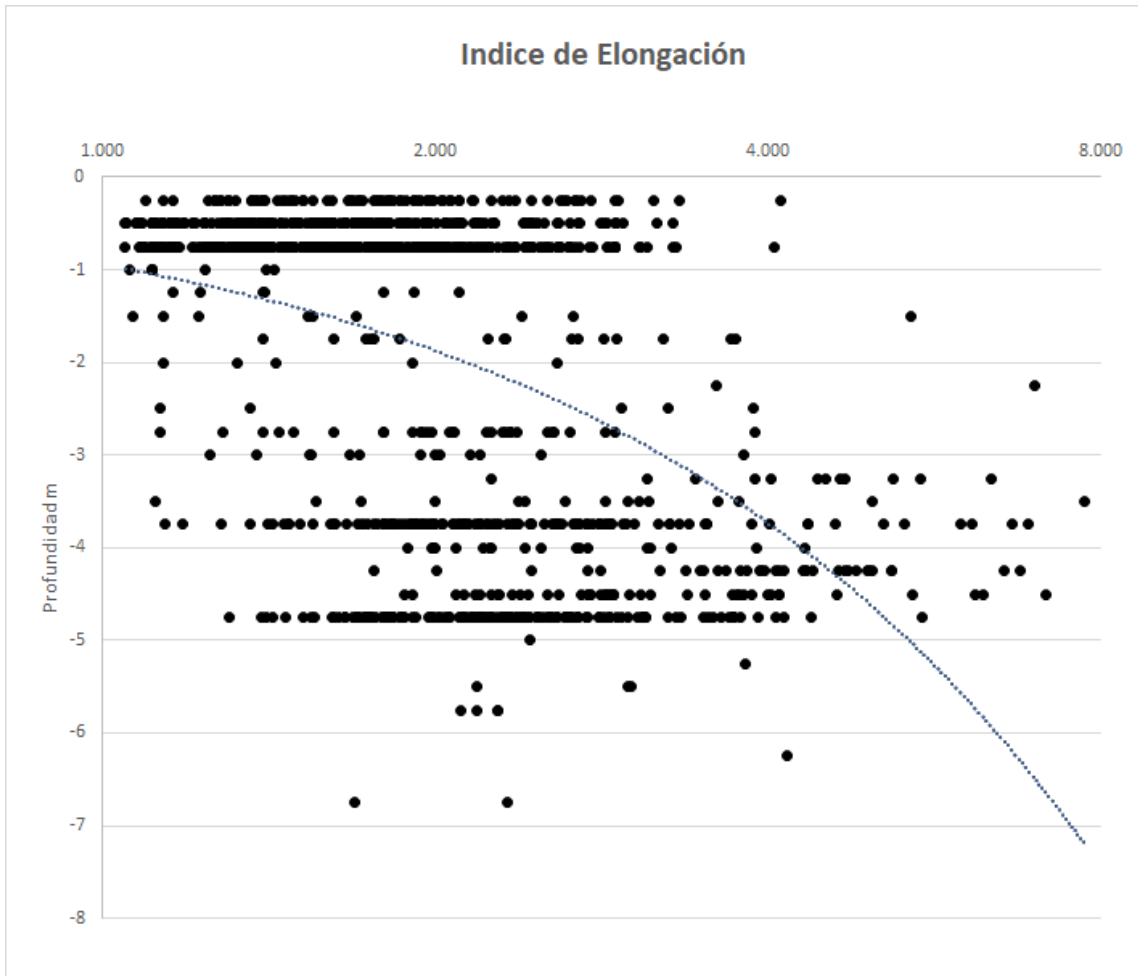


Figura 6. Relación de las depresiones de acuerdo con la profundidad e índice de elongación. (Elaboración propia).

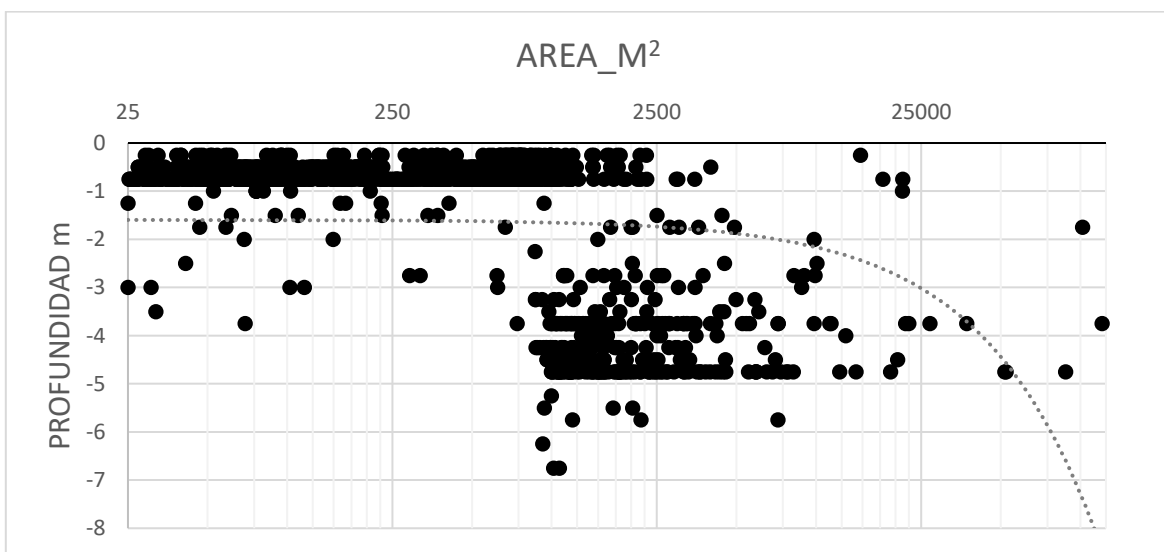


Figura 7. Relación área con profundidad de las depresiones kársticas.

Tabla 2. Diferenciación de categorías según la dimensión del área de las depresiones.

Área m ²	Unidades	Frecuencia	Categoría
< 25	184	15.36	Descartadas
25 a 100	217	18.11	Pequeñas
100 a 500	235	19.62	Medianas
500 a 1000	222	18.53	Grandes
> 1000	340	28.38	Muy Grandes
Total	1198	100	

A raíz del reconocimiento de las unidades kársticas, de los usos de suelo y los recorridos de campo, se identificaron problemas, sistemas de presión, estado y respuesta para la gestión, así como los entes particulares involucrados en el manejo de las depresiones kársticas en la ciudad, sobre todo, cuando no hay una ley de protección y manejo del karst. (Tabla 4).

DISCUSIÓN

Por medio de un análisis detallado del relieve con insumos de datos LiDAR, se reconocieron 1219 depresiones en una ciudad de 2469 ha, lo que hace de una densidad de 40 depresiones por ha y permite una diferenciación detallada del relieve kárstico no reportado en los estudios previos de Frago-Servón *et al.*, (2014) y Frausto-Martínez *et al.*, (2018).

Tabla 3. Relaciones morfológicas de las depresiones en la ciudad de Cozumel.

Forma de la Unidad	Tipo	Categoría	Unidades	Representación	Profundidad
Redondas	Dolinas	Pequeña	54	5.325	< 3.0
		Mediana	21	2.071	< 3.0
		Grande	1	0.099	< 3.0
		Muy grande	1	0.099	< 3.0
Redondas a Ovaladas	Dolinas - úvalas	Pequeña	107	10.552	< 3.0
		Mediana	127	12.525	< 3.0
		Grande	58	5.720	>3.0
		Muy grande	33	3.254	>3.0
Ovaladas a rectangulares	Úvalas	Pequeña	21	2.071	< 3.0
		Mediana	46	4.536	< 3.0
		Grande	56	5.523	> 3.0
		Muy grande	37	3.649	> 3.0
Rectangulares	Poljes	Pequeña	38	3.748	< 3.0
		Mediana	41	4.043	< 3.0
		Grande	106	10.454	> 3.0
		Muy grande	267	26.331	> 3.0
Total			1014	100	

Fuente: Elaboración propia.

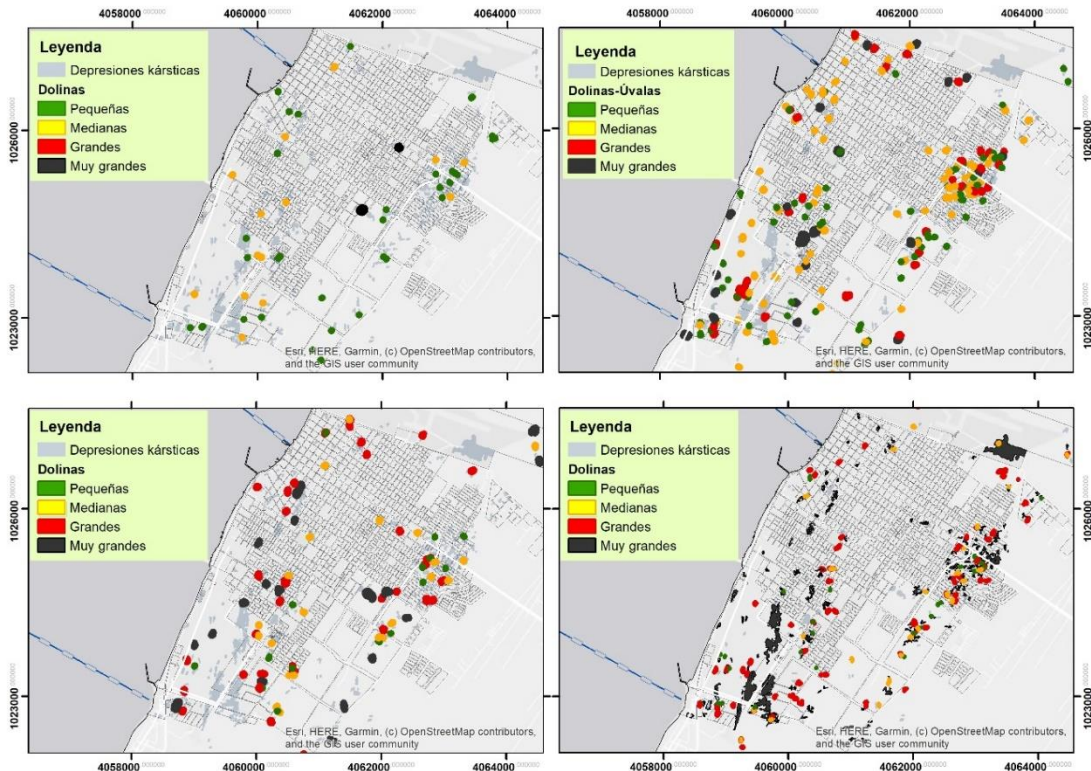


Figura 8. Mapa de diferenciación de formas exokársticas según su tipo, forma y tamaño.

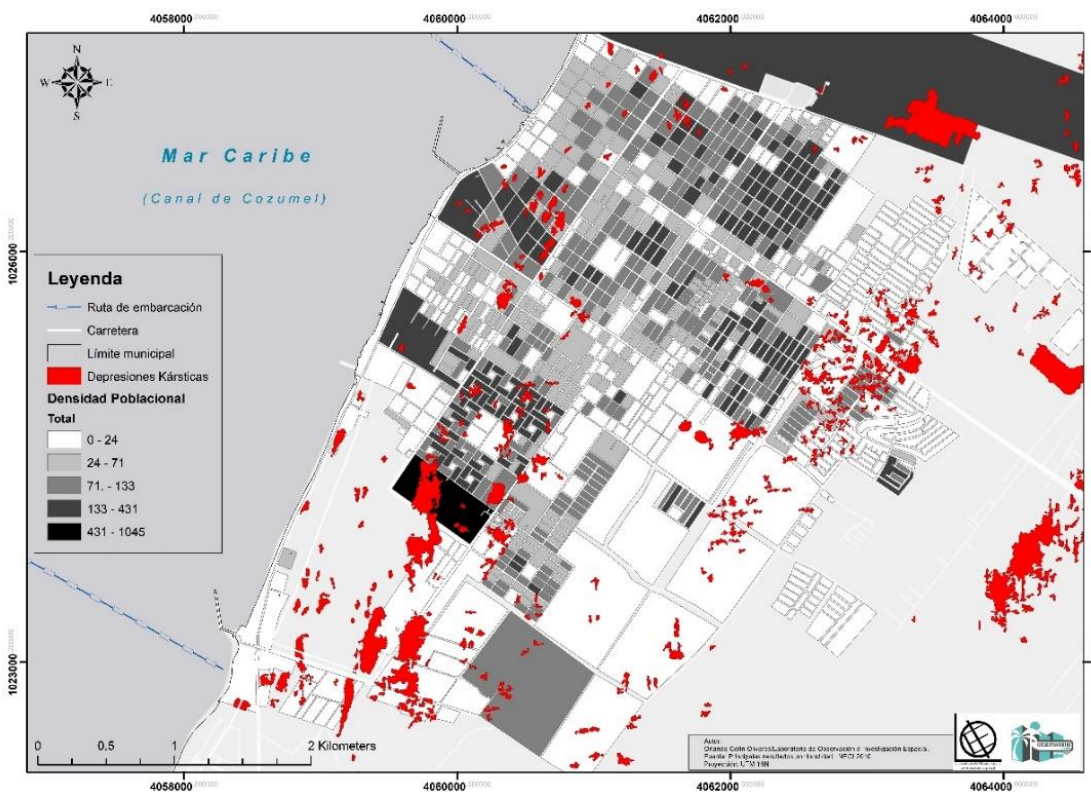


Figura 9. Distribución de las depresiones kársticas en la ciudad y su vínculo con las zonas de densidad de habitantes a nivel manzana (Elaboración propia con base en INEGI, 2018).

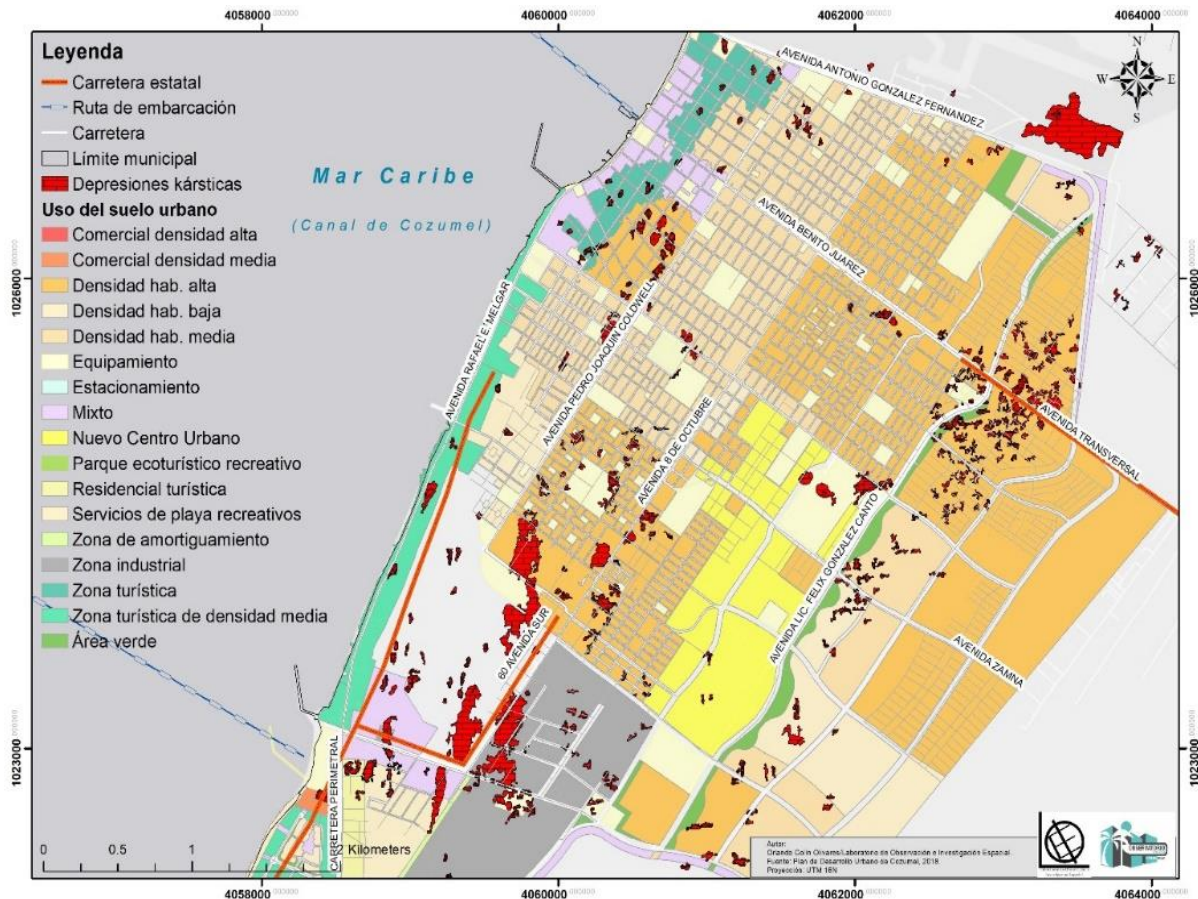


Figura 10. Uso del suelo y distribución de depresiones en la ciudad. (Elaboración propia con base en el PDU 2018).

Los patrones detallados identificados contribuyen a la caracterización del karst en zonas de bajo contraste de relieve y es una ventana de conocimiento en la península de Yucatán. La distribución espacial de las depresiones no es uniforme, así como su dimensión y su profundidad. La presencia de unidades mayores tipo polje, paralelas a la línea de costa, se puede explicar bajo el esquema eogenético de Kambesis y Coke (2013), donde se reconoce su disposición paralela a los sistemas de paleodunas y frontera litológica (ver Figura 11).

Se reconoce la ausencia de un inventario de las depresiones (censo o registro, y sus características) por parte de los gestores de la ciudad, aunado a la ausencia de una reglamentación urbana en el contexto del plan de desarrollo urbano municipal. Las zonas de mayor densidad de la ciudad coinciden con las zonas de mayor presencia de depresiones; asimismo, las nuevas áreas urbanas (al oriente de la ciudad) presentan una tendencia de desarrollo similar (alta densidad y presencia alta de depresiones), lo cual se refleja en inundaciones, encharcamientos, hundimientos y agrietamientos del terreno de las vías de comunicación y espacios públicos.

Tabla 4. Ejemplos de problemáticas para la gestión del karst en la ciudad.

Problema	Presión	Estado	Respuesta	Ente de regulación
Contaminación del agua del subsuelo	Drenajes y vertederos de aguas no tratadas conectados directo al subsuelo	Viviendas sin servicio de drenaje y agua potable	Clausura y Regulación	PROFEPA – Dirección de desarrollo urbano y medioambiente
Vertedores de residuos sólidos y aguas residuales a cielo abierto	Basureros y fosas sépticas y pozos clandestinos de agua	Viviendas conectadas a sistemas de agua a través de pozos	Clausura y orientación de manejo	PROFEPA, Protección civil, Dirección de desarrollo urbano y medioambiente
Movimientos diferenciales del terreno	Hundimientos, subsidencias, agrietamientos, sufusiones	Reportes puntuales	Acciones de relleno para vía pública	Protección civil
Depresiones	Número de depresiones - Desconocimiento del inventario total	Regiones diferenciadas de alta densidad de población	Inventario y manejo (protección, conservación, aprovechamiento)	Dirección de desarrollo urbano y medioambiente
Inundaciones	Zonas de deficiente drenaje	Zonas urbanas de inundación ordinaria y extraordinaria	Nivelación y drenajes	Protección civil
Visitas masivas	Ausencia en la regulación de las visitas a cenotes y grutas	Número excesivo de visitantes	Manejo del visitante	Dirección de desarrollo urbano y medioambiente Dirección de economía y finanzas, Protección civil
Usos previos a la regulación	Uso incompatible del suelo	Ausencia de regulación y desfase temporal de permisos de uso	Canteras, vertedores de aguas negras, toma de agua, invernaderos, balneario o poza de recreación, jardines ornamentales, gasolineras, talleres mecánicos, restaurantes y hoteles.	Dirección de desarrollo urbano y medioambiente

Fuente: Elaboración propia.

La ausencia de un análisis sobre los servicios ecosistémicos que representan estas depresiones da por resultado una serie de prácticas urbanas poco compatibles (vertederos de desechos sólidos, relleno de materiales, extracción de agua, viveros, banco de materiales), además de ser integrados como parte de un patrimonio particular y no colectivo (sobre aquellas depresiones que tienen menos de 25 m²). Por otro lado, se han generado

modelos de gestión de estos patrimonios naturales: gubernamentales (parques ecológicos o públicos), privados (viveros y empresas de extracción de agua) y sociales (adopción de parques públicos por parte de organizaciones civiles como objeto de conservación y protección), estos elementos dan pie a lo que hemos denominado: la gestión del karst en la ciudad.

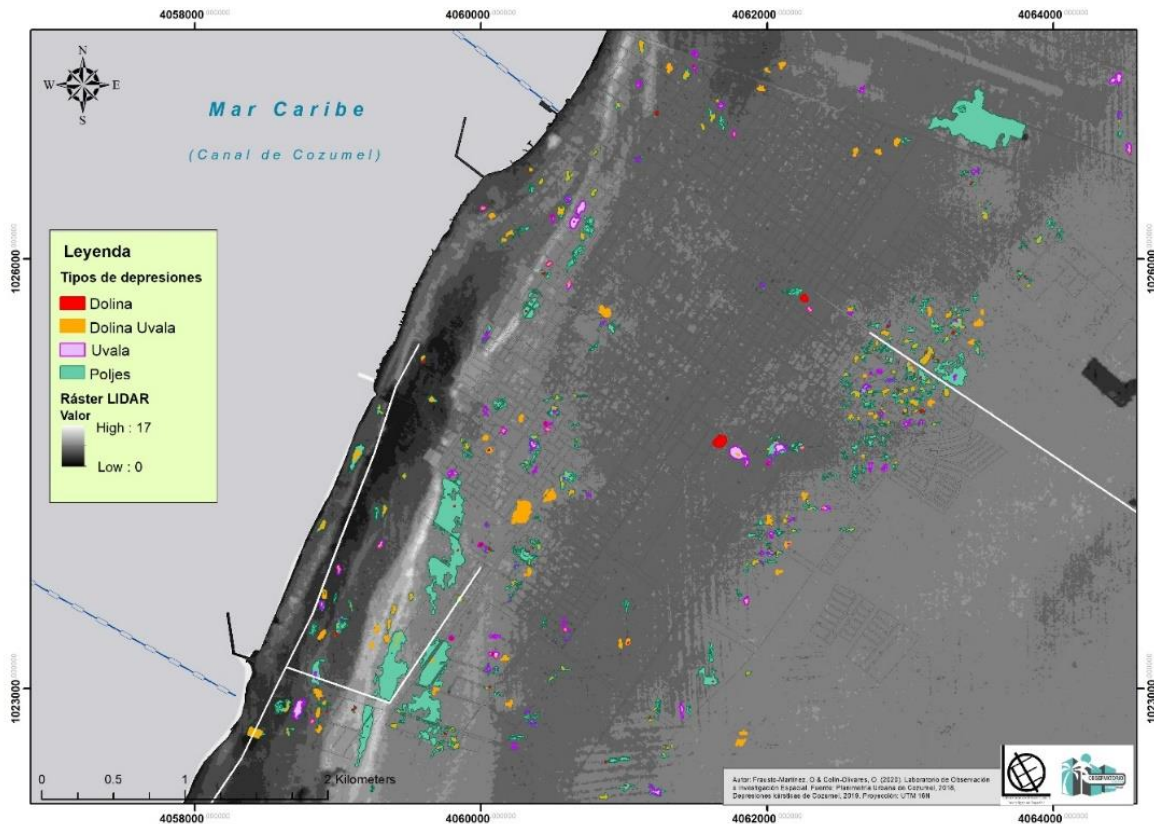


Figura 11. Distribución y tipo de depresiones en la ciudad de acuerdo con su forma.

CONCLUSIÓN

La gestión del karst en la ciudad es una tarea de acción pública que involucra una serie de elementos relacionados con el manejo de un bien natural, lo cual implica la valoración y decisión para denominar las unidades kársticas a nivel de patrimonio. Para ello, es necesario contar primeramente con inventarios o censos que ayuden a dimensionar su presencia, tipos y valoración a nivel de la ciudad. Segundo, entender el valor del karst como un bien natural, económico y cultural de acuerdo con los servicios socioecosistémicos.

Los insumos legales considerados en la planificación de las ciudades no consideran al karst como un elemento de riesgo. Se han centrado en el elemento de protección y preservación, dejando a un lado los procesos de exploración, investigación, determinación de análisis de estructuras y exposición del riesgo para la población, de ahí que se considere exclusivamente la zona identificada de la depresión, cueva o gruta como un sistema de puntos de ubicación y no de áreas interconectadas en el subsuelo. Asimismo, los diversos organismos de regulación en el desarrollo urbano municipal,

descoordinados y con funciones contradictorias (direcciones de medio ambiente contra direcciones de desarrollo urbano o desarrollo económico) y de nivel jurídico diverso (cuando la unidad kárstica implica la relación de sistemas de gestión nacional, agua, mangle o de carácter litoral).

El karst en la ciudad es una línea de investigación que debe abordarse de manera multidisciplinar, brindando los conocimientos sobre las funciones de los sistemas, pero también los saberes de apropiación comunitaria y cultural que permitan su gestión, ya sea en su manejo: protección, aprovechamiento y uso.

Agradecimiento

Se agradece a los revisores por sus comentarios y observaciones, los cuales mejoraron substancialmente este trabajo. Al Dr. Cesar Daniel Aguilar Becerra por el apoyo brindado en la edición y revisión de las fuentes de datos y referencias.

Financiamiento. El presente estudio se lleva a cabo bajo el financiamiento de la Universidad de

Quintana Roo, empleado 0400, Plan Anual de labores – Investigación.

Conflicto de interés. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

Cumplimientos de normas éticas. La presente revisión se desarrolló bajo el código de ética de la Universidad de Quintana Roo.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con el autor de correspondencia (ofrausto@uqroo.edu.mx), con previa solicitud por correo electrónico.

REFERENCIAS

- Aguilar, D.Y., Bautista, F., Mendoza, M.E. y Delgado, C. 2013. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and subtropical agroecosystems* 16(2) 243-263.
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M. y Pepe, M. 2013. Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environmental earth sciences* 70(6) 2545-2559.
- Beck, B. 1996. Karst geohazards: engineering and environmental problems in karst terrane. *Proceedings of the 5th multidisciplinary conference, Gatlinburg, April 1995. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts.*
- Brinkmann, R. y Parise, M. 2012. Karst environments: problems, management, human impacts, and sustainability. An introduction to the special issue. *J Cave Karst Stud* 74(2) 135-136.
- CENAPRED. 2014. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México [online]. Available at: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/36-DIAGNOSTICODEPELIGROSEIDENTIFICACIONDERIESGOSDEDESASTRESENMXICO.PDF> [Accessed 24 de agosto 2020].
- COESPO. 2019. Proyección de población al 2019. Consejo Estatal de Población, Quintana Roo [online]. Available at: <http://coespo.qroo.gob.mx/Descargas/doc/PUBLICACIONES%20DE%20INTE>
- RES/POBLACION_QROO_2019.pdf [Accessed 15 de agosto 2020].
- Colin-Olivares, O., Frausto-Martínez, O. y Rodríguez, C. 2019. Cálculo automatizado de la profundidad de depresiones kársticas a escala detallada. In O. Frausto-Martínez ed. *Conocimientos y saberes del karst tropical en México. Acts With Science.* pp. 55-78.
- Contreras, T. y Frausto-Martínez, O. 2019. Indicadores de sustentabilidad de la calidad del agua de pozo en un asentamiento irregular en zonas kársticas. In O. Frausto-Martínez ed. *Conocimientos y saberes del karst tropical en México. Acts With Science.* pp. 117-135.
- Cooper, A.H. 2002. Halite karst geohazards (natural and man-made) in the United Kingdom. *Environmental Geology* 42(5) 505-512.
- Escolero, O. et al. 2002. Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: the Merida Yucatan, Mexico case study. *Water Resources Management* 16(5) 351-367.
- Espinasa-Pereña, R. 2007. El Karst de México. Mapa NA III 3. Nuevo Atlas Nacional de México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fleury, S. 2009. Land use policy and practice on karst terrains: Living on limestone. USA: Springer Science & Business Media.
- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto-Martínez, O. y 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) 127-137.
- Fragoso-Servón, P. et al. 2020. Soils in extreme conditions: the case of the catenas karst-marsh-coastline in the Mexican Caribbean. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 72(2) A220819.
- Fragoso-Servón, P. y Pereira-Corona, A. 2018. Suelos Y Karst, Origen De Inundaciones Y Hundimientos En Chetumal, Quintana Roo, México. *European Scientific Journal*(14).

- Frausto-Martínez, O. y Ihl, T. 2008. Capítulo 2. Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México 41-54.
- Frausto-Martínez, O. et al. 2010. Vulnerabilidad a la inundación en las formas exocarsticas del noreste de da Península de Yucatan. Universidade de Coimbra. Portugal. 1-10.
- Frausto-Martínez, O., Zapi-Salazar, N.A. y Colin-Olivares, O. 2018. Identification of Karst Forms Using LiDAR Technology: Cozumel Island, Mexico. Trends in Geomatics-An Earth Science Perspective. IntechOpen.
- Gobierno del Estado de Yucatán. 2014. Decreto 193/2014 por el que se expide el Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán en Materia de Cenotes, Cuevas y Grutas [online]. Available at: http://legismex.mty.itesm.mx/estados/ley-yuc/YUC-R-ProtMedioAmbCenCueGru2014_06.pdf [Accessed 24 de agosto 2020].
- H. Ayuntamiento de Mérida. 2014. Reglamento de cenotes, cuevas y pozos comunitarios del municipio de Mérida. Gaceta Municipal, 31-01-2017 [online]. Available at: https://isla.merida.gob.mx/serviciosintern et/normatividad/files/Reglamentos/CENOTES_POZOS.pdf [Accessed 24 de agosto 2020].
- H. Ayuntamiento de Solidaridad. 2017. Reglamento de actividades en cenotes, cavernas y grutas del municipio de Solidaridad, Quintana Roo. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, el 21 de noviembre de 2017 [online]. Available at: <http://gobiernodesolidaridad.gob.mx/category/Transparencia/FraccionI/REGLAMENTOS/70UVTAIP.pdf> [Accessed 24 de agosto 2020].
- H. Ayuntamiento de Tulum. 2018. Reglamento de cenotes y cavernas del municipio de Tulum. Acta de cabildo del Ayuntamiento de Tulum [online]. Available at: <http://tulum.gob.mx/Pdfs/INFO%20XL/S G2TRIM/REGLAMENTOS/REGLAMENTO%20DE%20CENOTES%20Y%20CAVERNAS.pdf> [Accessed 24 de agosto 2020].
- Hernández, M.L. 2019. Riesgo de hundimientos y subsidencia kárstica en la zona maya de Quintana Roo. In O. Frausto ed. Conocimientos y saberes del karst tropical en México. México. Conocimientos y saberes del karst tropical en México. México. pp. 115-235.
- Ihl, T. et al. 2007. Identification of geodisasters in the state of Yucatan, Mexico. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen 246(3) 299-311.
- INEGI. 2012. Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. ASCII. Municipio de Cozumel. Instituto Nacional De Estadística Y Geografía. México [online]. Available at: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=1015> [Accessed 24 de agosto 2020].
- INEGI. 2018. Carta topográfica F16D71 a y b, escala 1:20,000. Instituto Nacional De Estadística Y Geografía. México [online]. Available at: <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/> [Accessed 24 de agosto 2020].
- INEGI. 2019. Marco geoestadístico nacional. Instituto Nacional De Estadística Y Geografía. México [online]. Available at: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/> [Accessed 24 de agosto 2020].
- Kambesis, P.N. y Coke, J.G. 2013. Overview of the controls on eogenetic cave and karst development in Quintana Roo, Mexico. Coastal Karst Landforms. Springer. pp. 347-373.
- Kobal, M. et al. 2015. Using lidar data to analyse sinkhole characteristics relevant for understory vegetation under forest cover—Case study of a high karst area in the Dinaric Mountains. PloS one 10(3) e0122070.
- Koch, C. et al. 2016. Impact on groundwater of a karstic aquifer in the informal settlement “Las Fincas” on Cozumel Island, Mexico. WIT Transactions on Ecology and the Environment 203 147-158.
- Liszkowski, J. 1975. The influence of karst on geological environment in regional and urban planning. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association

- Internationale de Géologie de l'Ingénieur 12(1) 49-51.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J.F. y Espinosa-Pereña, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 10(2) 143-150.
- Martínez-Salvador, C., Moreno-Gómez, M. y Liedl, R. 2019. Estimating pollutant residence time and NO₃ concentrations in the Yucatan karst aquifer; considerations for an integrated karst aquifer vulnerability methodology. *Water* 11(7) 1431.
- Oropeza, O. et al. 1999. Impacto ambiental y peligros naturales y antrópicos en la península de Yucatán. *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán* 251-266.
- Parise, M., Qiriazzi, P. y Sala, S. 2004. Natural and anthropogenic hazards in karst areas of Albania. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4(4) 569-581.
- PDU 2018. Vectores del plan de desarrollo municipal de Cozumel. Catastro Municipal del H. Ayuntamiento de Cozumel. In H. A. d. Cozumel ed. Cozumel, Quintana Roo.
- Ruiz, I., Frausto-Martínez, O. y Hernández, E. 2015. Precariedad de la vivienda en asentamientos irregulares en los destinos turísticos: Cozumel, Quintana Roo México. *Investigación y desarrollo* 5(17) 36-43.
- Telbisz, T. et al. 2016. The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets—Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica* 45(1).
- Vacher, H.L. y Mylroie, J.E. 2002. Eogenetic karst from the perspective of an equivalent porous medium. *Carbonates and Evaporites* 17(2) 182.
- Ward, W.C. 1997. Geology of coastal islands, northeastern Yucatan Peninsula. *Geology and hydrogeology of carbonate islands. Developments in Sedimentology*. pp. 275-298.
- White, E.L., Aron, G. y White, W.B. 1986. The influence of urbanization of sinkhole development in central Pennsylvania. *Environmental Geology and Water Sciences* 8(1-2) 91-97.
- White, W.B. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University. New York.
- Williams, M.A. y Ziegler, S. 2014. Local Regulatory Protection for Ecosystem Services: A Case Study from the Karst Region of Southeast Minnesota, USA. *Journal Articles* 55(1) 1-17.