





Caracterización morfométrica de depresiones kársticas: zona costera nororiente de la península de Yucatán, México

Morphometric characterisation of karst depressions: coastal zone of the north-eastern Yucatan peninsula, Mexico

José Francisco Rodríguez-Castillo¹ ,
Oscar Frausto-Martínez^{1*} ,
Wilbert David Uhu-Yam¹ ,
Orlando Colín-Olivares¹ 

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

*Autor de correspondencia:
ofrausto@uqroo.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 07 de diciembre
2021

Aceptado: 29 de abril 2022

Como citar: Rodríguez-Castillo JF, Frausto-Martínez O, Uhu-Yam WD, Colín-Olivares O (2022) Caracterización morfométrica de depresiones kársticas: zona costera nororiente de la península de Yucatán, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(2): e3216. DOI: 10.19136/era.a9n2.3216

RESUMEN. Estudiar el relieve a través del análisis morfológico permite tipificar formas, elementos y estructuras del relieve kárstico que auxilia en la determinación de la génesis, evolución y dinámica geomorfológica. La implementación de herramientas con nuevos métodos y tecnologías ayuda a desarrollar estudios de mayor precisión en zonas con bajo contraste altitudinal. El objetivo del presente estudio fue analizar y clasificar las depresiones kársticas en la región costera del nororiente de la península de Yucatán. El relieve kárstico se analizó a partir de un mosaico de datos LiDAR (light detection and ranging) y del mosaico de datos AsterGDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). Ambas fuentes de datos se acoplaron para generar insumos altimétricos y modelos topográficos base. Con las curvas de nivel se diferenciaron depresiones con una profundidad mínima de 1 m; después, se procesaron y clasificaron las depresiones con análisis de mediciones morfométricas, tipología morfológica del perfil e índice de elongación. Se identificaron 10 672 depresiones, correspondiendo el 67% a depresiones tipo V, 23% tipo U y 10% tipo caja; con respecto al índice de elongación 18% son dolinas, 42% dolinas-úvalas, 13% úvalas y el 27% poljes, las úvalas y poljes poseen mayor complejidad, debido al control estructural del sistema de fallas Holbox, con una orientación principal de NE 7° SO y secundario SE 83° NO, que pone en evidencia en carácter disyuntivo estructural. Se presenta un inventario de depresiones kársticas, que sirven de base para la gestión del territorio kárstico costero.

Palabras clave: Aster, LiDAR, modelos acoplados, percepción remota.

ABSTRACT. Studying the relief through morphological analysis allows the typification of forms, elements and structures of the karst relief that helps in the determination of the genesis, evolution, and geomorphological dynamics. The implementation of tools with new methods and technologies helps to develop more precise studies in areas with low altitudinal contrast. The aim of the present study was to analyze and classify karst depressions in the north-eastern coastal region of the Yucatan Peninsula. The karst relief was analyzed from two data sources: a) a LiDAR (light detection and ranging) data mosaic and b) an AsterGDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) data mosaic. These were coupled to generate altimetric inputs and base topographic models. Subsequently, contour lines were generated by differentiating depressions with a minimum depth of 1m; depressions were then processed and classified by applying an analysis of morphometric measurements, profile morphological typology and elongation index. A total of 10,672 depressions were identified, 67% of which are V-type depressions, 23% U-type and 10% box-type; with respect to the elongation index, 18% are sinkholes, 42% sinkholes-uvala, 13% uvala and 27% poljes, being the uvalas and poljes the most complex, due to the structural control of the Holbox fault system, with a main orientation of NE7°SW and secondary SE83°NW, which highlights the disjunctive structural character. Finally, an inventory of karst depressions is presented, serving as a basis for the management of the coastal karst territory.

Key words: Aster, coupled models, LiDAR, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

La caracterización del relieve es importante porque ayuda entender los procesos que moldean el paisaje kárstico, estos estudios se han centrado principalmente en generar información de las formas del relieve presentes en un bajo contraste altitudinal y que, históricamente, en la información geográfica-cartográfica oficial se ha sobre generalizado y subestimado (Frausto-Martínez e Ihl 2008, Aguilar *et al.* 2016, Veress 2020, Rodríguez-Castillo *et al.* 2021). Los perfiles topográficos poseen gran importancia para demostrar gráficamente el comportamiento de una sección en particular con relación a su entorno, son una de las herramientas de análisis que complementan las aproximaciones de estudio clásico del relieve kárstico (Macedo y Souza 2018, Colín-Olivares *et al.* 2019, Jeannin *et al.* 2021). El estudio del relieve kárstico permite entender la génesis de las formas, así como la dinámica de los paisajes actuales, además de aportar huellas sobre la paleogeografía kárstica del planeta, la cual puede caracterizarse de más de una manera en función a sus características geológicas, climáticas, morfológicas, entre otras (Morais y Soriano 2017, Veress 2020). El análisis del relieve de bajo contraste altitudinal y en zonas de cobertura vegetal densa presenta retos que, con el uso de las tecnologías nuevas, y metodologías adaptadas, permite mejor fiabilidad y cantidad de datos, que generan índices y análisis morfométricos a escala fina (Li *et al.* 2021, Rodríguez-Castillo *et al.* 2021, Hawker *et al.* 2022). Por lo que la caracterización de las condiciones del entorno kárstico a nivel detallado contribuye al estudio del karst en zonas de bajo contraste de relieve y es una ventana de conocimiento en la península de Yucatán (Veress 2020, Frausto-Martínez *et al.* 2021).

El karst es un término utilizado para referirse al modelado de la superficie terrestre que posee rocas calizas u otras rocas solubles dominantes, siendo definido como postgénico, si la karstificación de la roca ocurre después de la formación de ésta, y singénico, si la karstificación de la roca ocurre durante su desarrollo (Fragoso - Servón *et al.* 2014, Veress 2020, Jeannin *et al.* 2021). Las zonas kársti-

cas presentan rasgos característicos tanto en la superficie como en el subsuelo, las formas negativas del exokarst y el endokarst son algunas expresiones kársticas naturales (Moreno-Gómez *et al.* 2018, Goldscheider *et al.* 2020). El karst puede ser dinámico o estático, esto se define por el sistema del entorno, en este caso el karst de la región es el único en el que la interacción del agua meteórica con las rocas altamente solubles conduce a un proceso de disolución a largo plazo, lo que hace que los acuíferos kársticos sean sistemas altamente heterogéneos y en continua evolución (Vacher y Mylroie 2002, Veress 2020, Jeannin *et al.* 2021, Suárez-Moo *et al.* 2022). En la región de la península de Yucatán predomina el karst de tipo dinámico debido al flujo superficial inexistente, esto como resultado de la considerable karstificación, la fisuración y las bajas pendientes, lo que hace que el agua de lluvia se infiltre a gran velocidad a través de fisuras y grietas (Lesser y Weidie 1988, Schoeneberger y Wysocky 2005, Camacho-Cruz *et al.* 2019, Veress 2020, Suárez-Moo *et al.* 2022).

El uso de tecnología LiDAR para el levantamiento topográfico permite la obtención de información altimétrica de zona de bajo contraste altitudinal y alta cobertura vegetal (Frausto-Martínez *et al.* 2018, Rodríguez-Castillo *et al.* 2021, Hawker *et al.* 2022), sin embargo, estos datos no se encuentran disponibles para toda la superficie terrestre. Otra fuente de información altimétrica es el ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model), el cual posee información altimétrica de toda la superficie terrestre, mediante la correlación imágenes estereoscópicas individuales. Este último, fungió de auxiliar para complementar la información altimétrica de las zonas carentes de información LiDAR (Abrams *et al.* 2020, Hawker *et al.* 2022). Un modelo digital de elevación (MDE) es una representación digital rasterizada de la topografía de la superficie del suelo o del terreno, cada celda rasterizada (o píxel) tiene un valor correspondiente a su altitud sobre el nivel del mar en la topografía (Abrams *et al.* 2020, Jeannin *et al.* 2021, Hawker *et al.* 2022). El relieve kárstico puede estudiarse a partir del moni-

toreo 3D y la generación de MDE, estos modelos se originan a partir de la extracción de datos altimétricos de MDT o la digitalización de las curvas de nivel e interpolación de los datos altitudinales, a partir de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Rodríguez-Castillo *et al.* 2021, Hawker *et al.* 2022). El acuífero es el más importante recurso en muchos procesos geológicos y la costa Este de la Península de Yucatán contiene uno de los sistemas kársticos más desarrollados en el mundo (Vuilleumier *et al.* 2013).

Las aproximaciones de los análisis del relieve kárstico se han centrado principalmente en generar información precisa acerca de las formas del relieve presentes en el suelo kárstico de la península de Yucatán. Fragoso - Servón *et al.* (2014) en el estado de Quintana Roo, generó índices morfométricos a escala 1:50 000, acentuando los métodos y algoritmos para la clasificación por índice de compacidad o de Gravelius de las depresiones kársticas, diferenciando poljes, úvalas y dolinas. Consecuentemente, Fragoso - Servón *et al.* (2016) reportan los procesos kársticos y la presencia de fallas con el uso de imágenes Landsat y cartografía escala 1:50 000, por medio de un enfoque geomorfopedológico. En tanto que, Macedo y Souza (2018), reportan el análisis del perfil topográfico en zonas de bajo contraste altitudinal, por medio de softwares vectoriales y graficas. Por otra parte, Ferreira y Uagoda (2019), realizaron un estudio fundamentado en la forma topográfica de las depresiones y definieron una clasificación de dolinas, destacando tres elementos por el tipo de perfil (caldero, dirigida y cenote). Mientras que Frausto-Martínez *et al.* (2018), con el uso de metodologías y herramientas del SIG, generaron insumos con una resolución de datos de 5 m para los ejes X y Y, y de 15-20 cm para el eje Z, lo que permitió identificar depresiones kársticas y generar la nueva cartografía exokárstica de bajo contraste altitudinal a una equidistancia de 25 cm en la vertical por píxel. Esta metodología e insumos generados, permitió análisis como los realizados por Colín-Olivares *et al.* (2019), por medio del MDE, obtenido de datos LiDAR, con el que realizaron dos procedimientos comparativos para la obtención de la profundidad

relativa, relación directa entre la cota mayor y la cota menor de la depresión, de las depresiones kársticas, con una metodología para datos ráster y otra para datos vectoriales. Posteriormente, Rodríguez-Castillo *et al.* (2021), con el uso de datos LiDAR, empleó una metodología semiautomática para la obtención de perfiles longitudinales, por medio de los ejes mayores, que resultó en tres tipos de formas por perfil topográfico; “V”, “U” y “II”. Ese mismo año, Frausto-Martínez *et al.* (2021), realizó un análisis del relieve kárstico, en el propuso una matriz para la administración de depresiones, para su saneamiento y su importancia por densidad de población. También propuso una clasificación por índice de elongación, por medio de los ejes mayores y los ejes menores que derivó en cuatro tipos: dolinas, dolinas-úvalas, úvalas y poljes. Con base en estos estudios se planteó como objetivo, analizar y clasificar las depresiones kársticas en la región costera del nororiente de la península de Yucatán, empleando índices morfométricos aplicados a escala detallada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Solidaridad, localizado en la porción nororiente del estado de Quintana Roo, México, desde la ciudad de Playa del Carmen, en la costa Noreste hacia tierra adentro hasta Cobá, al Suroeste (Beddows *et al.* 2001) (Figura 1). Está conformado de roca caliza que contiene grandes conductos de disolución, lo que le otorga un paisaje kárstico que implica alta vulnerabilidad a la contaminación del acuífero por la infiltración de aguas contaminadas.

Preparación de insumos

Los modelos de hidrología, altimetría, relieve kárstico y el análisis urbano del karst se realizaron a partir de la identificación, análisis y clasificación de las depresiones kársticas del municipio de Solidaridad, por medio de la construcción de un Modelo Digital de Elevación (MDE) que se obtuvo de los datos altimétricos de datos LiDAR, y de datos obtenidos mediante imágenes estereoscópicas satelitales del

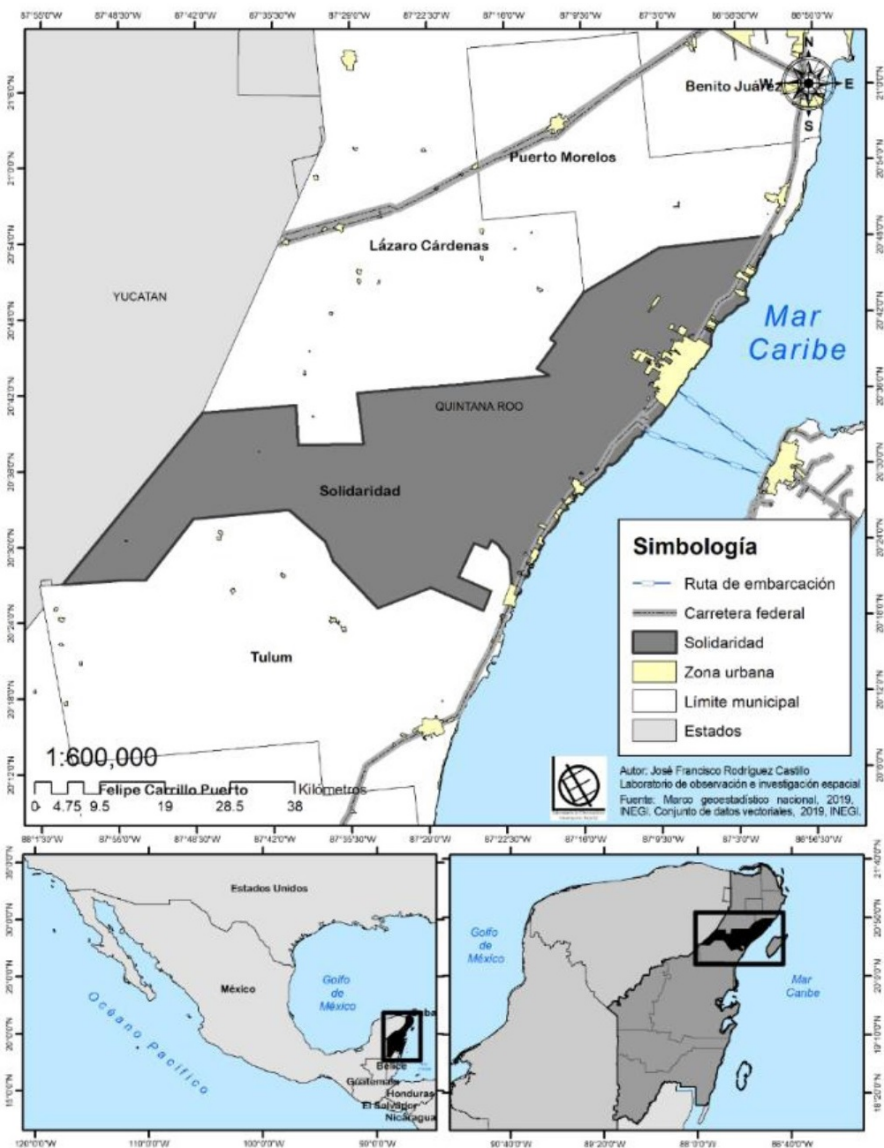


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Aster GDEM, los cuales se acoplaron para la obtención de los datos altimétricos y modelos base morfométricos.

Mosaico LiDAR

Se utilizó el sistema de datos LiDAR disponible para el municipio de Solidaridad de INEGI, en el que se descargaron y procesaron 31 archivos en formato ASCII/GRID, los cuales cubren solo la superficie de la zona norte del municipio, con un área de informa-

ción de 861.04 km²; se normalizaron los 31 archivos LiDAR y se formó un mosaico en formato GEOTIFF. Posteriormente, se generaron las líneas de contorno del relieve del mosaico, por medio de los módulos de análisis LiDAR incluidos en el software Global Mapper v.20; con esto se generó un MDE grid 3D de visualización, y con la herramienta create contours, se realizó la extracción de curvas de nivel con una equidistancia de 0.25 cm, en un rango de 0 a 19.5 m (altitud máxima en la zona norte de Solidaridad).

Con este proceso de extracción se suavizaron las curvas de nivel con una mejora notable de la apariencia de los contornos, para luego exportar el archivo en formato vectorial con los valores de elevación, proyección y un auxiliar para el modelado 3D. Con esto se generó la cartografía a escala detallada de 1:10 000 con una resolución de datos de 5 m para los ejes X, Y, y con 0.50 cm para el eje Z de acuerdo con la metodología de Frausto-Martínez *et al.* (2018).

Mosaico Aster GDEM

El Aster GDEM V2 se encuentra disponible en el visualizador EARTHDATA de la NASA. Estos datos se encuentran disponibles en formato GeoTIFF con una estructura de cuadrícula y mosaico, con resolución de 30 m y mosaicos de 1 x 1 grado. Para la obtención de las imágenes estereoscópicas satelitales del Aster GDEM, disponibles para Solidaridad, se utilizó el módulo de conexión y descarga de datos online incluido en el Global Mapper v.20, con lo que se descargaron los datos con el nivel máximo de detalle para la porción sur del municipio, la cual cubre un área de 1 162.87 km².

El insumo original de modelo de elevaciones contenía datos de hasta 246 m de altitud, por ello, se aplicó un proceso de suavizado de los datos altitudinales. Las curvas de nivel se extrajeron del producto remuestreado, por medio de la herramienta create contours del Global Mapper v.20, para este proceso se utilizó una equidistancia de 0.50 cm, en un rango de 0 a 50 m (Smutter-Soto *et al.* 2002). La extracción se generó por medio del proceso antes descrito, obteniendo curvas suavizadas con una mejora notable de la apariencia de los contornos y permitió exportar el archivo en formato vectorial con los valores de elevación, proyección y auxiliar para el modelado 3D de las curvas, con esto, se generó cartografía a escala 1:20 000 con resolución de datos de 30 m para los ejes X, Y, y con 1 m para el eje Z, cubriendo las zonas sin disponibilidad de información LIDAR.

Localización de depresiones kársticas

Se identificaron 10 672 unidades de depresiones kársticas, de los cuales 4 498 unidades fueron registradas en el mosaico LiDAR y 6 174 con el

modelo del Aster GDEM, con un criterio de profundidad mínima de 1 m.

Procesamiento de perfiles topográficos y azimut del eje mayor

Con las depresiones kársticas identificadas, se reconocieron las cotas máximas (escarpas) y las cotas mínimas (fondos) de cada depresión. Una vez marcados los fondos y las escarpas de las depresiones, con la herramienta polyline to polygon se convirtieron las polilíneas a polígonos y posteriormente se le asignó un ID a cada escarpa, de manera que, esto conservó sus campos de altura dentro de la tabla de atributos (Colín-Olivares *et al.* 2019, Rodríguez-Castillo *et al.* 2021). Después, en cada depresión se trazó de forma semiautomatizada el eje mayor y el eje menor, en el que se delimito la forma con la escarpa de depresión; por lo que, se generaron 10 672 ejes mayores y 10 672 ejes menores, a los cuales se les dio el mismo ID que la escarpa sobre la que están trazados para establecer la clasificación por índice de elongación de cada unidad. Para la clasificación por índice de elongación se tipificó la unidad de depresión con relación al ancho (eje menor) y largo (eje mayor) de la escarpa. Con este índice se clasifican como dolinas los que poseen un valor menor a 1.25, las que tienen de 1.25 pero menor a 1.75 son aquellas en la transición de dolinas a úvalas, las úvalas cuentan con un índice de 1.75 pero menor 2.00, y con un índice mayor a 2.00 se clasifican como poljes (Fragoso - Servón *et al.* 2014, Frausto *et al.* 2021).

Para la obtención del azimut de los ejes mayores se utilizó la herramienta cogo en el ArcGIS, cada línea tiene mediciones que la describen, por lo que una línea recta (eje mayor) tiene dirección y distancia, estas mediciones son útiles para describir la geometría de las coordenadas, para recrear con exactitud las entidades capturadas en el plano topográfico. Con esto se creó un nuevo campo en donde se capturó el azimut de cada unidad. El azimut se utilizó para realizar el cálculo de los rumbos y la roseta de fracturas con el software Stereonet v.10.4.6.

Procesamiento de los modelos tridimensionales

Se realizó el proceso de interpolación con el

conjunto de herramientas de 3D Analisyst Tool, con el que se ejecutó el Create Tin, que generó un archivo tipo TIN. El cual es una representación de una superficie mediante una red irregular de triángulos a partir del método de interpolación lineal de las curvas de nivel del área de estudio, por medio del método de triangulación Delaunay, que cuantifica y modela sus características 3D; el TIN resultante presenta una resolución de 0.25 m (Rodríguez-Castillo *et al.* 2021). Los polígonos se interpolaron con el TIN por medio, de la herramienta Interpolate Shape, con este proceso se acoplaron los valores de elevación a los vectores, delimitados por la escarpa de la depresión, el método de interpolación depende del tipo de superficie que se utilice. Para este caso se utilizó la interpolación lineal, que es el predeterminado para TIN, terreno y dataset LAS, con esto se obtuvo la elevación del plano definido por el triángulo que contiene la ubicación XY del vector utilizado. Con el factor de Z en 1, el cual indica por cuanto se multiplicarán los valores Z, se convirtieron las unidades lineales Z para que coincidan con unidades lineales XY. Por lo que el 1 hace que los valores de elevación no sufran cambios. Este procedimiento se aplicó a los polígonos de las escarpas y fondos, así como a las líneas de los ejes mayor y menor, para obtener las características 3D del modelo. Este proceso hizo que las escarpas y los fondos se volvieran una sola unidad, ya que al haber depresiones con más de un fondo hacía que sobrarán fondos a la hora de unir tablas (Rodríguez-Castillo *et al.* 2021).

En las tablas de atributos de las escarpas se crearon las columnas para la cota máxima y para la cota mínima, con la calculadora geométrica se obtuvo el área de cada escarpa, y con los valores de altitud integrados en el polígono se le señaló al sistema que añadiera los valores de Min Z of geometry para el fondo y el valor Max Z of geometry para las escarpas; finalmente con el Field calculator se introdujo la siguiente función: $DA = Z_{Max} * Z_{Min}$. Donde: DA es la diferencia de altura entre escarpa y fondo, ZMax = Altura de la escarpa y ZMin = Altura del fondo.

Con lo anterior, se obtuvo la profundidad relativa, relación directa de la escarpa y fondo, de cada depresión. Con los polígonos de escarpa se

usaron las herramientas Triangulator Surface y Polygon Volume para calcular el volumen y el área entre un polígono con altura y superficie constante. La superficie puede ser de dataset TIN, terreno o dataset LAS. Para el proceso de la clase de entidad se tuvieron las características de cada polígono que definen la región donde se ubica esta entidad, la cual tiene el campo de altura en la tabla de atributos del polígono para definir la altura del plano de referencia utilizado, esta referencia determinó los cálculos volumétricos. Listo el shapefile con el campo de altura, se volvió el plano de referencia, indicando la dirección en la que se calculó el volumen y el área de superficie. Este proceso se realizó en las 10 672 escarpas, en el que se utilizó el shapefile como plano referenciado con los campos de altura realizados por efecto de la extracción de la curva de nivel, en este proceso se usó como superficie el dataset TIN de la zona de estudio (Rodríguez-Castillo *et al.* 2021).

Con los ejes mayores y menores, se agregó el campo de longitud en la tabla de atributos, la longitud del eje mayor y menor se obtuvo con la calculadora geométrica del ArcGIS v.10.8. Se visualizaron e interpretaron los perfiles, por medio de cortes longitudinales con la herramienta 3D Analyst para generar las gráficas de los perfiles y posteriormente clasificar las formas del perfil; en V (cono), U (herradura) y en II (hoya), además de la profundidad y el gradiente de las laderas (Rodríguez-Castillo *et al.* 2021).

RESULTADOS

Se identificaron 10 672 unidades de depresiones kársticas, de las cuales 2 425 fueron en forma de U (herradura), 1 063 en forma de II (hoya) y 7 184 en forma de V (cono). Las depresiones kársticas en forma de V corresponden al 67.3% del total de unidades y se distribuyen en la zona oriental del municipio, mientras que las depresiones en forma de U corresponden al 22.72% del total y se distribuyen principalmente a lo largo de la zona costera; por último, las de tipo II (hoya) tienen una presencia del 9.96%, con una distribución principalmente en la zona oeste y suroeste del municipio (Figura 2).

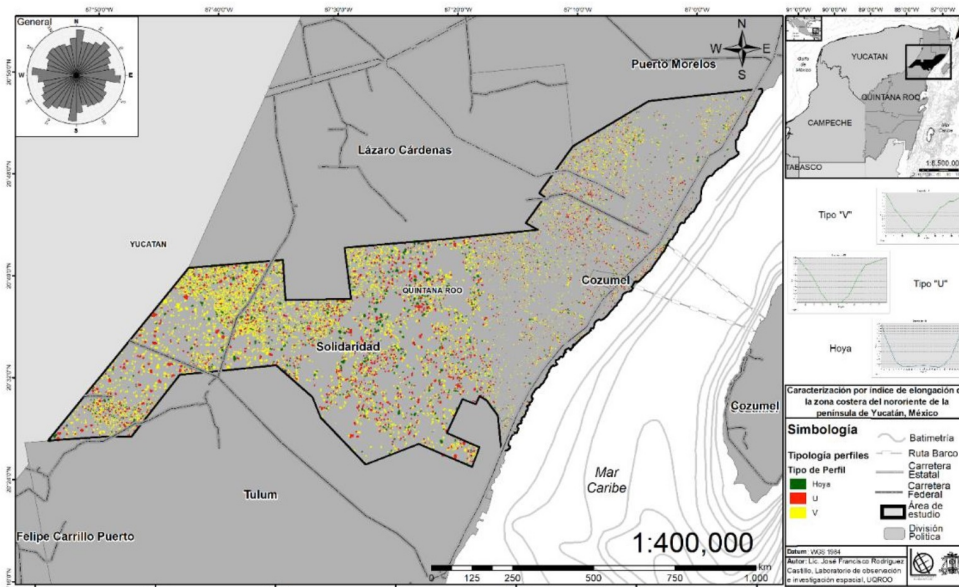


Figura 2. Porcentajes de distribución de formas de perfil.

Tabla 1. Estadística de las unidades clasificadas por tipo de perfil.

Tipo de depresión medidas	V			U			Hoya		
	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio
Profundidad Relativa	34.00	1.00	3.60	32.50	1.00	4.60	44.50	1.00	5.15
Área	300 515.58	219.88	9 451.53	219 966.87	323.60	11 708.96	179 621.60	279.73	17 945.14
Perímetro	2 475.85	56.56	342.65	2 148.52	67.78	366.60	2 000.44	61.95	475.63
Volumen	2 098 162.29	78.68	22 457.40	2 022 085.26	78.47	42 655.55	3 389 880.60	389.43	83 038.43
Longitud Eje Menor	567.27	7.65	70.80	451.16	9.10	79.02	446.25	16.66	95.87
Longitud Eje Mayor	834.66	21.55	121.58	762.25	21.90	129.48	658.12	22.88	167.52

En la Tabla 1 se observa que las depresiones en forma de hoya presentan una profundidad relativa mayor, en comparación con las unidades en formas U y V, con hasta 44.5 m de profundidad relativa en algunas unidades y 5.0 m en promedio, mientras que las unidades con mayor profundidad del tipo U y V llegan a los 32.5 y 24.0 m, respectivamente, y 4.6 y 3.6 m en promedio. Pero el área definida por la escarpa de las unidades presenta valores mayores en las depresiones V con hasta 300 515.0 m², seguido de las unidades en forma de U con hasta 219 966.0 m² y por último las depresiones en forma de hoya con escarpas de hasta 179 621.0 m². Mientras que los ejes mayores de las depresiones V tienen en promedio una longitud de 121.5 m, en cuanto a la forma U su longitud promedio es de 129.5 hasta 167.0 m de longitud en los ejes mayores para las depresiones en

forma de hoya.

Las dolinas tienen una profundidad promedio de 4.1 m, con máximas de 47.5 m y mínimas de 1.0 m (Tabla 2), estas unidades poseen un área de 257 815.2 m² como área máxima y 302.8 m² como mínima, y promedio 9 376.2 m². Mientras que sus ejes presentan las menores fluctuaciones, teniendo como máximo en el mayor 567.2 m y 609.5 m en el menor. En tanto que las dolinas-úvalas presentan una profundidad máxima de 34.0 m, con promedio de 4.0 m, estas unidades se caracterizan por tener el área relativamente más grande que el resto de las formas, con máxima de 300 515.5 m², mínimo de 226.6 m² y promedio de 10 172.0 m², este tipo de unidades presenta los máximos valores extremos de 2 022 085.2 m³ como máximo y 78.8 m³ como mínimo, y promedio de 31 647.9 m³. Las úvalas poseen característi-

Tabla 2. Estadística de las unidades clasificadas por índice de elongación.

Tipo de depresión medidas	Dolinas			Dolinas-Úvalas			Úvalas			Poljes		
	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio
Profundidad relativa	44.50	1.00	4.09	34.00	1.00	4.02	32.00	1.00	3.86	38.00	1.00	3.91
Área	257 815.25	302.80	9 376.25	300 515.58	226.69	10 172.06	218 281.83	386.49	11 581.26	237 109.28	219.88	12 418.22
perímetro	2 328.75	62.72	313.35	2 475.85	56.56	336.15	2 148.52	80.13	374.07	2 448.04	62.97	427.70
Volumen	3 389 880.60	117.80	30 688.80	2 022 085.26	78.83	31 647.95	2 098 162.29	78.47	35 273.48	2 891 458.86	78.68	35 902.11
Longitud eje menor	567.27	18.50	87.28	516.46	13.14	78.41	426.19	14.79	73.06	309.98	7.65	62.83
Longitud eje mayor	609.52	21.86	99.42	834.66	21.55	116.04	762.25	27.84	136.41	732.45	24.84	162.07

cas diferentes, su profundidad máxima de 32.0 m, con promedio de 3.6 m, área entre 218 281.8 y 386.49 m² como máxima y mínima, respectivamente, con promedio de 11 581.2 m², y volumen promedio de 35 273.4 m³. Los poljes son las formaciones que se evidencian por la dimensión de su área, con promedio de 12 418.2 m², máximo de 237 109.2 m² y mínimo de 219.8 m²; la profundidad de los poljes oscila de los 38 a 3.9 m como máximo y mínimo, con promedio de 3.9 m, y volumen promedio de 35 902.1 m³, con máximo de 2 891 458.8 m³ y mínimo de 78.7 m³.

La orientación principal de los ejes mayores oscila entre los rumbos NE 1° SO y NE 9° SO, orientación secundaria entre SE 81° NO y SE 89° NO. Por otra parte, si se toma en cuenta la clasificación por índice de elongación para la segmentación del azimut, las dolinas se encuentran orientadas entre los rumbos NE 1° SO y NE 9° SO, con una secundaria de SE 81° NO y SE 89° NO. Para las unidades clasificadas como dolinas-úvalas su orientación principal está entre los rumbos NE 1° SO y NE 9° SO, con una secundaria de SE 81° NO y SE 89° NO, y una tercera orientación, entre NE 41° SO y NE 49° SO, las orientaciones principales y secundarias de las dolinas-úvalas presentan los mismos valores que el general, a consecuencia, que representan el 42% de todas las formas. Las úvalas se concentran en una orientación principal de NE 41° SO y NE 49° SO, la misma que las dolinas-úvalas, debido a que estas formas se relacionan con su transición entre una forma y otra. Finalmente, los poljes están orientados entre el rumbo NE 41° SO y NE 49° SO. Los diagramas de fracturas se pueden apreciar junto con la clasificación por índice de elongación sobre el área de estudio en la Figura 3, mientras que en la Figura 4 se presentan los modelos tridimensionales de las unidades que mejor representan la tipología planteada en este estudio, donde se aprecia la complejidad del relieve.

DISCUSIÓN

El estudio de la Frago - Servón *et al.* (2014), utilizó cartografía a escala 1:50 000 con el que lograron reconocer 2 890 depresiones kársticas en todo el estado de Quintana Roo. Mientras que, en este estudio, por medio de la cartografía con resolución a 1:10 000 se identificaron 10 672 depresiones kársticas, solo en el municipio de Solidaridad. Lo anterior destaca la subestimación del reconocimiento de los sistemas de depresiones a nivel local. La resolución que se empleó en los estudios de Frago - Servón *et al.* (2014), Frago-Servón *et al.* (2016) fue a escala 1:50 000 por medio de las cartas topográficas del INEGI, las cuales tienen una alta disponibilidad y diferenciación de metadatos de las depresiones. Con los insumos utilizados en la presente investigación, al igual que en los estudios de Frausto-Martínez *et al.* (2018), Colín-Olivares *et al.* (2019) y Frausto-Martínez *et al.* (2021), es posible elaborar cartografía detallada (1:10 000) con insumos LiDAR, lo cual es una ventaja para mejorar los modelos específicos, pero la disponibilidad está limitada a una sección del territorio. Este contraste en el detalle se puede observar en los modelos de los estudios de Frago-Servón *et al.* (2014) y Frago-Servón *et al.* (2016), en donde, la equidistancia vertical empleada fue de 10 m, sin embargo, la zona costera presenta una altitud menor a 10 m. Con el uso e interpretación de la tecnología LiDAR, se generaron modelos altimétricos con una equidistancia de hasta 0.25 m. De igual forma, los modelos generados del Aster GDEM se procesaron y se obtuvieron modelos con 1 m de equidistancia.

El municipio de Solidaridad posee al menos 50 sistemas de cavernas exploradas las cuales se extienden desde la costa hasta el centro del continente dentro de los límites del municipio (Beddows *et al.*

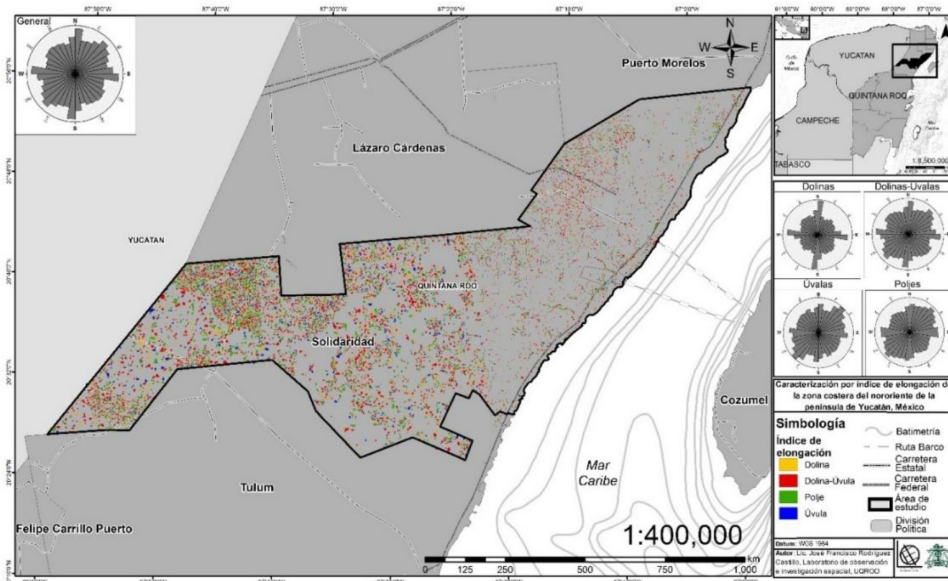


Figura 3. Distribución tipológica por índice de elongación, con rosetas de fracturas agrupadas por su clasificación.

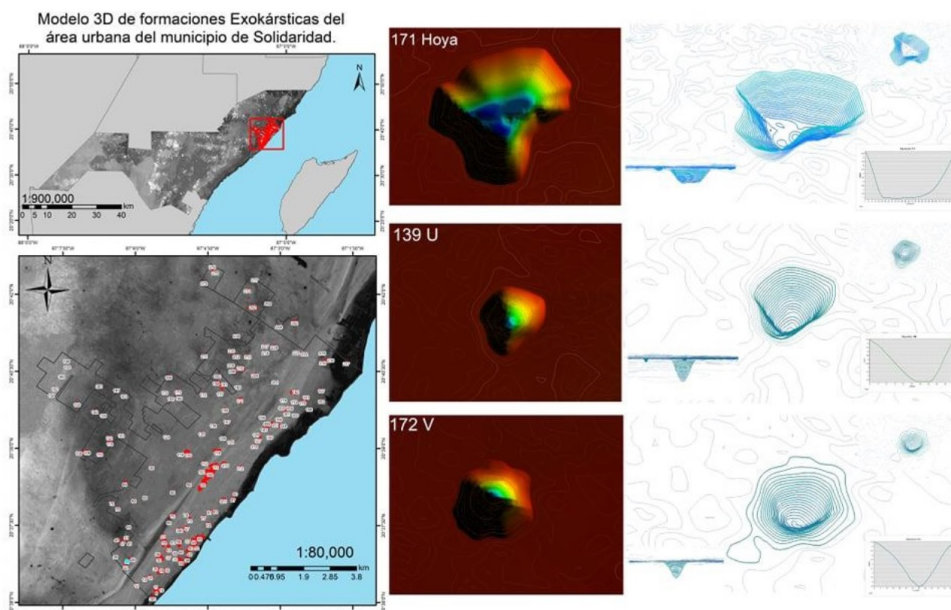


Figura 4. Modelos 3D de las formas representativas.

2001). La morfología de las depresiones kársticas costeras está principalmente influenciada por cavernas, manantiales submarinos de agua dulce y por la intrusión de agua salada de forma natural por medio de las corrientes marinas que llegan a los conductos kársticos (Fleury *et al.* 2007, Vuilleumier *et al.*

2013, Goldscheider *et al.* 2020). La presencia de este nuevo inventario de depresiones y sus características aporta nueva información sobre la génesis de las estructuras exokársticas que ha sido evidente en otros sitios como Cozumel (Frausto *et al.* 2018 y Colín *et al.* 2019).

Las depresiones kársticas se ven influenciadas por los procesos de diagénesis meteórica, intensificados por hidráulica horizontal, los procesos de sedimentación y cementación exogenética a lo largo de unidades paralelas a los sistemas de paleoduna y fronteras litológicas costeras (Kambesis y Coke 2013, Frausto-Martínez *et al.* 2021). Las depresiones kársticas de tipo cono o V se asocian con sistemas litológicos de un nivel alto de porosidad y están conectadas a cuevas o cavernas a manera de sifones, las cuales se rellenan al momento de colapsar, cuya morfología indica que estos procesos kársticos son recientes (Ford y Williams 2007, Öztürk 2018). Al respecto, Ferreira y Uagoda (2019), realizaron la clasificación de estas formas de tipo "V" de perfil y las denominaron como "colmatada" o "rfunil", apoyándose de los modelos de Nicod (1972), en el que añaden la diferenciación de referencia a "colmatada" para aquellas depresiones que tengan presencia de sedimentos, y funil si la depresión carece sedimentación, lo cual es indicador de la forma sigue en evolución a medida que se dan los procesos de exokarstificación; esto señala que ambas clasificaciones representan los procesos de génesis y evolución del paisaje kárstico, como la disolución y la sufusión de material, la cual es mayor cuando la forma carece de sedimentos. De igual manera, clasifican las formas en herradura como formas de caldero o bacía, auxiliándose de los modelos de Nicod (1972); complementando la interpretación de la forma de caldero, si la depresión tiene presencia de sedimentación; y bacía si no tiene una fuerte presencia de sedimentos. Mientras que Vizcayno *et al.* (1980) referencian esta forma con el nombre de aguada, la cual funge como estanque natural y con mucha actividad orgánica.

Las formaciones kársticas en tipo de hoya se caracterizan por tener, en la mayoría de los casos, contacto con el manto freático debido a la disolución de la roca antes de colapsarse el techo, lo que provoca que la roca que forma la depresión tenga grietas para un mejor flujo del agua (Rodríguez-Castillo *et al.* 2021). Las cavernas como sistema de disolución pueden presentarse en horizontal como túneles o en vertical como chimeneas (Vizcayno *et*

al. 1980, Smart *et al.* 2006). Además, las cuevas inundadas son indicadores de la época geológica de las estructuras kársticas, debido a que demuestran a que nivel se encontraba el manto freático (Ordoñez-Crespo y García-Rodríguez 2010). Estos procesos requieren de más tiempo para la formación de las formas de tipo embudo y herradura, evidenciando la presencia de karst de tipo singénico (Peña-Monne *et al.* 2008, Veress 2020). Por su parte, Vacher y Mylroie (2002) añaden que los cenotes o las depresiones con el tipo de forma en hoya tienden a tener paredes en fondos más porosos por el constante o permanente contacto con el manto freático. Mientras que, Ferreira y Uagoda (2019), clasifican las formas de herradura con el nombre regional de cenote; también se presume que de no tener presencia de agua este tipo de perfil se subclasifica como balde de acuerdo a los modelos de Nicod (1972), los cuales deben su génesis a colapsos del techo de cavernas, que se moldean debido a la escorrentía subsuperficial y sus rasgos irregulares se asocian a la disolución de la roca.

En el caso de la clasificación por tipo de forma, reflejan la influencia de la estructura y procesos de degradación de la superficie calcárea; en la mayoría de los casos, son formas sujetas a procesos de acumulación e inundación (Frausto *et al.* 2008). Para el caso las dolinas, Fragoso-Servón *et al.* (2014) señalan que son unidades que presentan patrones de disolución y son indicadores de contacto con el manto freático en la mayoría de los casos. Por otra parte, son cuerpos de agua con un régimen de inundación extraordinario, debido a que están en zonas de relieve irregular. Las úvalas que presentan inundaciones extraordinarias son indicadores de mayor solubilidad en la roca y por ende procesos vivos de karstificación (Fragoso-Servón *et al.* 2014). Estas combinaciones de procesos de disolución dan origen a las dolinas, con el paso gradual del tiempo pueden dar lugar a formaciones de área y/o eje de disolución más grande, lo cual da origen a las dolinas-úvalas y/o úvalas (Gutiérrez-Elorza 2008). La disolución recrea patrones que se pueden estar asociados en la superficie al comportamiento de láminas de agua subterránea y/o superficiales (Schoeneberger y Wysocky

2005). El suelo kárstico en un estado juvenil se da en el momento en que la roca queda expuesta y se evidencia por sistemas de karren, donde la escorrentía superficial desaparece para dar lugar a un buen desarrollo del drenaje subterráneo; pasando a un estado maduro cuando la cueva alcanza un nivel de porosidad más alto, lo que causa alta incidencia en cenotes y cavernas. Consecuentemente, en el estado viejo, de la roca los cenotes evolucionan a úvalas y/o poljes, en este estado los escurrimientos superficiales vuelven hacer presencia (Bharatdwaj 2006, Jeannin *et al.* 2021). Dicho comportamiento puede estar asociado a la cantidad de sistemas de cavernas exploradas en el municipio, si se considera que el 47% de las unidades pertenecen al tipo de forma dolinas - úvalas y úvalas. Los poljes son unidades en las que se presentan procesos de acumulación de materia orgánica, debido a que poseen un buen drenaje y una alta tasa de evapotranspiración (Schoeneberger y Wysocky 2005).

Las fracturas en las rocas son elementos que controlan el posicionamiento de las formas kársticas, principalmente las cavernas y/o conductos subterráneos, debido a que en ellas se produce mayor intensidad de la disolución de la roca (Lugo-Hubp *et al.* 1992). La península de Yucatán se ve influenciada por la actividad neotectónica, lo que provoca la diferenciación de bloques de alta porosidad, que propicia la formación de un sistema de fallas orientadas principalmente al N-S y NE-SO, orientación en la que se encuentra la fractura de Holbox y la de Xelha (Fragoso - Servón *et al.* 2016, Camacho-Cruz *et al.* 2019). Esto puede explicar la orientación de las depresiones y esta estrictamente regida por un control tectónico derivado de fallas. Las unidades que se encuentran orientadas hacia el NE-SO deben su génesis a la fractura de Holbox subyacente, estas unidades se forman en función a la disolución de la roca hasta alcanzar el nivel de manto freático,

limitando la expansión y profundidad de las unidades (Solleiro-Rebolledo *et al.* 2011). El flujo hidrológico de la península es estrictamente subterráneo, y de flujo radial, moviéndose principalmente de sur a norte, hacia las costas (Bauer-Gottwein *et al.* 2011). Las unidades que se orientan NO-SE son resultado de las distintivas características tectónicas de la región que genera fuerzas de empuje y estiramiento en la roca causando grietas perpendiculares a la costa (Perry y Marín 2002, Solleiro-Rebolledo *et al.* 2011).

CONCLUSIONES

La caracterización de las depresiones permitió entender los procesos que moldean el relieve kárstico, ya que estos terrenos son de naturaleza sensible ante cambios y modificaciones del ambiente. La cartografía detallada, caracterizó de forma puntal el relieve, con lo que, se logró reconocer casi cuatro veces más depresiones kársticas que los reportados en los estudios antecedentes. A través de nuevas técnicas de análisis de percepción remota y sistemas de información geográfica se aplica el análisis del relieve kárstico a escala detallada para relieves de bajo contraste altitudinal. La orientación de los ejes mayores permite conocer la génesis de las unidades y que procesos estructurales que moldean el paisaje kárstico. Asimismo, los tipos de formas de acuerdo con su perfil topográfico e índice de elongación dan pauta para reconocer procesos de la evolución y dinámica geomorfológica. La configuración tridimensional de cada depresión permite identificar su extensión de espacial, profundidad y configuración geométrica, para tener inventarios básicos que sirvan de apoyo a la planificación y ordenamiento de territorios frágiles para el manejo integrado y sustentable de las zonas kársticas.

LITERATURA CITADA

- Aguilar Y, Bautista-Zúñiga F, Mendoza ME, Frausto-Martínez O, Ihl T (2016) Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 78: 51-60.
- Andreu J, Calaforra J, Cañaveras J, Cuezva S, Durán V, Policarp G, del-Cura M, García-Cortés A, Gázquez

- F, Salvador O, Sanchez-Moral S (2016) Karst: un concepto muy diverso (Karst: a very diverse concept). *Revista de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 24: 6-20.
- Abrams LM, Varier D, Mehdi T (2020) The intersection of school context and teachers' data use practice: Implications for an integrated approach to capacity building. *Studies in Educational Evaluation* 69: 100868. DOI: 10.1016/j.stueduc.2020.100868.
- Bauer-Gottwein P, Gondwe BRN, Charvet G, Marín LE, Rebolledo-Vieyra M, Merediz-Alonso G (2011) Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal* 19: 507-524.
- Bharatdwaj K (2006a) *Physical geography: Hydrosphere*. 2nd Edition. Penguin Random House. India. 356p.
- Beddows P, Smart P, Whitaker F, Smith S (2001) Where does the sewage go? The karst groundwater system of the Municipalidad de Solidaridad, Quintana Roo, México. En: Huerta-Illescas JA, Pérez-de-la-Fuente C, Llorens-Cruset A, Dzay G (ed) *A la salvaguarda de los ecosistemas frágiles en Solidaridad*. Honorable Ayuntamiento de Solidaridad, Dirección General de Administración Urbana, Dirección de Medio Ambiente. Playa del Carmen, Quintana Roo. México. pp: 168-178.
- Camacho-Cruz KA, Ortiz-Hernández MC, Sánchez A, Carrillo L, de Jesús-Navarrete A (2019) Water quality in the eastern karst region of the Yucatan Peninsula: nutrients and stable nitrogen isotopes in turtle grass, *Thalassia testudinum*. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 15967-15983.
- Colín-Olivares O, Frausto-Martínez O, Rodríguez-Castillo JF (2019) Cálculo automatizado de la profundidad de depresiones kársticas a escala detallada. En: Frausto-Martínez E (ed) *Conocimientos y saberes del karst tropical en México*. Acts With Science. México. pp: 55-78.
- Ferreira CF, Uagoda RES (2019) Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Caminhos De Geografia* 20: 519-537.
- Ford D, Williams P (2007) *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons Inc Print on. England. 507p.
- Fleury P, Bakalowicz M, de Marsily G (2007) Submarine springs and coastal aquifers: A review. *Journal of Hydrology* 339: 79-92.
- Fragoso - Servón P, Bautista F, Frausto-Martínez O, Pereira-Corona A (2014) Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 31: 127-137.
- Frausto-Martínez O, Ihl T (2008) Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. En: Gutiérrez Aguirre, M. Y Cervantes Martínez, A. *Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México*. Universidad de Quintana Roo. México. pp: 41-54.
- Frausto-Martínez O, Zapi-Salazar NA, Colín-Olivares O (2018) Identification of Karst forms using LiDAR echology: Cozumel Island, Mexico. In: Abdalla R (ed) *Trends in geomatics-An earth science perspective*. IntechOpen. United kingdom. pp: 33-44.
- Fragoso - Servón P, Bautista-Zúñiga F, Pereira-Corona A, Frausto-Martínez O (2016) Distribución de suelos en ambientes tectokársticos en la porción este de la Península de Yucatán, México. *GEOS* 36: 265-273.
- Fragoso - Servón P, Pereira-Corona A, Bautista-Zúñiga F, Prezas Hernández B, Reyes N A (2020) Soils in extreme conditions: the case of the catenas karst-marsh-coastline in the Mexican Caribbean. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 72: A040619. DOI: 10.18268/bsgm2020v72n2a040619.
- Frausto-Martínez O, Colín Olivares O, Rodríguez Castillo JF (2021) Karst en la ciudad: planificación del espacio urbanístico de la zona urbana de Cozumel, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(1): 31.

- Goldscheider N, Chen Z, Auler AS, Bakalowicz M, Broda S, Drew D, Hartmann J, Jiang G, Moosdorf N, Stevanovic Z, Veni G (2020) Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal* 28: 1661-1677.
- Gutiérrez-Elorza M (2008), *Geomorfología*. Pearson/Prentice Hall. España. 920p.
- Hawker L, Uhe P, Paulo L, Sosa J, Savage J, Sampson C, Neal J (2022) A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters* 17(2): 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f
- Jeannin PY, Artigue G, Butscher C, Chang Y, Charlier JB, Duran L, Wunsch A (2021) Karst modelling challenge 1: Results of hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 600: 126508. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126508.
- Kambesis PN, Coke JG (2013) Overview of the controls on eogenetic cave and karst development in Quintana Roo, Mexico. *Coastal Karst Landforms*. Springer. pp: 347-373.
- Lesser JM, Weidie AE (1988) Region 25, Yucatán peninsula. In: Back WJ, Rosenshein S Seaber PR (eds) *Hydrogeology*. Boulder Colorado. Geological Society of America. *The Geology of North America*. V. 0-2: pp. 237-241.
- Li S-I, Liu C-Q, Chen J-A, Wang S-J (2021) Karst ecosystem and environment: Characteristics, evolution processes, and sustainable development. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 306: 107173. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107173.
- Lugo-Hubp J, Aceves J, Espinasa R (1992) Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*. UNAM 101: 143-150.
- Morais F, Soriano M (2017) Análisis morfométrico de dolinas y parámetros geofísicos aplicados al estudio de los flujos de agua subterránea en la cuenca del Ebro, Zaragoza, España | *Geosciences = Geociências* 36: 221-232.
- Macedo FR, Souza ML (2018) Elaboração de perfil topográfico utilizando softwares vetoriais. *Revista de Geografia, Meio Ambiente e Ensino* 9: 83-94.
- Moreno-Gómez M, Pacheco J, Liedl, R, Stefan C (2018) Evaluating the applicability of European karst vulnerability assessment methods to the Yucatan karst, Mexico. *Environmental Earth Sciences* 77: 682. DOI: 10.1007/s12665-018-7869-5.
- Nicod J (1972) Problems de la dissolution des roches dolomitiques: *Trans. Cave Research Group of Great Britain* 14: 125-131.
- 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.
- Öztürk MZ (2018) Karstik kapalı depresyonların (dolinlerin) morfometrik analizleri. *Cografya Dergisi* 36: 1-13.
- Perry E, Velázquez OG, Marín L (2002) The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review* 44: 191-221.
- Peña-Monne JL, Dapper M, Constante A, De Vliegheer B, Pavlopoulos K (2008) El sistema de poljes de la región de Dystos-Almyropotamos (isla de Eubea, Grecia): *Cartografía y evolución geomorfológica*. *Geographica* 53: 143-161.
- Pereira-Corona A, Fragoso - Servón P, Frausto-Martínez O (2016) Suelos, agua, inundaciones y cambio climático en zonas de karst: el caso de Quintana Roo, México. *GEOS* 36: 1-19.

- Paredes C, Matos H, De La Vega-Panizo R, Pardo E (2019) Reconocimiento semiautomático de depresiones kársticas mediante análisis de agregados en sus distribuciones morfométricas. Aplicación al karst del Estado de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 36: 270-288.
- Rodríguez-Castillo JF, Frausto-Martínez O, Colín-Olivares O (2021) Morphometry of karst depressions at detailed scale: El Cedral, Cozumel - México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24: 33.
- Sanders EM (1921) The cycle of erosion in a karst region (after Cvijic). *Geographical review* 11: 593-604.
- Schmitter-Soto JJ, Comín E, Escobar-Briones J, Herrera-Silveira J, Alcocer E, Suárez-Morales M, Elías Gutiérrez V, Díaz-Arce LE, Marín B, Steinich (2002) Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia* 467: 215-228.
- Schoeneberger P, Wysocky D (2005) Hidrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. *Geoderma* 126: 117-128.
- Smart PL, Beddows PA, Coke J, Doerr S, Smith S, Whitaker FF (2006) Cave development on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. In: Harmon RS, Wicks CM (eds) *Perspectives on karst geomorphology hydrology, and geochemistry: a tribute volumen to Derek C. Ford and William B. White*. Special Paper 404. Geological Society of America. USA. pp: 105-128.
- Solleiro-Rebolledo E, Cabadas-Báez H, Pi P, González A, Fedick S, Chmilar J, Leonard D (2011) Genesis of hydromorphic Calcisols in wetlands of the northeast Yucatan Peninsula, Mexico. *Geomorphology*, 135: 322-331.
- Suárez-Moo P, Remes-Rodríguez CA, Márquez-Velázquez NA, Falcón LI, García-Maldonado JQ, Prieto-Davó A (2022) Changes in the sediment microbial community structure of coastal and inland sinkholes of a karst ecosystem from the Yucatan peninsula. *Scientific Reports* 12(1): 1110. DOI: 10.1038/s41598-022-05135-9.
- Vizcayno SG, de Anda TG, Pino MV (1980) Cenotes, karst característico en mecanismos de formación. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 4: 32-36.
- Vacher HL, Mylroie JE (2002) Eogenetic karst from the perspective of an equivalent porous medium. *Carbonates and Evaporites* 17: 182-196.
- Veress M (2020) Karst types and their karstification. *Journal of Earth Science* 31: 621-634.
- Vuilleumier C, Borghi A, Renard P, Ottowitz D, Schiller A, Supper R, and Cornaton F (2013) A method for the stochastic modeling of karstic systems accounting for geophysical data: an example for application in the region of Tulum, Yucatan Peninsula (Mexico). *Hydrogeology Journal* 21: 529-544.