

Identificación, clasificación y representación cartográfica de las depresiones kársticas en la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México[☆]

Identification, classification and mapping of the karst depressions in El Cielo Biosphere Reserve, Tamaulipas, Mexico

Jerjes Rigoberto Pantoja-Irys^{*a}, Christian Santillanes-Gutiérrez^a, Luis Eduardo Arista-Cázares^a, Lizbeth Ramírez-Colín^a, Daniela Hernández-García^a, Hugo Mujica-Sánchez^a, Mark Wagner^b

^aCorporación Ambiental de México, S.A. de C.V. Texcoco 100, Colonia Satélite Acueducto, Monterrey, Nuevo León, 64960, México

^bArcadis US, Inc. 7550 Teague Road, Suite 210, Hanover, MD, 21076, USA

Resumen

El cambio climático y el crecimiento de la población continúan generando demandas, riesgos y vulnerabilidades importantes para los recursos hídricos. Los acuíferos kársticos representan algunas de las formaciones acuíferas más prolíficas con ecosistemas críticos. Una mayor comprensión de su extensión y características es importante como parte de la planificación urbana para garantizar que se establezcan acciones adecuadas en el futuro para su protección. En este trabajo se han creado mapas temáticos con procedimientos semiautomáticos desarrollando índices morfométricos para la identificación de depresiones kársticas dentro de la sucesión carbonatada de la Reserva de la Biosfera El Cielo en el Estado de Tamaulipas, México. Las herramientas de digitalización se utilizaron para: 1) identificar estructuras; 2) fotointerpretar los valles fluviales kársticos y las depresiones kársticas; 3) definir índices morfométricos para el agrupamiento de depresiones; 4) clasificar a través de parámetros morfométricos; 5) identificar “clusters” de dolinas a través de métodos estadísticos, y 6) generar un catálogo completo de las depresiones kársticas y su cartografía. El procedimiento adoptado identificó 1578 rasgos que incluyen: a) 35 valles fluviales kársticos longitudinales; b) 35 valles fluviales kársticos transversales; c) 3 poljes; d) 17 uvalas, y e) 200 dolinas B y 1288 dolinas A.

Palabras clave: Reserva de la Biósfera El Cielo, karst, dolinas, uvalas, poljes, valles, morfometría.

Abstract

Climate change and population growth continue to create significant demands, risks and vulnerability to water resources including groundwater. Karstic aquifers represent some of the most prolific water-bearing formations with critical ecosystems. A greater understanding of their extent and features is important as part of urban planning to ensure adequate actions are established into the future for its protection. In this work, thematic maps have been created with the semi-automated procedures to develop morphometric indices for the identification of karst depressions within the carbonate sequences of the El Cielo Biosphere Reserve in Tamaulipas State, Mexico. Digitalization tools were utilized to: 1) identify structures; 2) photo-interpret the fluvio-karstic valleys and identified karst depressions; 3) define morphometric indices for depression grouping; 4) classification through morphometric parameters; 5) identify doline “clusters” through statistical methods; and 6) generate of a comprehensive catalog of the karst depressions and cartography. The adopted procedure identified 1578 features including: a) 35 longitudinal fluvio-karstic valleys; b) 35 transverse fluvio-karstic valleys; c) 3 poljes; d) 17 uvalas, and e) 200 B dolines and 1288 A dolines.

Keywords: Biosphere Reserve El Cielo, karst, doline, uvala, polje, valley, morphometry.

[☆]© J. R. Pantoja-Irys, C. Santillanes-Gutiérrez, L. E. Arista-Cázares, L. Ramírez-Colín, D. Hernández-García, H. Mujica-Sánchez, M. Wagner. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Com-

mons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), which permits non-commercial sharing of the work and adaptations, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

*E-mail address: jerjes.pantojai@anahuac.mx

1. Introducción

Los avances tecnológicos digitales de las últimas décadas han mejorado significativamente el escaneo láser de datos y la resolución de las imágenes aéreas y satelitales; lo que ha permitido la ejecución de análisis más detallados de la superficie terrestre y sus ecosistemas (Tarolli y Mudd, 2020). Los procedimientos automatizados y semiautomatizados para la delimitación de los rasgos de la corteza terrestre están revolucionando la generación de mapas a un menor costo, tiempo y con mayor precisión lo que ha beneficiado directamente la evaluación de: los recursos hídricos vulnerables, sus hábitats ecológicos asociados y la amenaza que plantean el cambio climático y el desarrollo urbano. Por ejemplo, novedosas investigaciones cartográficas con sensores remotos y análisis genómicos han demostrado que las depresiones kársticas inciden en el comportamiento de los felinos (Čonč et al., 2022) o en los patrones de adaptación de los peces de las cavernas como el *Astyanax mexicanus* (Fumey et al., 2018), entre otras.

El paisaje kárstico en México representa cerca del 15 % del territorio nacional (Mora-Palomino et al., 2016), y sus características están directamente relacionadas con la geología, tectónica, relieve, clima y vegetación de la región en donde se encuentran, entre otros; lo que da como resultado una gran variedad de formas y tipos kársticos. El sistema kárstico más estudiado, desde el punto de vista geomorfológico, en México, es el de la plataforma de la península de Yucatán (Back et al., 1986; Lugo-Hubp et al., 1992; Perry et al., 2002; Bautista et al., 2011; Fragoso-Servón et al., 2014; Aguilar et al., 2016) y desde un punto de vista hidrogeológico el karst de montañas plegadas y falladas (Fish, 1977; Mitchell et al., 1977; Carranco-Lozada, 2011; Pérez-Corona, 2011; Morán-Ramírez et al., 2013; Elliot, 2016; Espinasa y Espinasa, 2016). Espinasa-Pereña y Nieto-Torres (2015) proponen una clasificación morfo-climática del karst de México, en donde la Reserva de la Biosfera El Cielo (RBEC) sería considerada como un “Karst Tropical” dentro del “Karst de Montañas Plegadas y Falladas”. Por otro lado, Cámara-Artigas y González Rodríguez (2005) indican que el karst en la RBEC es muy particular, ya que representa al karst tropical de colinas y montañas, pero inmerso en el continente. Adicionalmente, ellos hacen una breve descripción cualitativa de las formas exógenas y endógenas que se observan en algunas porciones de la RBEC.

Por la riqueza geológica, ecológica, hídrica y paisajística de la RBEC, se han generado múltiples investigaciones y mapas temáticos de la zona (Caballero-Rico et al., 2020a); sin embargo, hasta ahora ninguno había identificado y clasificado, en forma detallada, las depresiones kársticas que en ella ocurren. Se espera que esta nueva cartografía apoye la planificación de la adopción de medidas de protección para continuar preservando el ecosistema y los recursos hídricos ante el cambio climático y el desarrollo urbano en curso.

2. Descripción del área de estudio

La RBEC es un área natural protegida promulgada como reserva estatal el 13 de julio de 1985, y un año más tarde, ingresa a la Red Mundial de Reservas de la Biosfera del programa Hombre y la Biosfera, de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO (Caballero-Rico et al., 2020b). La RBEC se ubica en el sureste del estado de Tamaulipas, en los municipios de Gómez Farías, Llera, Jaumave y Ocampo (Figura 1) y cubre una parte de la Sierra Madre Oriental en las vertientes conocidas como Sierra Santa Fe y la Sierra Chiquita, presentando una topografía muy accidentada donde el punto de menor altitud es de 100 m s.n.m. y el de mayor altitud es de 2300 m s.n.m. García y Sánchez (1996), consideran la RBEC como una región climática muy dinámica debido a: la variación térmica que va de 24°C en zonas bajas a 12°C en zonas altas; la heterogeneidad climática compuesta por los climas templado (Cb), semicálido (AC) y cálido (Aw) (García, 1964), y a su intervalo de precipitación que es de 504 mm a 2555 mm de lluvia anual.



Figura 1. Ubicación de la RBEC / Figure 1. Location of the RBEC.

La mayoría de los escurrimientos superficiales al interior de la RBEC son intermitentes, sin embargo, existen dos ríos perennes importantes en sus inmediaciones: en el límite norte el Río Guayalejo, y al este el Río Sabinas, ambos alimentados por las diversas corrientes de agua intermitentes que fluyen a través de los numerosos valles fluviales kársticos al este y oeste de la RBEC.

La disposición de la vegetación en la RBEC es diversa y es reflejo de la distribución de drenaje irregular y la variedad climática presente. Gran parte de la zona está cubierta por densas masas arbóreas que favorecen el crecimiento irregular de las formaciones kársticas debido a la meteorización biológica (Gutiérrez, 2008). En la vertiente oriental, se presentan distintos tipos de zonas de selva, en altitudes de entre 400 a 1000 m s.n.m. La región central del área, está conformada por bosque mesófilo de montaña, bosque de encino, bosque de pino-encino y bosque de encino, que se encuentran entre los 800 y 2200 m s.n.m., y al noroeste se pueden encontrar matorrales con altitudes entre 650 y 1900 m s.n.m. de acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018a).

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2004) la litología en la RBEC está compuesta principalmente por sucesiones sedimentarias carbonatadas del Cretácico Inferior, pertenecientes a las formaciones El Abra (que abarca el 85 % de la RBEC), Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior. Estas rocas subyacen a caliza arcillosa y lutita calcárea del Cretácico Superior, pertenecientes a las formaciones Agua Nueva y San Felipe. En menor proporción se encuentran afloramientos conformados por secuencias de lutita calcárea representadas por las formaciones Méndez y Cárdenas. Ocasionalmente, se presentan horizontes conglomeráticos, cuerpos basálticos, traquíticos, sedimentos fluvio-lacustres y aluviales del Cenozoico.

La heterogeneidad del medio físico, propicia un paisaje kárstico de gran riqueza y extensión en la RBEC, que puede clasificarse dentro de tres categorías del karst (Jennings, 1987). La primera es el karst subhúmedo caracterizado por campos de dolinas, desarrollado en las partes altas y planas de cerros calcáreos convexos con laderas empinadas. La segunda categoría es el karst tropical desarrollado en regiones cálidas y húmedas, caracterizado por cerros residuales separados por grandes dolinas o planicies aluviales. Por último, el karst de bosque lluvioso localizado en la parte más alta de la Sierra Madre Oriental, en condiciones climáticas frías y húmedas, con dolinas separadas por aristas estrechas.

3. Metodología

3.1. Generación de la base cartográfica

Para la identificación de las depresiones kársticas y elaboración del mapa resultante “Depresiones kársticas en la Reserva de la Biósfera El Cielo”, se utilizó el software ArcGis Pro, versión 3.0 y su conjunto de herramientas Spatial Analyst. La agrupación de las depresiones kársticas por el método estadístico K medias se llevó a cabo con el software IBM SPSS Statistics 28.0.0.0.

La proyección cartográfica utilizada en el mapa fue Universal Transversal de Mercator zona 14 norte (UTM 14N) datum WGS 1984, escala 1:200,000. El área mínima cartografiable que corresponde a esta escala es de 640,000 m² de acuerdo con la propuesta de Salitchev (1979). De las 1578 depresiones kársticas identificadas en la RBEC, 1516 no cumplen con el área mínima cartografiable debido a sus características morfológicas, por lo que podrían considerarse para ser eliminadas del mapa. Sin embargo, se tomó la decisión de no eliminarlas, ya que de otro modo en el mapa quedarían únicamente 62 depresiones, desapareciendo las más pequeñas.

Se realizó una recopilación de datos vectoriales y ráster para ser usados como capas base durante la construcción del mapa, a las que se añadió la capa vectorial resultante de la presente investigación (capa vectorial de depresiones kársticas). Adicionalmente, se recurrió a una serie de capas vectoriales y documentales (digitalizadas en formato vectorial) de diversos contenidos para establecer un contexto cartográfico integral sobre el medio físico de la RBEC, esta información fue montada en un mapa 3D en la plataforma web ArcGis Online. Cada una de las capas base y del medio físico fueron reproyectadas al sistema de coordenadas utilizado en el mapa (UTM 14N, datum WGS 1984).

Las capas utilizadas en el mapa base se enlistan a continuación:

- Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020 (polígono de la RBEC), escala 1:1,000,000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2020).
- Marco Geoestadístico 2021, capas de polígonos municipales y localidades ameznadas, escala 1:4,000,000 (INEGI, 2021).
- Cartas topográficas (toponímicos y manantiales), escala 1:50,000, F14A38, F14A39, F14A48, F14A49, F14A58, F14A59 (INEGI, 2018a).
- Red hidrográfica de la RH25 Pánuco (corrientes y cuerpos de agua), escala 1:50,000 (INEGI, 2010).
- Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) versión 3.0, con definición de 15 m, recortado en función del polígono de la RBEC (INEGI, 2012a). De este archivo se extrajeron las curvas de nivel con separación de 20 m usadas en el mapa base.

Las capas del medio físico utilizadas en el mapa 3D fueron las siguientes:

- Cartas geológicas-mineras escala 1:250,000 F14-2, F14-5, Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1999, 2004).
- Uso de suelo y vegetación serie VII, escala 1:250,000 (INEGI, 2018b).

- Mapas estáticos digitalizados del artículo de García y Sánchez (1996): "Análisis climático de la Reserva de la Biosfera El Cielo".

El mapa 3D elaborado sobre la plataforma de ArcGis Online, puede consultarse desde el portal de la revista.

3.2. Identificación de depresiones kársticas

El procedimiento para la identificación, clasificación y cartografía de las depresiones kársticas de la RBEC se desarrolló a través de la siguiente secuencia: 1) identificación automatizada de estructuras; 2) fotointerpretación de valles fluviales kársticos longitudinales y transversales; 3) fotointerpretación de depresiones kársticas no identificadas automáticamente; 4) eliminación de depresiones menores dentro de formas mayores; 5) definición de índices morfométricos para poder agrupar las depresiones; 6) clasificación inicial de las depresiones a través de parámetros morfométricos preestablecidos; 7) generación de "clusters" para las dolinas A y B, por medio del método estadístico de K medias; y 8) obtención de catálogo completo de depresiones kársticas y su cartografía.

3.2.1. Identificación automatizada de estructuras

En esta etapa de la metodología, se identificaron las depresiones utilizando el CEM (que es un modelo digital de elevaciones o MDE) como base de relieve de la RBEC. Para obtener las depresiones de manera automatizada, se utilizó el método de Wu et al. (2015), como script/herramienta de ArcGIS 10.3 en lenguaje de programación Python (implementado en ArcGis Pro). Se trata de una herramienta compleja que detecta las celdas del MDE que se encuentran rodeadas por celdas vecinas con mayor altitud, y las rellena incrementando la altitud de las celdas detectadas hasta el punto de rebose (Paredes, 2019). La herramienta de Wu permite extraer de manera jerárquica las depresiones durante el proceso de relleno de las celdas, identificando depresiones interiores a las de mayor extensión por medio del modelo conceptual de árbol de contorno localizado (Wang y Liu, 2006), que detecta conjuntos de depresiones anidadas (para mayor referencia relacionada con la funcionalidad de la herramienta, se recomienda consultar el trabajo de Wu et al., 2015).

La metodología automatizada de Wu et al. (2015) utilizada en la presente investigación, permite inferir información que se escapa a la vista durante la fotointerpretación. Integrando las identificaciones de la metodología de Wu et al. (2015), incrementa un 24 % del total de las depresiones de la RBEC.

El resultado obtenido es un archivo vectorial que representa las áreas planas artificiales que ocupan depresiones, contabilizando las que posteriormente se clasificaron en dolinas, uvalas y poljes. Es importante señalar que los valles fluviales kársticos (estructuras irregulares de gran tamaño) no pueden identificarse por este método automatizado.

3.2.2. Fotointerpretación de estructuras

Exclusivamente para esta fase del procedimiento, se estructuró un mapa base conformado por curvas de nivel con separación de 20 m, extraídas de las seis cartas topográficas escala 1:50,000, enlistadas en el apartado anterior. Posteriormente, se elaboró un archivo ráster de sombras construido a partir del CEM que, al sobreponerlo con las curvas de nivel, constituyó la base sobre la cual se hizo la fotointerpretación de la zona. La delimitación de los polígonos de las depresiones se logró al identificar la disminución de altitud en las curvas de nivel cerradas (Figura 2).

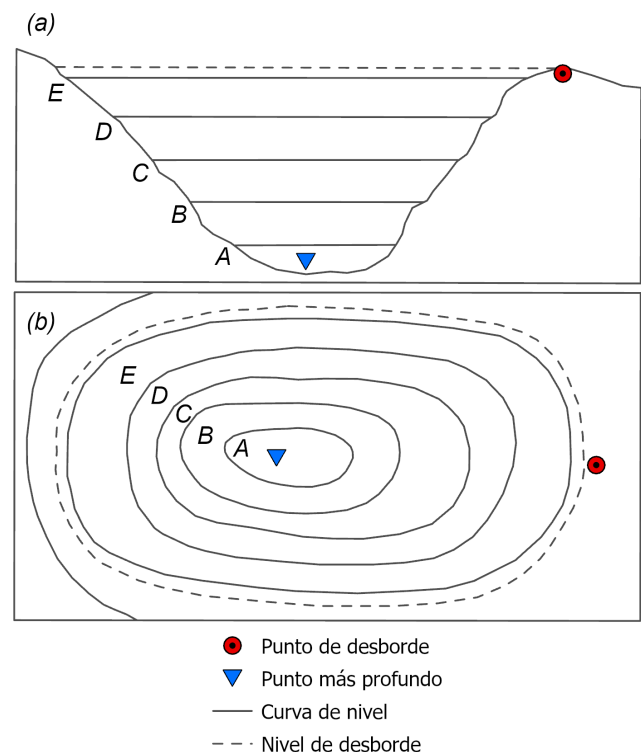


Figura 2. Identificación de depresiones: a) perfil longitudinal, b) curvas de nivel. Fuente: Wu et al., 2015 / Figure 2. Identification of depressions: a) longitudinal profile, b) contour lines. Source: Wu et al., 2015.

Para optimizar la fotointerpretación, se utilizaron las 17 imágenes LiDAR (Light Detection And Ranging) de INEGI (2012b) disponibles para la RBEC con una resolución espacial superior al CEM (resolución de 5 m contra 15 m respectivamente), creando el mosaico que cubrió las franjas este y oeste del área de estudio (47.66 ha en total). La fotointerpretación está sujeta a un porcentaje de omisión que puede traducirse en la falta de identificación de depresiones kársticas. Esto se debe a que el análisis estuvo limitado por la calidad o precisión de la información base del CEM. Sin embargo, se complementó el análisis con un mosaico construido con las imágenes LiDAR, que cubre un 34.35 % de la RBEC, con definición de 5 m. Por lo tanto, el porcentaje de identificación de depresiones de forma manual usando LiDAR aumentó en un 67.18 %, en promedio.

3.2.2.1 Fotointerpretación de estructuras para la identificación de valles fluviales kársticos longitudinales y transversales

La fotointerpretación de los valles fluviales kársticos siguió una lógica diferente al resto de las estructuras, ya que no se delimitaron en función de la disminución de altitud en las curvas de nivel cerradas. Debido al tamaño de estas estructuras, su identificación fue menos compleja que el resto de las estructuras al ser muy evidentes sus elongaciones y tamaños. Para delimitar las poligonales de los valles fluviales kársticos, se tomó como base teórica lo señalado por Lugo-Hubp (2011), donde se menciona que un valle es una forma negativa del relieve con disposición estrecha y alargada, en la que, además, se puede identificar un lecho o cauce de agua (perenne o intermitente), una llanura de inundación, laderas y bordes superiores.

El método de mapeo se basó en analizar el terreno con ayuda de un mapa de pendientes obtenido a partir del CEM, la red hidrográfica de INEGI y los desniveles indicados por las curvas de nivel. La delimitación poligonal fue trazada identificando las áreas de captación de la red de distribución de drenaje, partiendo desde el punto de desfogue de cuencas o pendientes cóncavas (Furkan-Şener y Zeynel-Öztürk, 2019).

3.2.3. Definición de índices morfométricos para poder agrupar las depresiones

Los índices morfométricos propuestos, basados en los parámetros métricos de las depresiones (Paredes, 2019) son: área planimétrica (A_{real}), perímetro planimétrico (P_{real}), circularidad (c), alargamiento (AL), factor de forma (F), y elongación (E).

Paredes (2019) menciona que el A_{real} , es un concepto métrico aplicado al plano horizontal de una superficie, mientras que P_{real} evalúa la suma de las longitudes de todos los lados de un polígono plano cerrado, al tiempo que calcula la longitud del contorno poligonal que delimita el borde de la depresión en el plano horizontal con área A_{real} .

Gravelius (1914) define el índice de compacidad o circularidad a partir de A_{real} y P_{real} de cada depresión; la relación entre ambas determina cuánto se parece una curva cerrada a una circunferencia. Su ecuación es la siguiente:

$$c = \frac{P_{real}}{2\sqrt{\pi A_{real}}} \quad (1)$$

El índice de alargamiento AL se obtiene de la relación entre longitud del eje (L_{max}) o lado mayor y lado menor (L_{min}) del menor rectángulo que contiene al polígono de la depresión (Basso et al., 2013); su ecuación es la siguiente:

$$AL = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad (2)$$

Para calcular el índice de forma F se usó la fórmula de Horton (1932), que se obtiene de la relación entre A_{real} y L_{max} ; su ecuación es la siguiente:

$$F = \frac{A_{real}}{L_{max}^2} \quad (3)$$

Finalmente, para obtener la elongación E , se utilizó la ecuación de Schumm (1956), que es la relación de A_{real} con L_{max} :

$$E = \frac{2\sqrt{A_{real}}}{L_{max}\sqrt{\pi}} \quad (4)$$

Para obtener cada uno de los índices anteriores, se diseñó una herramienta con el módulo ModelBuilder de ArcGis Pro para automatizar el cálculo de cada uno de los parámetros morfométricos. Esta herramienta requiere un archivo vectorial de entrada que contenga las depresiones identificadas ya sea de manera manual o automatizada, que posea una proyección métrica cartográfica y un ID único por cada depresión/polígono. Posteriormente, sobre este archivo se crearon automáticamente campos en la tabla de atributos que contendrán cada uno de los índices morfométricos A_{real} , P_{real} , L_{max} , L_{min} , c , AL , F , y E .

3.2.4. Clasificación inicial de las depresiones a través de parámetros morfométricos preestablecidos

Una vez que se calcularon los índices morfométricos (Tabla 2), el paso siguiente del análisis consistió en clasificar todas las depresiones kársticas, de acuerdo a su tipo, de la siguiente manera: a) valles fluviales kársticos longitudinales; b) valles fluviales kársticos transversales identificados por depresiones abiertas y su alargamiento (Doğan y Özel, 2005 en Furkan-Şener y Zeynel-Öztürk, 2019); c) poljes con más de 1 km² de área (Nicod, 1961); d) uvalas, con un eje mayor superior a los 1000 m e inferior a 1 km² de área (Cvijić, J. 1893 en Čalić, 2011; Aguilar et al., 2016), y e) dolinas (menos de 500 m en su eje mayor) donde su índice de circularidad tiende a ser = 1 (Paredes et al., 2019). Cabe resaltar que esta clasificación es, en esencia, morfométrica con distinción de las clases a partir de límites predisuestos en la literatura nacional e internacional.

3.2.5. Agrupamiento de dolinas A y B por el método estadístico K medias

Esta metodología es un algoritmo de clasificación no supervisada "clusterización" que agrupa objetos en k grupos basándose en sus características. El agrupamiento se realiza minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o clúster. En este estudio utilizamos la distancia cuadrática a los centroides de únicamente dos grupos de dolinas (A y B), la convergencia absoluta se alcanzó a la onceava iteración para los cuatro índices morfométricos de dichos relieves. Las características de grupo de las dolinas A y de las dolinas B pueden observarse en la Figura 3, en donde las dolinas A tienden a ser circulares, poco alargadas, redondeadas y menos elongadas, al comparárseles con respecto a las dolinas B.

4. Resultados

Mediante los insumos del CEM y las curvas de nivel con separación de 20 m, se lograron identificar 591 depresiones kársticas. Por otro lado, la mayor resolución espacial de las imágenes LiDAR, contribuyó a mejorar la identificación de estructuras e

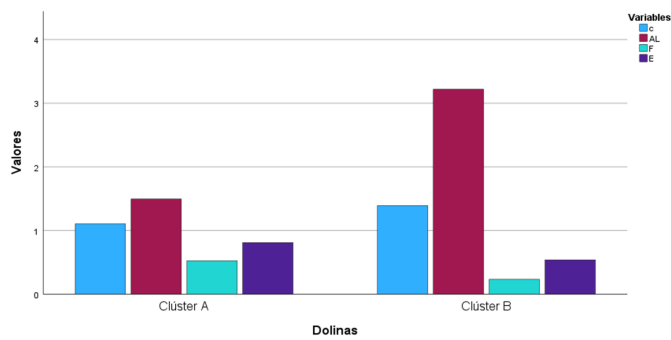


Figura 3. Agrupación por K medias / Figure 3. Clustering by K medians.

incrementó notablemente su número al sumarse 607 depresiones kársticas más, dando un total de 1198 estructuras identificadas por medio de la fotointerpretación.

Utilizando el método automatizado, se obtuvieron un total de 1196 polígonos, de los cuales 609 fueron descartados dado que están asociados a los valles fluviales kársticos, es decir, son parte de depresiones compuestas (Navidtalab y Maghami, 2020; Pardo-Igúzquiza et al., 2022). De los polígonos restantes hubo una coincidencia de 207 con respecto a los identificados manualmente, estas estructuras también fueron descartadas.

Una vez que los resultados arrojados por ambos métodos fueron sometidos a los filtros descritos, el total final de depresiones kársticas que componen el catálogo fue de 1578 estructuras para toda la RBEC (ver Tabla 1). La delimitación de las depresiones obtenidas puede consultarse en la Figura 4.

Tabla 1. Resultados morfométricos extremos totales / Table 1. Total extreme morphometrics results

Depresiones kársticas totales		
	1578	
	Mínimo	Máximo
Área (m ²)	14.58	36678196.98
Perímetro (m)	17.22	47129.85
Eje mayor (m)	7.77	15137.57
Eje menor (m)	2.63	5107.67

Tabla 2. Índices morfométricos extremos totales / Table 2. Total extreme morphometrics indexes

Circularidad	Alargamiento	Forma	Elongación
Min	Max	Min	Max
1.00	3.23	1.00	11.88
		0.03	0.88
		0.21	23.03

Los valles fluviales kársticos son el tipo de depresión más extenso en la RBEC, lo cual no sucede en el karst yucateco y

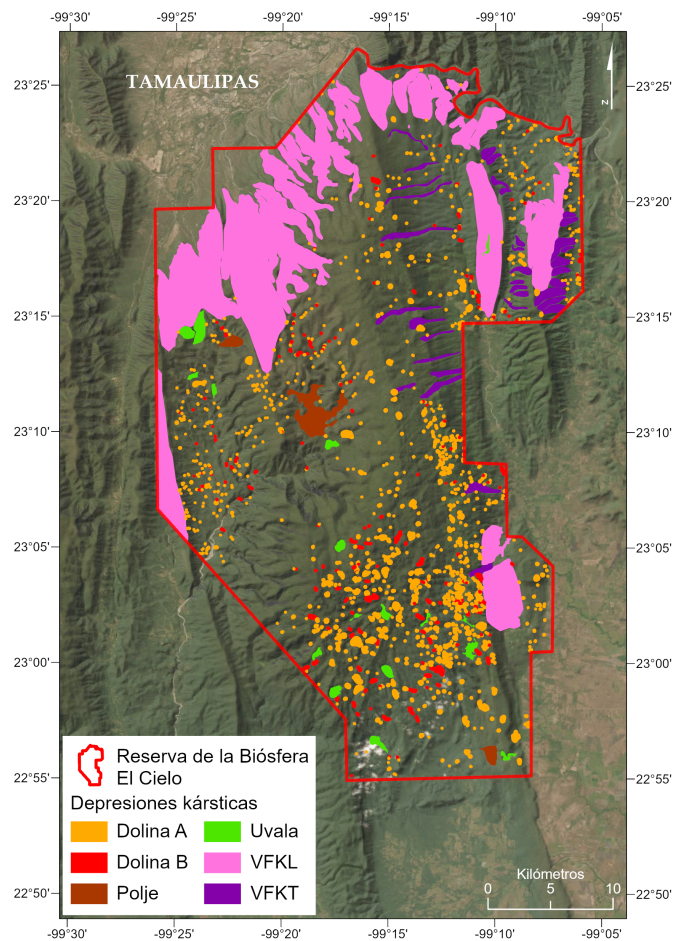


Figura 4. Depresiones kársticas identificadas. VFKL: valle fluvial kárstico longitudinal y VFKT: valle fluvial kárstico transversal. NOTA: El contorno exterior de las depresiones kársticas se aumentó en esta figura para hacer visibles las más pequeñas / Figure 4. Identified karst depressions.

otras regiones kársticas del país. Estos valles se clasificaron en dos tipos de acuerdo a su eje de orientación. Los primeros se denominaron como valles fluviales kársticos longitudinales con orientaciones N-S y NW-SE al norte de la RBEC. Se destacan por conformar cuencas alargadas en un desarrollo de “karsticidad” de erosión fluvial a lo largo del macizo rocoso, creando superficies cóncavas con altos gradientes de pendiente, e incluso, formando cañones profundos de hasta 594 m de profundidad. Se identificaron 35 de estos valles en la RBEC. Los segundos se denominaron valles fluviales kársticos transversales con orientaciones NE-SW y NW-SE, presentes a lo largo de los flancos de los anticlinales de la RBEC. Se caracterizan por desarrollarse de manera perpendicular y oblicua al eje del plegamiento. Son producto de fracturamiento extensional, ocasionado por esfuerzos compresivos que cortan de manera perpendicular y oblicua los anticlinales. Se identificaron también 35 de estos valles en la RBEC.

Las dolinas son las depresiones de mayor abundancia a lo largo de toda la RBEC, teniendo una alta densidad al sureste

Tabla 3. Datos morfométricos extremos de acuerdo con la clasificación / Table 3. Extreme morphometrics data according with the classification.

Clasificación	Cantidad	Área (m ²)		Perímetro (m)		Eje Mayor (m)		Eje menor (m)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
VFKL	35	13486.97	36678196.99	513.65	47129.85	218.78	15137.58	87.74	5107.67
VFKT	35	264540.80	1964049.45	2499.69	13154.53	974.49	6232.56	333.78	1213.13
Poljes	3	1313972.67	8423103.37	4996.80	26036.31	1791.70	4689.94	1009.60	4200.57
Uvalas	17	166806.10	1844015.82	2442.08	6548.47	1017.02	2760.47	347.30	1066.82
Dolinas B	200	172623.84	14.58	2445.58	17.23	959.28	7.78	331.93	2.64
Dolinas A	1288	375585.94	26.64	2673.40	23.96	954.10	9.22	642.86	4.45

*VFKL: valle fluvio kárstico longitudinal; VFKT: valle fluvio kárstico transversal.

Tabla 4. Índices morfométricos extremos de acuerdo con la clasificación / Table 4. Extreme morphometrics indexes according with the classification

Clasificación	Cantidad	Circularidad		Alargamiento		Forma		Elongación	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
VFKL	35	1.16	2.97	1.51	6.79	0.07	0.43	0.30	0.74
VFKT	35	1.12	3.24	1.77	11.88	0.04	0.41	0.21	0.72
Poljes	3	1.22	2.53	1.12	2.00	0.32	0.42	0.64	0.73
Uvalas	17	1.06	2.32	1.36	4.21	0.09	0.56	0.34	0.85
Dolinas B	200	2.23	1.15	8.07	2.23	0.35	0.07	0.67	0.30
Dolinas A	1288	1.99	1.01	2.37	1.00	0.89	0.20	1.06	0.50

*VFKL: valle fluvio kárstico longitudinal; VFKT: valle fluvio kárstico transversal.

del área. Morfológicamente, se aprecian dos tipos de dolinas. Las catalogadas como Dolinas A tienden a ser circulares, poco alargadas, redondeadas y menos elongadas que las Dolinas B. Se identificaron 1288 dolinas A y 200 dolinas B.

Las uvalas están definidas por su forma elongada, además de ser ovaladas e irregulares, teniendo su eje mayor superior a los 1000 m. Su distribución domina en el sur de la RBEC. Sin embargo, existe una depresión aislada (ubicada al NE) que se encuentra dentro de un valle fluvial kárstico longitudinal que, por su valor de alargamiento, es considerado (no se eliminó) dentro del catálogo para este tipo de depresiones. Se identificaron 17 uvalas en la RBEC.

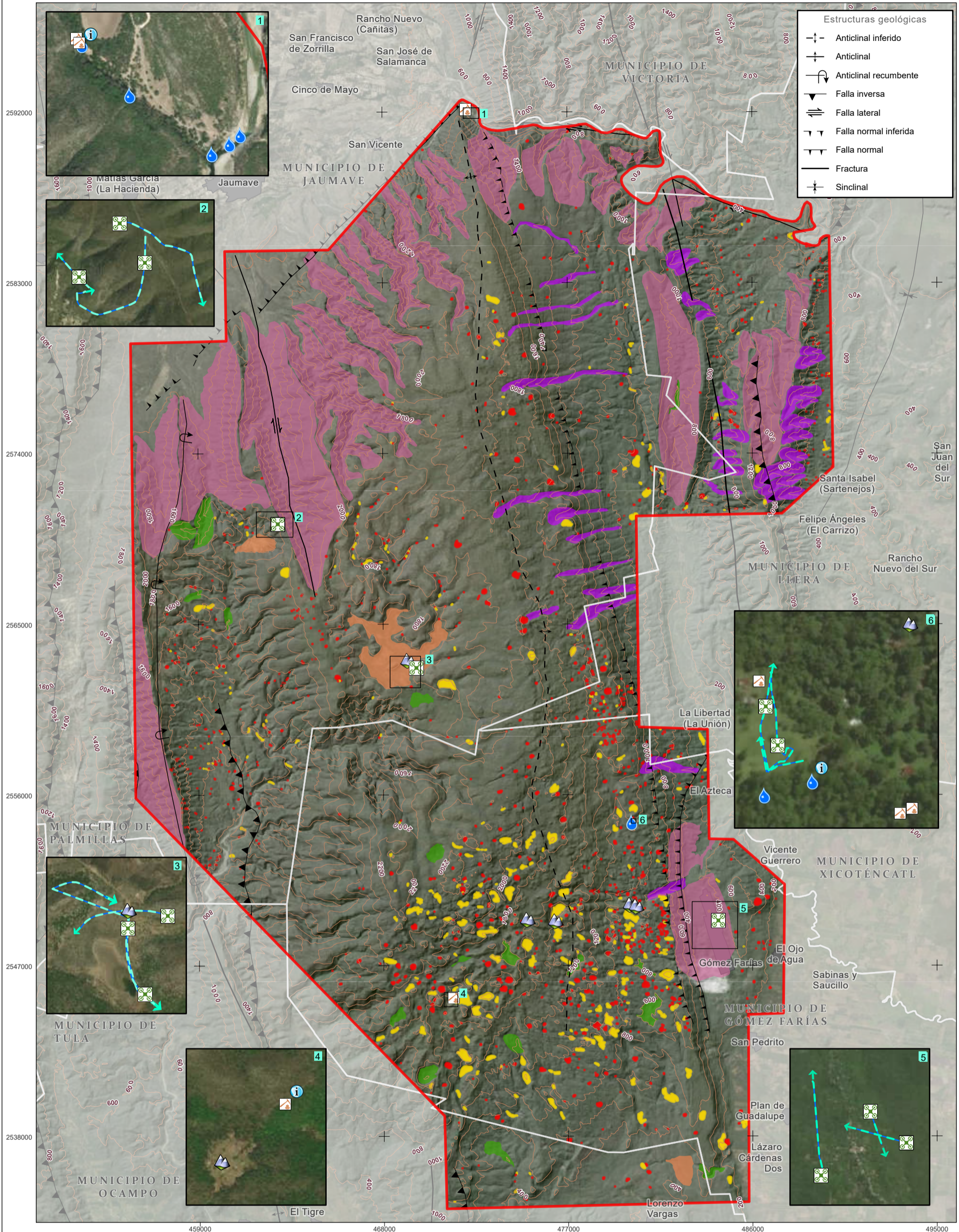
Las depresiones de menor cantidad fueron clasificadas como poljes, diferenciándose de las uvalas por abarcar un área superior a 1 km². En toda la RBEC, se identificaron 3 poljes ubicados al oeste y suroeste. Además de su área, los poljes presentan pendientes de poca inclinación.

Los parámetros morfométricos e índices por clasificación, pueden consultarse en las Tablas 3 y 4, respectivamente. El mapa de Depresiones kársticas en la Reserva de la Biosfera El Cielo, contiene adicionalmente las estructuras geológicas de la zona de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2004). Una versión multimedia de este último puede consultarse en línea [aquí](#) utilizando las siguientes credenciales: Usuario: Reserva, Contraseña: Elcielo.

5. Conclusiones

Mediante un procedimiento cartográfico semiautomatizado, complementado por un método estadístico de agrupación por K medias, se identificaron 1578 depresiones kársticas; mismas que se catalogaron y representaron cartográficamente de la siguiente manera: a) 35 valles fluviales kársticos longitudinales; b) 35 valles fluviales kársticos transversales; c) 3 poljes; d) 17 uvalas; e) 200 dolinas B, y f) 1288 dolinas A. Las depresiones kársticas ocupan un 26.4 % de la extensión total de la RBEC; siendo los valles fluviales kársticos longitudinales los que ocupan la mayor área (14.88 %). Ello implica que los pliegues y cabalgaduras NW-SE en la sucesión sedimentaria carbonatada, ocurridos durante la Orogenia Mexicana en el noreste mexicano y su posterior exhumación, juegan un papel sobresaliente tanto en el desarrollo del karst tropical, como para el balance de agua que se infiltra y favorece la disolución de la roca; así como para la erosión fluvial que arrastra y desgasta las formaciones geológicas en superficie, hasta llegar a su nivel base. La representación cartográfica del karst que se ha desarrollado para la RBEC en este trabajo, es parte del conocimiento multidisciplinario necesario para planificar y proponer medidas de protección que preserven el ecosistema y los recursos hídricos ante el cambio climático y el desarrollo urbano.

Depresiones kársticas en la Reserva de la Biósfera El Cielo



Explicación

Depresiones kársticas

- Dolina A
- Dolina B
- Polje
- Uvala
- Valle fluvial kárstico longitudinal
- Valle fluvial kárstico transversal

Referencias geográficas

- Reserva de la Biósfera El Cielo
- Localidad amanzanada

— Límite municipal

Curva de nivel principal (200m)

Ruta de vuelo de dron

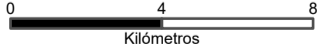
Íconos multimedia

- Rasgo geológico
- Medio ambiente/paisaje
- Manantial
- Vuelo/video de dron
- Información documental



Proyección.....UTM
Zona UTM.....14N
Datum.....WGS84
EPSG.....32614
Cuadrícula.....UTM cada 9000 m.

Escala: 1:200,000



Jerjes Rigoberto Pantoja-Irrys¹, Christian Santillanes-Gutiérrez²,
Luis Eduardo Arista-Cázares³, Lizbeth Ramírez-Colín⁴, Daniela Hernández-García⁵,
Hugo Mujica-Sánchez⁶, Mark Wagner⁶
¹Corporación Ambiental de México
²Arcadis US.

Referencias cartográficas:
División política, rasgos topográficos e hidrográficos: INEGI 2010, 2018 y 2021;
Geología: SGM 1994 y 2004;
Polígono de la Reserva de la Biósfera El Cielo: CONABIO, 2020;
Imagen satelital: ESRI-Earthstar Geographics 2021.

Software

Se utilizó el programa para SIG ArcGis Pro versión 3.0 de la compañía ESRI, tanto para la fotointerpretación como para la identificación semiautomatizada. También con este programa se realizó el diseño y montaje del mapa final denominado “Depresiones kársticas en la Reserva de la Biosfera El Cielo”. Para clasificar las dolinas A y B por el método estadístico de k-medias se empleó el software IBM SPSS Statistics 28.0.0.0.

Agradecimientos y financiamiento

Al personal de la empresa Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V., por su incondicional apoyo técnico, logístico y económico. A los doctores Yam Zul Ernesto Ocampo Díaz y Gustavo Martín Morales por sus atinadas aportaciones y sugerencias que mejoraron significativamente el contenido de esta investigación. El presente trabajo fue elaborado con recursos propios de la empresa Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V.

Referencias

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M., Frausto, O., Ihl, T., 2016. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 78 (2), 51–60, <https://www.doi.org/10.4311/2015ES0124>.
- Back, W., Hanshaw, B. B., Herman, J. S., Van Driel, J. N., 1986. Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico. *Geology* 14 (2), 137–140, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<137:DDOAPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<137:DDOAPR>2.0.CO;2).
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M., Pepe, M., 2013. Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environmental Earth Sciences* 70 (6), 2545–2559, <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2297-z>.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J. A., 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135 (3), 308–321, <https://www.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.014>.
- Caballero-Rico, F. C., Ramírez-de León, J. A., Roque-Hernández, R. V., Caballero-Rico, F. C., Ramírez-de León, J. A., Roque-Hernández, R. V., 2020a. Análisis de la generación de conocimiento en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México y la vinculación con su programa de manejo. *CienciaUAT* 15 (1), 24–47, <https://www.doi.org/10.29059/cienciauat.v15i1.1326>.
- Caballero-Rico, F. C., Roque Hernández, R. V., Vanoye, E., 2020b. Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México: Generación y transferencia del conocimiento para decisiones basadas en evidencia. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores* VII (3), 51, <https://doi.org/10.46377/dilemas.v36i1.2350>.
- Calić, J., 2011. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. *Geomorphology* 134 (1), 32–42, <https://www.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.029>.
- Carranco-Lozada, S.E., 2011. Evaluación de la calidad química del agua subterránea en el acuífero cárstico de San Luis Potosí: Guanajuato, México. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guanajuato.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2020. Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020. Escala 1: 1000000 (en línea). CONABIO, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Conc, S., Oliveira, T., Portas, R., Cerne, R., Breg Valjavec, M., Krofel, M., 2022. Dolines and Cats: Remote Detection of Karst Depressions and Their Application to Study Wild Felid Ecology. *Remote Sensing* 14 (3), 656, <https://doi.org/10.3390/rs14030656>.
- Cámara-Artigas, R., González-Rodríguez, L., 2005. Un karst tropical en la Sierra Madre Oriental. En: Sanchez-Ramos, G., Reyes-Castillo, P., Dirzo, R. (Eds.), *Historia natural de la Reserva de la Biosfera El Cielo*, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Elliot, W.H., 2016. Cave ecology and biodiversity in the Sierra de El Abra Region. En: Keene, A., Yoshizawa, M., McGaugh, S. (Eds.), *Biology and Evolution of the Mexican Cavefish*. Academic Press, pp. 59–76.
- Espinasa, L., Espinasa, M., 2016. Hydrogeology of Caves in the Sierra de El Abra Region. En: Keene, A., Yoshizawa, M., McGaugh, S. (Eds.), *Biology and Evolution of the Mexican Cavefish*. Academic Press, pp. 41–58.
- Espinasa-Pereña, R., Nieto-Torres, A., 2015. Análisis de la vulnerabilidad a fenómenos kársticos: México. Reporte Técnico. CENAPRED.
- Fish, E. J., 1977. Karst Hydrogeology and Geomorphology of the Sierra de El Abra and the Valles-San Luis Potosí Region, México. Tesis doctoral. McMaster University.
- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., Pereira, A., 2014. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 31 (1), 127–137.
- Fumey, J., Hinaux, H., Noirot, C., Thermes, C., Rétaux, S., Casane, D., 2018. Evidence for late Pleistocene origin of *Astyanax mexicanus* cavefish. *BMC Evolutionary Biology* 18, 43, <https://doi.org/10.1186/s12862-018-1156-7>.
- Furkan-Sener, M., Zeynel-Ozturk, M., 2019. Relict drainage effects on distribution and morphometry of karst depressions: a case study from central Taurus (Turkey). *Journal of Cave and Karst Studies* 81 (1), 33–43.
- García, E., Sánchez Santillán, N., 1996. Análisis climático de la Reserva de la Biosfera "El Cielo". *Revista geofísica* (45), 181–199.
- García, E., 1964. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gravelius, H., 1914. *Grundriß der gesamten Gewässerkunde, Band 1: Flusskunde*. (Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German), Germany: Goschen, Berlin.
- Gutiérrez Elorza, M., 2008. *Geomorfología*. Pearson/Prentice Hall, number: 71.
- Horton, R. E., 1932. Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union* 13, 350–361, <https://www.doi.org/10.1029/TR013i001p00350>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. Conjunto vectorial red hidrográfica (corrientes y cuerpos de agua), escala 1: 50000 (en línea). INEGI, <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012a. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) versión 3.0, con definición de 15m, (en línea). INEGI, <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012b. Imágenes de Alta Resolución LiDAR escala 1:10000 claves F14A38F2, F14A38F3, F14A38F4, F14A39F3, F14A48C1, F14A48C2, F14A48C3, F14A48C4, F14A48F1, F14A48F2, F14A48F4, F14A49E4, F14A49B1, F14A49B3, F14A49E1, F14A49E2, F14A49E3 (en línea). INEGI, <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018a. Cartas topográficas escala 1: 50000 claves F14A38, F14A39, F14A48, F14A49, F14A58, F14A59 (en línea). INEGI, <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018b. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250000 serie VII Conjunto Nacional (en línea). INEGI, <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2021. Marco Geoestadístico 2021 escala 1: 4000000 (en línea). INEGI, <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>.
- Jennings, J., 1985. *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell Inc.
- Lugo-Hubp, J., 2011. *Diccionario Geomorfológico*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J.F., Espinosa-Pereña, R., 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 10 (2), 143–150.
- Mitchell, R.W., Russell, W.H., Elliott, W.R., 1977. Mexican eyeless Characin fishes, genus *Astyanax*: environment, distribution, and evolution. *Spec. Publ. Mus. Texas Tech. Univ.*
- Mora Palomino, L., Bonifaz, R., López-Martínez, R., 2016. Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68 (3), 377–

- 394, <https://www.doi.org/10.18268/BSGM2016v68n3a1>.
- Morán Ramírez, J., Ramos Leal, J. A., López Álvarez, B., Carranco-Lozada, S., Santacruz-De León, G., 2013. Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 65 (1), 71–82, <https://www.doi.org/10.18268/BSGM2013v65n1a6>.
- Navidtalab, A., Maghami Moghim, G., 2020. Climate, lithology, and tectonics interaction in shaping a hazardous salt karst: A case from the middle–late Miocene (?) evaporite succession of NE Iran. *Geomorphology* 356, 107067, <https://www.doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107067>.
- Nicod, J., 1961. J. Cvijic, La géographie des terrains calcaires. *Méditerranée* 2 (4), 82–86.
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán-Valsero, J. J., Dowd, P. A., Luque-Espinar, J. A., Heredia, J., Robledo-Ardila, P. A., 2022. Geodiversity of closed depressions in a high relief karst: Geoeducation asset and geotourism resource in the "Sierra de las Nieves" National Park (Málaga Province, Southern Spain). *International Journal of Geoheritage and Parks* 10 (2), 196–217, <https://www.doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.04.001>.
- Paredes, C., Matos, H., De la Vega, R., Pardo, E., 2019. Reconocimiento semiautomático de depresiones kársticas mediante análisis clúster de las distribuciones morfométricas y su aplicación al karst del Estado de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 36 (2), 270–288, <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.2.1017>.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., Marin, L., 2002. The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review* 44 (3), 191–221, <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.3.191>.
- Pérez-Corona, F.Y., 2011. Caracterización Geofísica de Ambientes Cársticos, Caso: Polje de Joya de Luna, San Luis Potosí, México. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Salitchev, K. A., 1979. Cartografía. Pueblo y educación.
- Schumm, S. A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *GSA Bulletin* 67 (5), 597–646, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2).
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1999. Carta geológica-minera escala 1: 250000 clave F14-2 (en línea). SGM, <https://www.sgm.gob.mx/CartasPdf/Inicio.jsp>.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2004. Carta geológica-minera escala 1: 250 000 clave F14-5 (en línea). SGM, <https://www.sgm.gob.mx/CartasPdf/Inicio.jsp>.
- Tarolli, P., Mudd, S. M., 2020. Introduction to remote sensing of geomorphology. En: Tarolli, P., Mudd, S. M. (Eds.), *Developments in Earth Surface Processes. Vol. 23 of Remote Sensing of Geomorphology*. Elsevier, pp. xiii–xv, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6>.
- Wang, L., Liu, H., 2006. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science* 20 (2), 193–213, <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>.
- Wu, Q., Liu, H., Wang, S., Yu, B., Beck, R., Hinkel, K., 2015. A localized contour tree method for deriving geometric and topological properties of complex surface depressions based on high-resolution topographical data. *International Journal of Geographical Information Science* 29 (12), 2041–2060, <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1038719>.

This article accompanies the following material:

Static map: [10.22201/igg.25940694e.2022.2.97.209](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2022.2.97.209)

Interactive map: [10.22201/igg.25940694e.2022.2.97.210](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2022.2.97.210)