

## Geomorfología de la isla de Cozumel, Quintana Roo, México

### *Geomorphology of Cozumel Island, Quintana Roo, Mexico*

Isaac Quijada Mendoza\* y José Juan Zamorano Orozco\*\*

Recibido: 17/05/2024. Aceptado: 5/08/2024. Publicado: 07/11/2024.

**Resumen.** La isla de Cozumel, ubicada al sureste de México, en el Mar Caribe, presenta un paisaje sedimentario complejo y único. Este territorio insular de 482 km<sup>2</sup> se caracteriza por depresiones kársticas, vestigios arrecifales emergidos y lagunas costeras.

La investigación se centra en la elaboración cartografía geomorfológica detallada, destacando la importancia de comprender la tectónica y factores climáticos que influyen en su paisaje y dinámica kárstica.

La evolución geológica de Cozumel se remonta al Mesozoico, con procesos asociados al *rifting*. El Cretácico Superior y el Paleoceno son fases cruciales en la formación de la Placa del Caribe. Durante el Eoceno, la isla experimentó movimientos tectónicos complejos, ascendiendo gradualmente como un bloque de compresión.

La fluctuación del nivel del mar desde el Oligoceno hasta el Cuaternario y la movilidad de bloques de compresión permitieron la formación de falsos atolones y bancos de carbonato, formando el Sistema Arrecifal Mesoamericano.

La metodología de la investigación involucró la adquisición de datos LiDAR, imágenes satelitales y validación en campo. El mapa geomorfológico final destaca la complejidad del relieve de Cozumel, que incluye crestas arrecifales, plataformas, terrazas, lagunas costeras y minas a cielo abierto. De igual manera, se hace una tipología del litoral, identificando plataformas de abrasión, acantilados, costas arenosas y con bloques de tormenta.

La investigación no solo proporciona una herramienta cartográfica valiosa para la gestión del territorio, estudios ambientales y la comprensión de la evolución geológica

y geomorfológica de Cozumel, sino también aporta una metodología que conjuga el uso de nuevas tecnologías con métodos tradicionales.

**Palabras clave:** relieve, nivel del mar, costas, tectónica, atolón.

**Abstract.** Cozumel Island, located in Quintana Roo, southeastern Mexico, is a unique geological formation extending over approximately 478 square kilometers in the Caribbean Sea. The island is about 20 kilometers off the mainland between the Cozumel Channel and the Caribbean Sea. It is home to an urban population of around 100,000 people, with a population density of approximately 40.6 inhabitants per square kilometer, mainly in the northwest of the island.

The geomorphology of Cozumel is predominantly sedimentary, which has resulted from a complex interaction between tectonic and lithological processes. The relief is characterized by a series of karst depressions — geological formations created by the dissolution of limestone rock as a result of the action of water. These depressions are mainly concentrated in the central part of the island and appear as cenotes, dolines, and sinkholes. The surface of Cozumel has been shaped by these processes, and the combination of geological and climatic factors has resulted in a varied and distinctive landscape.

Regarding its geological origin, Cozumel Island is linked to the tectonic evolution of the border of the Caribbean, North, and South American plates. During the Mesozoic,

\*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, 04510, Ciudad de México, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1161-6091>. Email: [isaacqm@geografia.unam.mx](mailto:isaacqm@geografia.unam.mx). Autor de correspondencia.

\*\*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica, 04510, Ciudad de México, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-5734>. Email: [zamojj@geografia.unam.mx](mailto:zamojj@geografia.unam.mx)

particularmente en el Cretácico Tardío, la región que incluye Cozumel experimentó importantes eventos tectónicos que condujeron a la formación de la Placa del Caribe. Esta placa colisionó con las de América del Norte y del Sur, dando lugar a la emergencia de la Arco Insular de la Península de Yucatán-Cuba.

En el Eoceno, cambios en la dinámica de la Placa del Caribe y la formación de la Arco Insular de Yucatán-Cuba establecieron las fronteras tectónicas que aún influyen en la configuración geológica de la isla. Estos procesos de rift, combinados con fluctuaciones en el nivel del mar durante el Oligoceno y Cuaternario, jugaron un papel central en la evolución del paisaje de Cozumel. Cambios en el nivel del mar, por ejemplo, condujeron a la formación de plataformas de arrecifes y falsos atollos, características comunes en la región del Caribe.

La investigación geomorfológica de Cozumel ha sido crucial para comprender el desarrollo de su relieve cárstico. Debido a la falta de mapeo detallado, este estudio busca llenar ese vacío proporcionando un inventario de las formas de la isla. Para ello, se utilizaron datos de altimetría LiDAR, imágenes satelitales y verificación en campo. LiDAR, una tecnología basada en láser que mide la distancia entre el sensor y la superficie terrestre, permitió la creación de un modelo digital del terreno de alta precisión. Las imágenes satelitales proporcionaron una visión global de las características geomorfológicas, mientras que las observaciones en campo validaron y refinaron los datos obtenidos con otros métodos.

El análisis detallado resultante reveló una variedad de formas geomorfológicas en la isla, incluyendo

crestas, plataformas calcáreas, terrazas y lagunas costeras. La cresta central de arrecife, ubicada en la zona S-SW de Cozumel, posee una alta densidad de formas cársticas y una morfología triangular que ha sido parcialmente erosionada con el tiempo. Esta característica indica el efecto prolongado de procesos erosivos, de disolución y de deposición que han moldeado el relieve de la isla.

Las plataformas calcáreas y marginales de Cozumel están asociadas con fluctuaciones en el nivel del mar y depósitos marinos que ocurrieron durante períodos de alta actividad tectónica y cambio climático. Las características de estas plataformas son similares a las de atollos y bancos en otras regiones del Caribe, como los bancos Glover y Turneffe en Belice y Chinchorro en México. Las terrazas y llanuras de inundación en la isla son áreas expuestas a fluctuaciones mareas y eventos climáticos extremos, que contribuyen a la formación de un paisaje geomorfológico diverso.

Este estudio de Cozumel también ha permitido identificar la relación entre las formas y los procesos que las han formado. Este entendimiento detallado es esencial para planificar y gestionar los recursos naturales de la isla y preservar su entorno único. La cartografía geomorfológica proporciona una base sólida para estudios futuros y estrategias de gestión ambiental, ofreciendo una visión clara de la distribución y características de las formas en Cozumel.

**Palabras clave:** forma, nivel del mar, costas, tectónica, atollos.

## INTRODUCCIÓN

Cozumel es un territorio insular que se localiza al sureste de la República Mexicana, en el estado de Quintana Roo, entre el canal de Cozumel y el mar Caribe, a 20 km entre la isla y el continente. Este territorio se encuentra entre las coordenadas 20°16'12" y 20°35'15" N y 87°01'48" y 86°43'48" W, y tiene una superficie de 478 km<sup>2</sup> (M. Mejía *et al.*, 2007). Su zona urbana se ubica en el sector NW y cuenta con una población aproximada de 100 mil habitantes con una densidad de 40.6 habitantes/km<sup>2</sup> (COESPO, 2019) (Figura 1).

Esta isla se caracteriza por su paisaje de origen sedimentario, en el que se logran distinguir vestigios arrecifales en superficie y que por sus características litológicas cuenta con una alta cantidad de depresiones cársticas, que en su porción central llega a presentar una densidad de hasta 100 unidades por km<sup>2</sup>.

En términos generales, el paisaje cárstico es complejo y de morfología propia en cada uno de los distintos territorios donde se desarrolla, sin

importar que la composición de la roca sea similar. En este sentido, el relieve de la isla de Cozumel es diferente a la porción continental de la península de Yucatán, no obstante, existe gran similitud en su litología (Trejo-Pelayo, 2020).

Cozumel se conforma a partir de interacciones compuestas por la tectónica regional y la litología, constituida por la Formación Carrillo Puerto que se caracteriza por concentrar arenas carbonatadas depositadas durante el Pleistoceno y Holoceno (Ward, 1997). Aunado a estas, los factores físico-geográficos propios de la naturaleza de la isla, como la precipitación, que de acuerdo con Orellana *et al.* (2008) varía de 1300 mm a 1500 mm, la vegetación y la hidrodinámica superficial, subterránea y marina, favorecieron arreglos fisiográficos complejos a lo largo del litoral y al interior de la isla, tales como la formación de una importante cantidad de depresiones cársticas a partir de la disolución de la roca. A través del mapa geomorfológico resultado de esta investigación, se explica la espacialidad del relieve cárstico, los procesos que definen su aspecto, el vínculo con

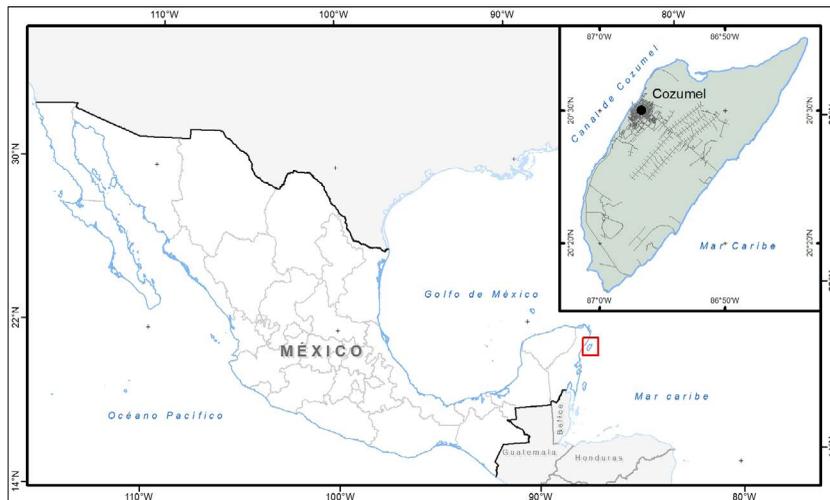


Figura 1. El recuadro rojo indica la localización de Cozumel con respecto a la República Mexicana. En el mapa de la isla se observa la distribución de la zona urbana. Fuente: elaboración propia.

la litología, el arreglo estructural y la evolución de la isla.

Los estudios geomorfológicos en Cozumel son variados y de temáticas específicas, como las morfologías de playas y tipos de costas para el uso y manejo sustentable del litoral de la isla (Colín *et al.*, 2013); plataforma y talud continental; morfometría y uso de percepción remota para la identificación automatizada y posterior cartografía de depresiones kársticas (Rodríguez *et al.*, 2021); desarrollo tectónico regional y litológico de la isla (Muckelbauer, 1990; Spaw, 1977; Valera-Fernández *et al.*, 2020); la relación entre los cambios del nivel del mar durante el Cuaternario y la evolución geomorfológica (Salgado-Garrido *et al.*, 2022); el estudio de los cenotes desde el punto de vista de la flora y fauna que habita en su interior, así como la distribución espacial por debajo de la superficie y su conexión subterránea con el mar (Frontana-Uribe y Solis-Weiss, 2011; L. Mejía *et al.*, 2006; M. Mejía *et al.*, 2007). Sin embargo, no existe antecedente de una cartografía geomorfológica detallada, que considere el territorio insular en su totalidad y que además de su valor científico, sea un inventario gráfico del relieve y su articulación con el paisaje, aspectos que permiten identificar los procesos que operan en él.

El principal objetivo de esta investigación es la elaboración de la cartografía geomorfológica detallada y su interpretación, cuyo punto de partida fue la clasificación genética del relieve, la morfología,

así como su edad relativa. El análisis del territorio proporcionó información para identificar y analizar las variables naturales que hacen del paisaje y de la dinámica hidrokárstica de la isla, un territorio único. Conocer las características morfológicas permitirá una mejor toma de decisiones en la planificación y el uso del paisaje, conservación y manejo sostenible de los recursos. Esto aporta una gran importancia a este documento por lo que deberá tomarse en cuenta al adecuar la normatividad, así como en estudios ambientales o de recursos naturales, entre otros.

### Tectónica regional y evolución de la isla de Cozumel

El origen geológico de la isla de Cozumel comienza con procesos asociados a la evolución del borde tectónico entre las placas del Caribe, Norteamérica y Sudamérica durante el Mesozoico, siendo el *rifting*, caracterizado por el estiramiento y la separación de la corteza terrestre, uno de los principales en contribuir al desarrollo tectónico de la región.

La ruptura del piso oceánico fue clave en la génesis de Cozumel y desempeñó un papel significativo durante el Mesozoico, debido a que afectó la morfología del fondo marino y estableció las bases para el eventual levantamiento de la isla (Freeland y Dietz, 1971; Kemp *et al.*, 2011; Mann *et al.*, 1999; Moore y Del Castillo, 1974; Pindell y Barret, 1990).

El Cretácico Superior (desde hace 100 a 66 millones de años) representa una fase importante en la evolución geológica de la región que daría origen a la Placa del Caribe. Durante esta época, se registran los primeros indicios de la formación de la placa, que en un inicio se manifiesta como un sector móvil en el fondo marino, cuyos límites se marcan gradualmente a medida que la plataforma se desplaza hacia el noreste, en dirección al océano Atlántico (Moore y Del Castillo, 1974; Pindell y Barret, 1990).

Durante el Paleoceno la protoplaca del Caribe continuó su tránsito submarino y al mantener su rumbo inicial, se hizo inevitable el choque frontal con la Placa de Norteamérica y de forma tangencial con la de América del Sur. Al colisionar las tres estructuras, los bordes de la protoplaca caribeña son sometidos a tensiones tectónicas intensas, en un inicio deformaron rocas y sedimentos marinos, para después fracturarlos y romperlos (*rifting*). La frontera con mayor afectación fue la norte y con ello inicia la formación del Arco Insular Península

de Yucatán-Isla de Cuba (Mann *et al.*, 1999; Pindell y Barret, 1990). En conjunto, el Cretácico Superior y el Paleoceno representan una etapa importante en la formación de la Placa del Caribe, marcando la transición de un sector móvil a la consolidación del fondo marino.

En el Eoceno la fuerza de colisión se concentra en la frontera norte, suceso que responde al cambio de rumbo de la protoplaca del Caribe, de NE a NNE. En este contexto continuó el desarrollo del Arco Yucatán-Cuba y una vez establecida la inflexión, el extremo NW de la Cuenca de Yucatán se integra al territorio continental de la Placa de Norteamericana. En ese momento quedan establecidos, los límites de la del Caribe y el arreglo tectónico de la región, mismo que se mantiene con pocas variaciones hasta el Cuaternario (Freeland y Dietz, 1971; Pindell y Barret, 1990) (Figura 2).

De acuerdo con Pindell y Barret (1990), durante el Paleógeno y Neógeno se presentaron movimientos compresivos, distensivos y transcurrentes

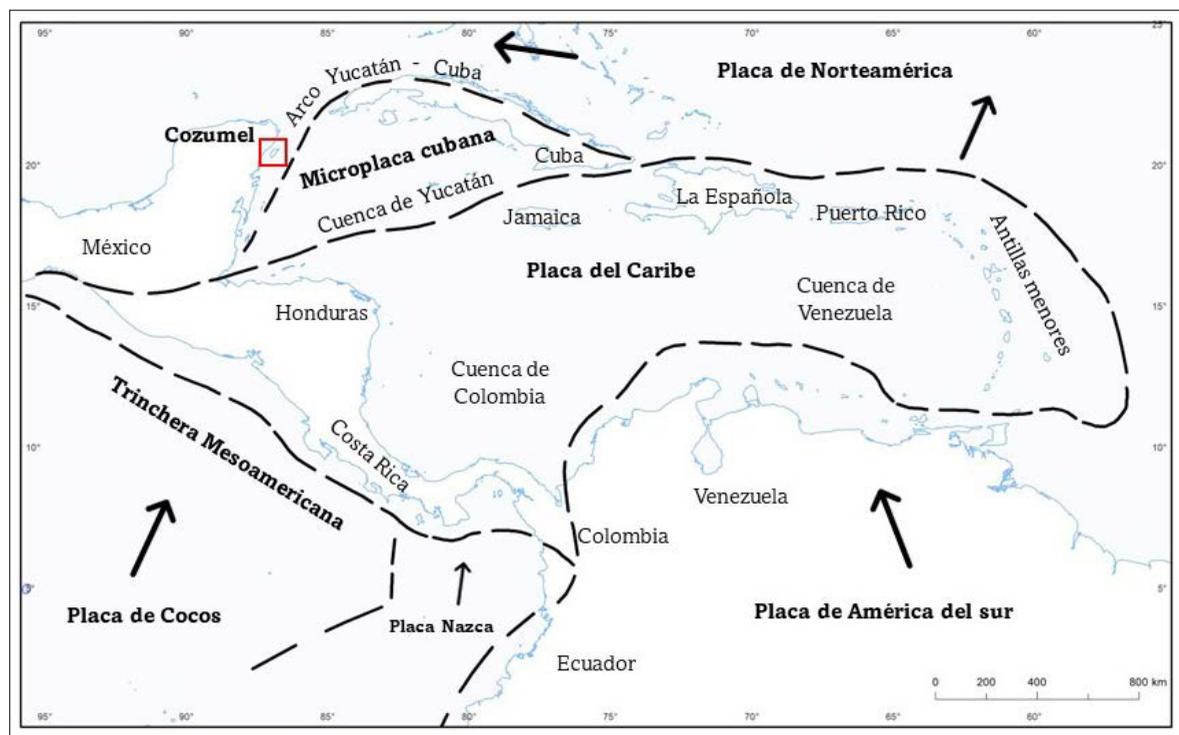


Figura 2. Arreglo Tectónico actual de la región del Caribe (DeMets *et al.*, 2010). El recuadro muestra el territorio aproximado de la isla de Cozumel y su cercanía con los bordes tectónicos entre la Placa Caribe (NW) y la de Norteamérica (NNE-SSO). El mismo encuadre, muestra terreno insular y submarino que se explica en la Figura 3. Fuente: elaboración propia.

que generaron modificaciones significativas en el piso marino, resultado del proceso del *rifting* en el Arco de Yucatán. Este fenómeno no solo causó la ruptura del lecho marino, sino que también desencadenó la formación del límite occidental de la Placa del Caribe. La frontera cercana a la isla de Cozumel tiene una orientación SW-NE, presentándose como una franja submarina rectilínea-sinuosa. La amplia extensión de esta franja submarina revela la complejidad de los procesos tectónicos subyacentes, evidenciada por su rugosidad y escalonamiento hacia el flanco marino en forma de escarpes característicos (Figura 3).

De acuerdo con Mann *et al.*, 1999 y Pindell y Barret, 1990, la historia tectónica del sector oriental de la península de Yucatán es compleja, en ella

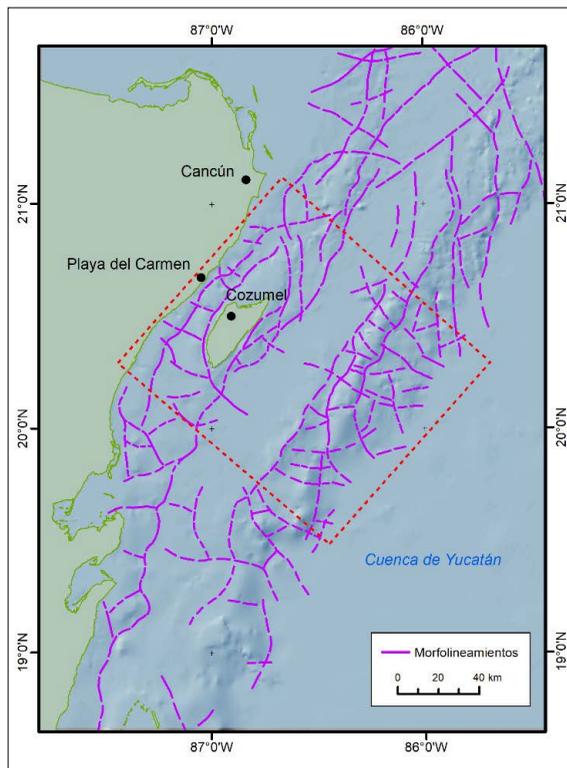


Figura 3. Límite oriental del Arco Yucatán Cuba, se integra por dos escarpes profundos orientados en dirección al océano, separados por una superficie subhorizontal-ondulada, el conjunto define una morfología escalonada. La interpretación analógica del mapa batimétrico (GEBCO, 2020) permitió la identificación morfolineamientos en arreglos ortogonales, paralelos, sinuosos, discontinuos y con desfases entre ellos. Fuente: Elaboración propia.

interactuaron procesos *rifting* como basculamientos, rotaciones, desgarres, movimientos de transpresión y transtensión. En ese contexto, la isla de Cozumel fue un bloque de compresión sumergido al igual que otras estructuras similares, mismas que iniciaron movimientos de rotación por cizalla simple durante el Eoceno, lo que favoreció su ascenso paulatino, este periodo representa la etapa más temprana de este futuro territorio insular (Figura 4).

En el momento de la deformación del piso oceánico, surgían arreglos tectónicos complejos que de forma inmediata eran cubiertos por sedimentos marinos, esta dinámica simplificó la morfología accidentada del relieve estructural. La interpretación analógica del mapa batimétrico (GEBCO, 2020) a través de los criterios de Orlova, (1976, 1981), permitió identificar la organización morfotectónica tipo *rifting* (Figura 5A) y su representación actual (Figura 5B).

Con base en lo anterior, los factores a tomar en cuenta en el origen de Cozumel son la tectónica regional y las variaciones del nivel del mar desde el Oligoceno hasta el Cuaternario. El primero, sustenta la existencia de un piso oceánico móvil, inestable y responsable de hundimientos, dislocaciones y elevación de bloques de compresión (Figura 5). En la medida que los bloques de compresión ascendían y se aproximaban a la superficie del océano, se sumaban las fluctuaciones del nivel del mar, segundo factor que permite entender la evolución de Cozumel. Su importancia se vincula con el establecimiento de condiciones fóticas, necesarias para la colonización de corales y otros organismos calcáreos de forma gradual, lo cual favoreció el desarrollo de plataformas arrecifales en los bordes de las estructuras emergentes.

Los bloques de compresión desde finales del Paleógeno hasta el Cuaternario permitieron la formación de bancos de carbonato aislados, que en conjunto integran el Sistema Arrecifal Mesoamericano; de SW-NE se encuentran los bancos Glover, Turneffe y Lighthouse pertenecientes a Belice, así como Chinchorro, Cozumel y Arrowsmith en México, todos ellos considerados como falsos atolones, con una evolución distinta, no obstante, comparten un origen geológico y tectónico (Chávez e Hidalgo, 1988).

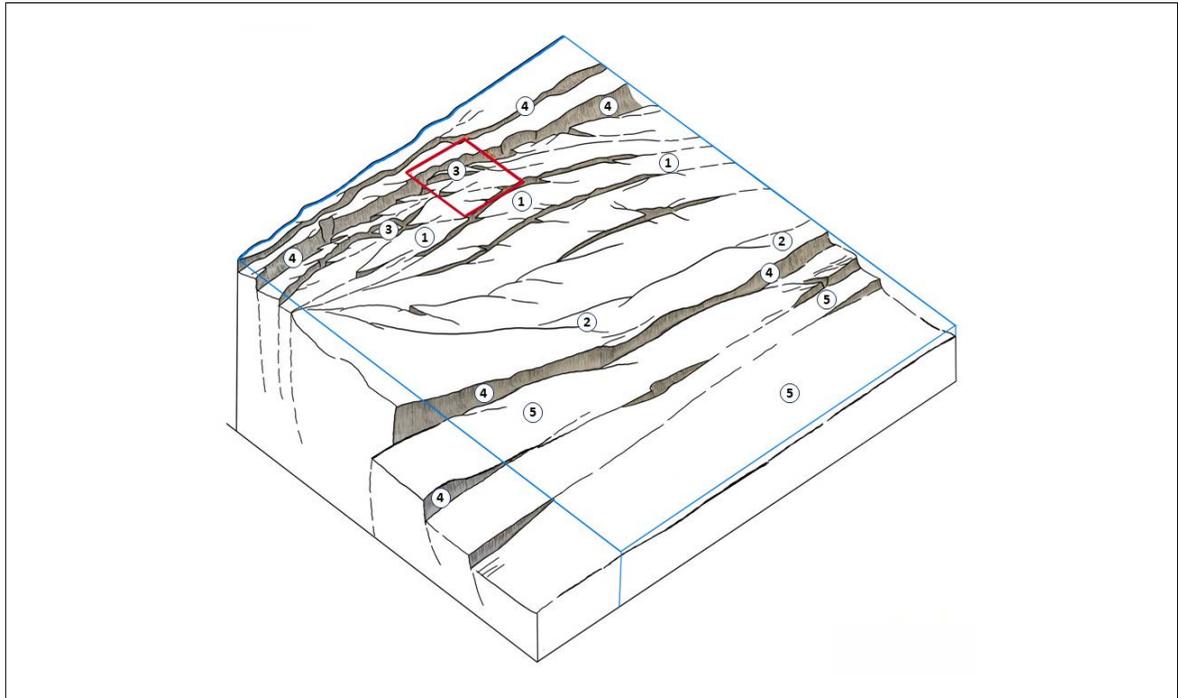


Figura 4. Deformaciones del piso oceánico frente a la costa E de Yucatán, en respuesta al establecimiento del Arco Yucatán-Cuba en el Eoceno: estructura en flor positiva, asociada a movimientos transpresivos (1) y negativa, vinculada a movimientos de transtensión (2); bloques de compresión (3); escarpes (4) y bloques de falla en gradería (5). En el recuadro rojo se observa el bloque de compresión sumergido que representa la etapa más temprana de la isla de Cozumel. Fuente: elaboración propia.

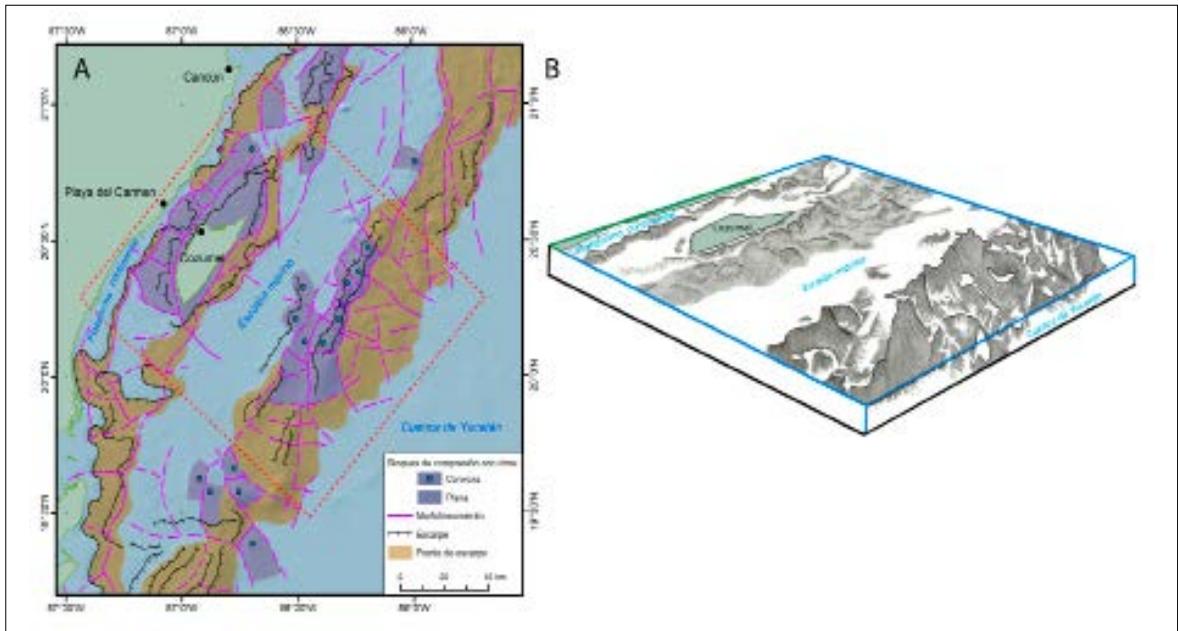


Figura 5. A. Morfología escalonada del extremo oriental del Arco de Yucatán Cuba. B. Relieve estructural cubierto por sedimentos marinos. Fuente: elaboración propia.

Como ya se mencionó, las variaciones en el nivel del mar han sido determinantes a lo largo del emplazamiento del Arrecife Mesoamericano. Durante el Cretácico superior el mar alcanzó hasta 250 m por encima del nivel actual. En el Paleógeno la altura relativa se ubicaba en los 200 m, y durante el Mioceno se establecen las condiciones glaciares que continuaron durante el Cuaternario con un descenso paulatino del nivel del mar (Schnack *et al.*, 2002). Hacia finales de la última glaciación, hace 18 mil años, el mar de la región del Caribe descendió entre 100 y 120 m (Lambeck y Chappell, 2001). Durante el periodo de 18 a 7 mil años se produjo la mayor fusión de hielo, lo que provocó un aumento de 6 m sobre el nivel actual del mar (Jelgersma y Tooley, 1995).

La movilidad de bloques de compresión desde el Paleógeno hasta el Cuaternario permitió la formación de falsos atolones, bancos someros y plataformas calcáreas (Jordán E., 1988; Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003), todos ellos son testimonio de las variaciones del nivel del mar y tienen reflejo en el análisis y la cartografía geomorfológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada para la elaboración de la cartografía geomorfológica de la isla de Cozumel se basó en un enfoque que combinó datos altimétricos, imágenes satelitales y verificación *in situ*. Este proceso se llevó a cabo en varias etapas, desde la adquisición de datos hasta la validación en campo, con el objetivo de obtener una representación precisa y detallada del relieve de la isla.

### Adquisición de datos LiDAR

El punto de partida fue la descarga del modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR, con un tamaño de píxel de 5 m, obtenido del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía en formato GRID (NEGI, 2012). Esta información se obtuvo a escala 1:10 000, por lo que se descargaron 29 archivos que completan la zona de estudio.

### Modelado digital del terreno

Posteriormente, con las 29 secciones que conforman el área de interés, se generó un mosaico para contar con un modelo digital de terreno (MDT) completo. Este proceso se realizó en un sistema de información geográfica, un software denominado ArcMap versión 10.8 (ESRI, 2023) y, a partir de este MDT, se obtuvo un modelo sombreado (*hillshade*) y un mapa altimétrico para resaltar las variaciones en la elevación y definir formas de relieve.

### Uso de imágenes satelitales

De forma complementaria, junto con los datos altimétricos, se emplearon imágenes satelitales del año 2021 consultadas directamente en la plataforma de Google Earth Pro, información que se utilizó posteriormente en el análisis geomorfológico.

### Interpretación geomorfológica

Una vez que se recolectó la información disponible, se llevó a cabo la interpretación de las formas del relieve que se identificaron a través de la combinación del uso de las nuevas tecnologías, como lo es la percepción remota y los sistemas de información geográfica, y con métodos tradicionales, como la interpretación visual para el trazado de las geofor-mas en un mapa preliminar.

En conjunto con los datos LiDAR, las imágenes proporcionaron una perspectiva adicional y permitieron identificar formas de relieve que, debido a su desarrollo subhorizontal, podrían no ser claramente definidas en los modelos altimétricos o sombreados.

### Trabajo de campo

Se llevaron a cabo un par de campañas en los años 2020 y 2021 para validar y complementar la información obtenida a través de la interpretación de los modelos y las imágenes satelitales. Durante estos recorridos, se verificaron directamente las características geomorfológicas identificadas en la cartografía preliminar, y en su caso, se realizaron las correcciones necesarias de los límites morfológicos que no hubiesen sido claros con los materiales empleados (Figura 6).

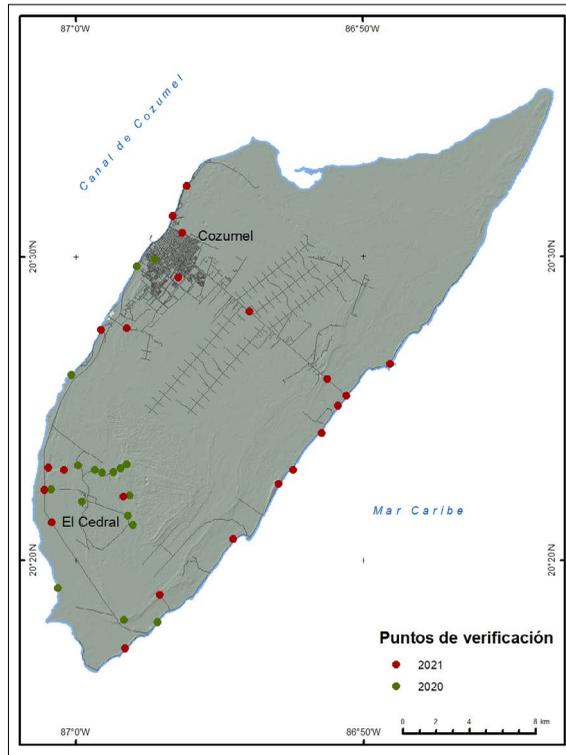


Figura 6. Sitios de verificación en campo. Fuente: elaboración propia.

### Cartografía geomorfológica

Para elaborar la cartografía digital final, se integró toda la información disponible, el modelo digital del terreno y sombreado, el mapa altimétrico y el resultado de la interpretación visual de las imágenes satelitales, junto con los resultados de la validación en campo dentro de un sistema de información geográfica. Una vez más, se empleó ArcMap 10.8 para el proceso de digitalización de la capa vectorial de las formas de relieve, junto con sus atributos, que se reflejan en la leyenda del mapa geomorfológico final.

## RESULTADOS

### Geomorfología de la isla de Cozumel

Los resultados del análisis geomorfológico se presentan a través de la cartografía especializada, que es el inventario en donde, las unidades, que

por lo regular se ordenan a partir de un criterio morfogenético, en este caso particular, se determinó que la superficie representada tiene una sola génesis, la exógena. De esta manera, el mapa muestra la espacialidad de las formas y los procesos que han definido la expresión actual del relieve (Figura 7).

### Cresta arrecifal central

La cresta arrecifal se localiza SSW de la isla de Cozumel, su altitud varía entre los 11 y 17 msnm y su superficie es de 4.4 km<sup>2</sup>. La depresión central está bordeada por pequeños lomeríos calcáreos con mayor presencia hacia el centro de la estructura. El relieve kárstico (cenotes, dolinas y úvalas), tiene un mayor desarrollo en este sector con una densidad de 60 a 100 unidades por km<sup>2</sup> (Trejo Pelayo, 2020). Esta forma de relieve representa la estructura primigenia en la evolución arrecifal de Cozumel. Se infiere que su basamento fue un bloque de compresión a una profundidad somera durante el Pleistoceno, época en la cual las condiciones de luz y temperatura favorecieron el desarrollo de los corales. Esto, definió una morfología triangular que contenía un cuerpo lagunar interior similar al que se encuentra en el atolón Haraiki, en la Polinesia Francesa en la actualidad (Woodroffe y Biribo, 2011) (Figura 8A). Al inicio del Holoceno el nivel del mar se encontraba 15 metros por debajo del actual (Muckelbauer, 1990; Thompson y Goldstein, 2006), lo que favoreció la erosión y la destrucción parcial de la pared SW de la antigua estructura, permaneciendo únicamente dos flancos de la anterior estructura triangular, característica que se hace evidente en el mapa geomorfológico (Figura 7).

### Plataformas

#### *Plataforma calcárea paleolagunar*

Esta plataforma se ubica en la porción SSW de la isla, y rodea a la cresta arrecifal central. Cuenta con una superficie de 14 km<sup>2</sup> y presenta un desnivel altitudinal que varía de los 7 a 11 msnm. La morfología cóncava que la caracteriza permitió el desarrollo de una paleolaguna en su sector central.

Esta estructura también se conoce como *back reef*, y se trata de una angosta plataforma ligera-

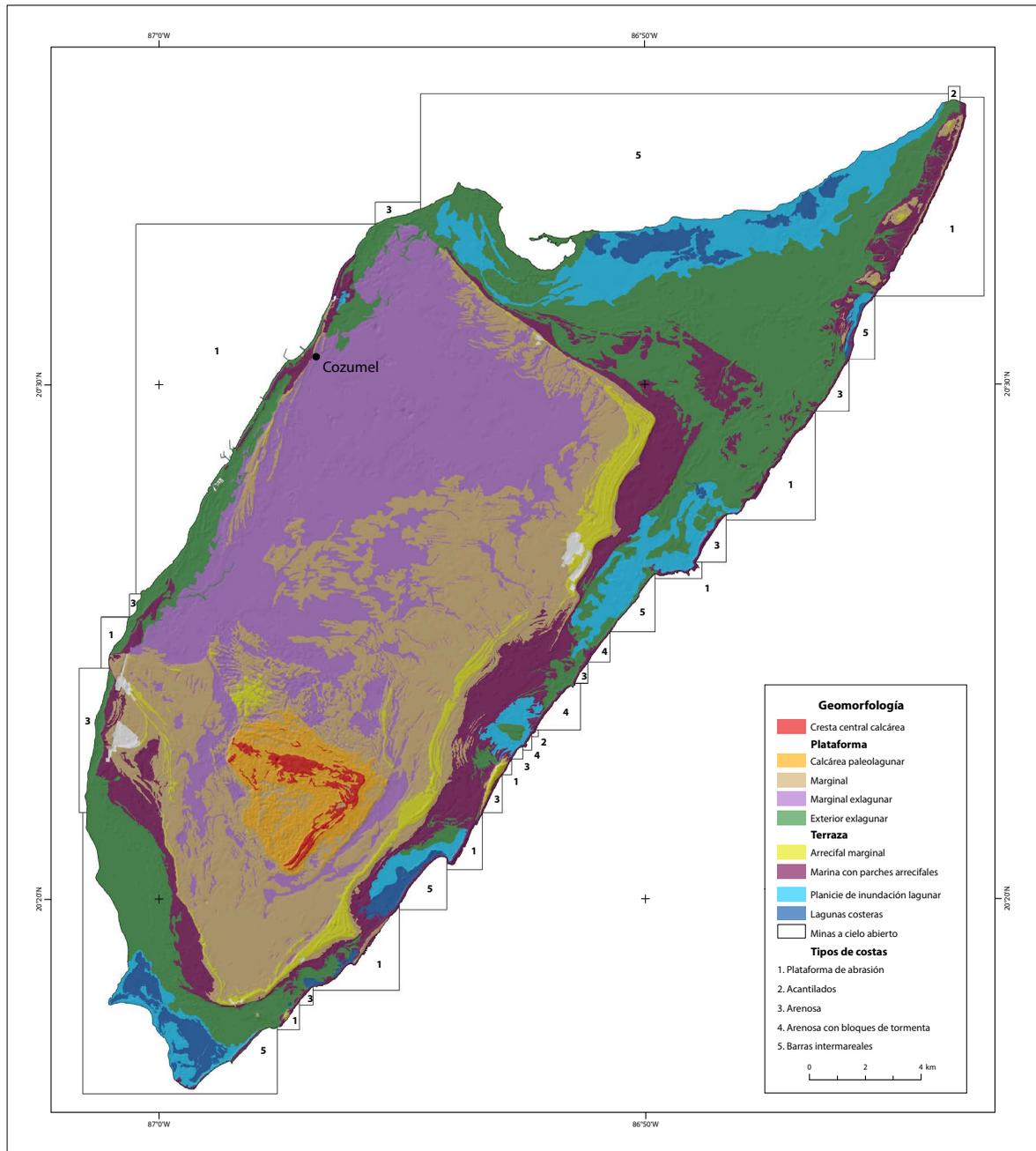


Figura 7. Mapa geomorfológico de la isla de Cozumel. Fuente: elaboración propia.

mente inclinada, con una variación en la pendiente entre los 2° y los 6°, está constituida por sedimentos calcáreos muy consolidados (Mathew *et al.*, 2010), cuenta con una densidad de unidades kársticas

similar a forma de relieve anterior. Durante el Holoceno, mientras se encontraba por debajo del nivel del mar, esta región lagunar protegió de los efectos de abrasión marina a la cresta arrecifal central.

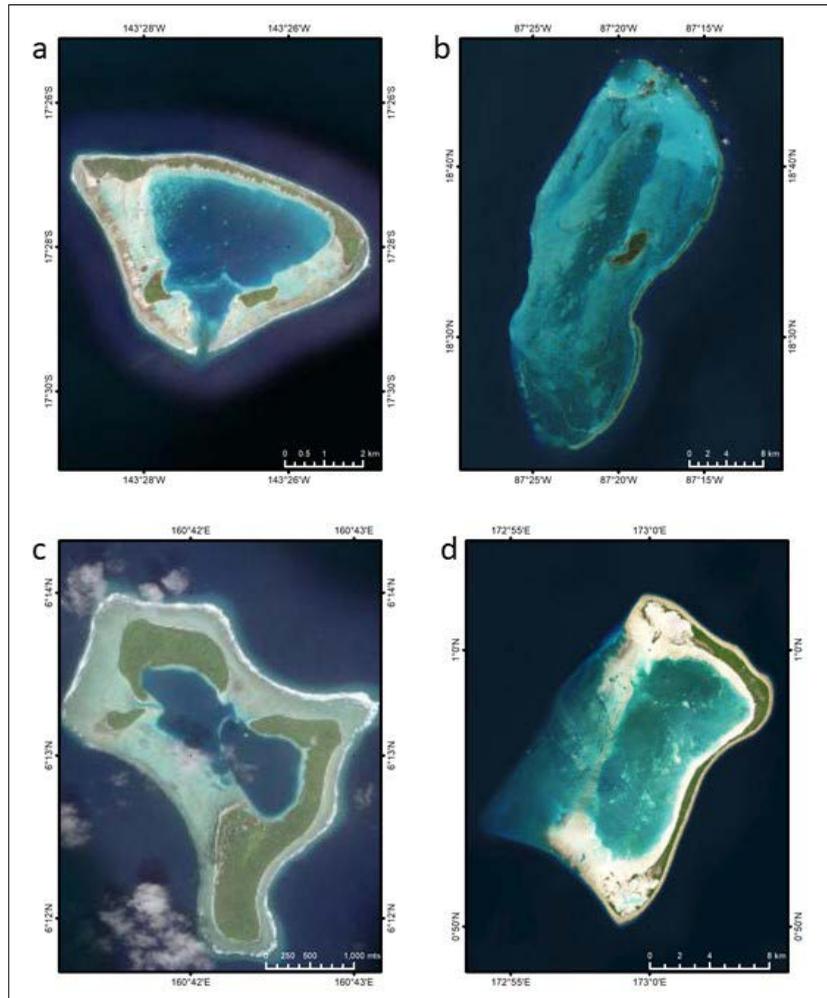


Figura 8. Atolones utilizados para comparar sus formas de relieve con las de la isla de Cozumel. A. Haraiki, Polinesia francesa. B. Chinchorro, México. C. Pingelap, Micronesia. D. Maiana, Islas Gilbert. Fuente: Esri (2023).

### *Plataforma marginal*

La mayor parte de plataforma marginal se localiza hacia el SSW de la isla, sin embargo, también se extiende hacia el NE, y ocupa una superficie de 118.9 km<sup>2</sup> alcanzando apenas una altitud que oscila entre los 6 y 7 msnm, a diferencia de la plataforma calcárea paleolagunar que alcanzó los 11 msnm.

El origen de esta forma de relieve se asocia con las diversas oscilaciones del nivel del mar, mismas que permitieron la depositación de sedimentos marinos hace aproximadamente 82 mil años (Salgado, *et al.*, 2022). Dichos depósitos se encuentran contiguos a la terraza arrecifal, por lo que se formó una superficie de transición entre esta y la laguna, lo que permitió el desarrollo de barras y canales

intermareales. La morfología de esta unidad tiene similitud con la que actualmente se observa en el banco Chinchorro, frente a la costa de Mahahual, Quintana Roo (Figura 8B).

### *Plataforma marginal exlagunar*

Superficie cubierta por depósitos marinos del Pleistoceno Superior con una morfología subhorizontal de origen lagunar, que ocupa el centro de la isla de Cozumel, con una extensión de 121.8 km<sup>2</sup>, y una altitud que va entre los 3 y 5 msnm. Se encuentra delimitada en todos sus flancos por la plataforma marginal, excepto su borde occidental, que en la etapa más temprana representaba el sector expuesto al contacto directo con el mar. Esta característica

permitió la formación de parches arrecifales y canales intermareales como los que se observan en el atolón Pingelap, en Micronesia (Woodroffe y Biribo, 2011) (Figura 8C).

#### *Plataforma exterior exlagunar*

Se trata de una superficie compleja de morfología subhorizontal con desniveles que no superan los 2 m de altura, característica que le da una expresión en gradería con escalones amplios y algunos de ellos representan antiguas líneas de costa. Su posición altitudinal entre 1 y 3 msnm favorece las inundaciones temporales que se vinculan con las lluvias ciclónicas o frentes fríos. Su origen está asociado con el retroceso del nivel del mar y movimientos neotectónicos de ascenso, lo que dio como resultado que esta superficie quedara libre de cuerpos lagunares. Esta idea se sustenta a partir de la disposición de las fronteras actuales, que hacia el interior de la isla corresponden a las terrazas marinas, mientras que el sector distal lo cubren las lagunas costeras sus planicies y la línea de costa.

Esta forma de relieve se presenta en la mayor parte de la isla de Cozumel, la superficie más amplia se localiza al NE, y disminuye al SW. Al NW es una superficie alargada y es discontinua al oriente, en conjunto suman un área de 106.8 km<sup>2</sup>. Su morfología anterior a la actual pudo ser similar a la que existe en el banco Chinchorro.

### **Terrazas**

#### *Terraza arrecifal marginal*

Durante el Pleistoceno Superior representó las áreas más altas del arrecife de margen. Al encontrarse expuesto a las oscilaciones de la marea permitió que los depósitos marinos la cubrieran, generando una secuencia de barras acrecionales que funcionaron como protección para la cresta central y la plataforma calcárea ante el oleaje y las corrientes marinas. Este hecho dio pauta a la formación de una laguna, así como también a una plataforma marginal, similares a las del atolón Maiana en las Islas Gilbert (Woodroffe y Biribo, 2011) (Figura 8D). Parte de los sedimentos marinos depositados sobre la terraza, fueron movilizados por la acción del viento, generando paleodunas calcáreas que avanzaron tierra adentro o hacia la laguna (Bird, 2008).

La altitud de la terraza arrecifal varía entre los 7 y 11 msnm y su superficie es de 12.7 km<sup>2</sup>. Su rumbo general es SSW-NNE y representa el eje mayor de Cozumel, sin embargo, en la porción N de la isla tiene un cambio drástico de SSE-NNW. Cabe señalar que la terraza no es continua debido a que se encuentra seccionada principalmente por canales de marea.

#### *Terraza marina con parches arrecifales*

Desde su origen esta estructura estuvo en contacto con el oleaje, por lo tanto, también se conoce como terraza exterior. Su morfología inclinada y discontinua hace evidente la alternancia de procesos de abrasión y acumulación marina, asociados a la actividad tectónica de la región y los cambios glacioeustáticos a finales del Pleistoceno (Salgado-Garrido et al., 2022). Se localiza alrededor de la isla, entre la terraza arrecifal marginal y la plataforma exterior exlagunar principalmente, aunque hay una porción importante en la región NE más distal. Su altitud varía entre 3 y 7 msnm y su superficie es de 50.8 km<sup>2</sup>

### **Planicie de inundación lagunar**

Esta superficie desarrollada durante el Pleistoceno Superiores considerada como un bajo intermareal en donde la presencia de inundaciones es la dinámica constante. También se conoce como zona intermareal de fango debido a su posición entre los niveles conocidos de máxima y mínima marea. Su morfología es muy cercana a la horizontal, es una zona en donde la influencia del mar está presente a partir de penetraciones marinas por oleadas de tormenta y lluvias extraordinarias, fenómenos que favorecen la existencia de cuerpos de agua estacionales. Se localiza en los flancos N, E y S de la isla, asociada a la plataforma exterior exlagunar y a las lagunas costeras, y cubre una superficie de 34.51 km<sup>2</sup>.

### **Lagunas costeras**

Son cuerpos de agua someros y salobres separados del mar por barreras, bancos de arena e islas barrera que están relacionadas con la planicie de inundación. La mayoría de ellas tienen conexión con el mar a través de esteros que funcionan con las

oscilaciones mareales y con lluvias, que se pueden intensificar durante eventos extraordinarios como los ciclones. Esta dinámica tiene un efecto en los límites entre la laguna y su planicie de inundación debido a que se modifican a lo largo del día o de manera estacional. Las superficies lagunares más importantes se localizan al NE de la isla de Cozumel, aunque también están presentes en el borde litoral oriental y al SW. El área en conjunto de esta forma de relieve suma los 11.6 km<sup>2</sup>.

### Minas a cielo abierto

Esta forma de relieve de origen antrópico se encuentra sobre la terraza arrecifal y la plataforma marginal en el sector oriental de la isla y en el extremo SW respectivamente, ya que por su litología resultan idóneos para la extracción de material para la construcción (Figura 9). Debido a ello se disponen de forma escalonada con respecto al nivel del terreno circundante sin transformación, el resultado de este proceso da lugar a un paisaje caótico, degradado y, en muchos casos, de difícil recuperación (Gutiérrez, 2007), una vez que han

extraído el recurso, resultan terrenos con altitudes negativas que incluso llegan a estar por debajo del nivel del mar. De acuerdo con el análisis de la imagen satelital empleada, al año 2021 la superficie transformada correspondía a 2.04 km<sup>2</sup>.

### Tipos de costa

#### *Plataforma de abrasión (Beach rock)*

Se trata de antiguas plataformas cubiertas por secuencias arenosas, la acumulación sobreyacente rica en carbonatos de calcio comenzó a filtrarse y solidificar los depósitos infrayacentes. Este proceso generó una morfología accidentada de microcrestas consolidadas, las cuales afloran en superficie como consecuencia de la dinámica erosiva marina o movimientos neotectónicos (Figura 10).

Tienen una morfología subhorizontal, mantiene una inclinación que no supera los 2° en dirección al mar y llega a presentar cubiertas arenosas no consolidadas más recientes, que existen por lapsos de tiempo muy cortos debido a las oscilaciones mareales. La plataforma de abrasión está presente en la mayor parte del litoral de Cozumel, siendo



Figura 9. Mina a cielo abierto ubicada de forma perpendicular a la terraza arrecifal. Fuente: imagen tomada por el primer autor.



Figura 10. Plataforma de abrasión con presencia de sedimentos no consolidados. Fuente: imagen tomada por el primer autor.

el sector occidental el más representativo por su continuidad.

#### *Acantilados*

Se trata de frentes rocosos que tienen contacto con el mar (*acantilados vivos*), en ellos predomina la destrucción mecánica por el efecto del oleaje y los detritos que transporta. La morfología que resulta está en función de los distintos grados de resistencia de la escarpada, de esta manera se reconocen escarpes francos y cavitaciones en el contacto del impacto del oleaje, lo que provoca el colapso de grandes bloques, el ejemplo más representativo se localiza en el sector centro oriental de la isla (Figura 11).

#### *Arenosa*

Se trata de superficies acumulativas amplias de hasta 30 m de longitud, en donde los procesos de sedimentación marina son persistentes (Figura 12). Su ubicación es heterogénea a lo largo de toda la costa de Cozumel. En el sector oriental estas estructuras generan dunas, bancos y mantos eólicos que avanzan tierra adentro.

#### *Arenosa con bloques de tormenta*

Este tipo de costa se localiza en la porción centro oriental de la isla, vertiente expuesta al oleaje de tormenta. En este sector, la playa es amplia y el oleaje se ve reducido por una barrera frontal de bloques que se depositaron por el arrastre y rodamiento de las olas. La fuente de este material es la plataforma coralina sumergida, que al ser rugosa o tener prominencias hacia el mar abierto, facilita su desprendimiento y movimiento en dirección a la playa, formando así un dique natural (Figura 13).

#### *Barras intermareales*

Se trata de acumulaciones alargadas de arena, en donde alternan geometrías convexas y rectas, se considera un relieve de transición entre el mar y tierra firme y se asocian a lagunas y esteros (Figura 14). Su origen se vincula al acarreo de detritos por corrientes marinas locales, lo que hace evidente los territorios donde el efecto de marea es menor, no obstante, estas zonas no están exentas de penetraciones marinas extraordinarias como las mareas y el oleaje de tormenta, a las que se adjudica el desarrollo de canales perpendiculares al litoral. Este



Figura 11. Acantilados vivos con presencia de bloques producto de la cavitación provocada por el oleaje. Fuente: imagen tomada por el primer autor.



Figura 12. Costa amplia de tipo arenosa. Fuente: imagen tomada por el primer autor.



Figura 13. Bloques de tormenta. Fuente: imagen tomada por el primer autor.



Figura 14. Barras intermareales. Fuente: imagen tomada por el primer autor.

tipo de costa se encuentra ubicada en gran medida en los sectores NE y SW de la isla.

## DISCUSIÓN

Uno de los aspectos clave para este estudio, fue la comprensión de la importancia de la tectónica regional en la configuración actual de la isla. La interacción entre las placas del Caribe, Norteamérica y Sudamérica durante el Mesozoico ha influido significativamente en la evolución geológica de la región, especialmente durante el Cretácico Superior y el Paleoceno.

El análisis batimétrico reveló la complejidad de los procesos tectónicos de *rifting*, incluidos basculamientos, rotaciones, desgarres y movimientos transpresivos y transtensivos que dieron origen a bloques de compresión. Estos bloques han experimentado movimientos ascendentes a lo largo del tiempo, influenciados tanto por la actividad tectónica, que dio como resultado escarpes profundos, así como por las variaciones del nivel del mar que favorecieron el depósito de sedimentos que simplificaron la morfología del fondo marino. Estos factores han sido fundamentales en la formación posterior de falsos atolones, bancos someros y plataformas calcáreas desde el Paleógeno hasta el Cuaternario.

A partir del Pleistoceno Superior inicia la deposición de los sedimentos que genera las condiciones idóneas para el desarrollo de los arrecifes. Estos darían lugar a la creación de las crestas y terrazas arrecifales, las cuales representan las estructuras primigenias de la isla, posteriormente, la erosión y depositación de sedimentos darían paso a la formación del resto del relieve.

El principal aporte de este estudio reside en la elaboración de una cartografía geomorfológica detallada de la isla de Cozumel a escala 1:10 000. Si bien trabajos previos han abordado la geomorfología de la isla, existen diferencias significativas con esta investigación. Mientras que Colín et al., (2013) se enfoca en la clasificación de las playas encaminado al aprovechamiento turístico, y Trejo Pelayo (2020) en una regionalización geomorfológica de la isla, ambos trabajos realizaron clasificaciones mixtas, que combinan factores de relieve y de la

cobertura del suelo, así como factores bióticos, mientras que la metodología de este trabajo se centra en el relieve a través de la diferenciación de unidades geomorfológicas. Cabe resaltar, que la metodología empleada, permitió caracterizar con mayor precisión las diferentes unidades del relieve, e identificar la evolución que ha tenido la isla a lo largo del tiempo geológico. Los resultados obtenidos concuerdan con los hallazgos de Salgado-Garrido et al. (2022) sobre la evolución de la isla, que se ve reflejada en cartografía, demostrando la eficacia de la metodología empleada en este tipo de ambientes.

La cartografía geomorfológica desarrollada en esta investigación proporciona una herramienta valiosa para entender la espacialidad del relieve y los procesos que han contribuido a su formación. La clasificación de las unidades geomorfológicas, como las crestas arrecifales, plataformas y terrazas, permite una visión más clara de la evolución de la isla a lo largo del tiempo geológico y de las dinámicas que continúan hasta la actualidad. Así mismo, permite la identificación de diversos tipos de costas, en las que se identifican zonas erosivas como en los acantilados y plataformas de abrasión, procesos acumulativos en las playas arenosas y mixtos presentes en las superficies arenosas con bloques de tormenta. Ejemplo de la utilidad de estos estudios es el trabajo de May-Arias et al. (2024) que se concentra en la detección de depresiones kársticas a través de métodos morfométricos y geomorfológicos y su utilidad para una buena planeación urbana, este tipo de trabajos pueden desarrollarse en el futuro inmediato en la isla de Cozumel.

## CONCLUSIONES

La isla de Cozumel, con su paisaje kárstico único y su compleja historia geológica, representa un caso de estudio relevante desde el punto de vista geomorfológico. La interacción de factores como la tectónica regional, las variaciones del nivel del mar y la litología, además de factores climáticos, ha dado lugar a un relieve diverso y complejo que incluye crestas arrecifales, diferentes tipos de plataformas y terrazas, así como también planicies y lagunas costeras, además de relieve antrópico como las minas a cielo abierto.

La metodología utilizada para la elaboración de la cartografía geomorfológica, que combinó datos LiDAR, imágenes satelitales y verificación *in situ*, ha demostrado ser eficaz para obtener una representación precisa y minuciosa del relieve de la isla. La validación en campo posibilitó la corrección de la interpretación de las formas identificadas a través de las nuevas tecnologías, que en conjunto con el uso de métodos tradicionales ha permitido obtener una representación detallada del relieve de Cozumel.

Cabe resaltar, que considerando las peculiaridades morfológicas del Banco Chinchorro y los resultados de esta investigación, se puede concluir que hay similitudes entre este atolón y Cozumel. A pesar de que actualmente no hay una laguna dentro del área de estudio, la evidencia geomorfológica no solo indica su existencia pasada, sino también su semejanza con la laguna actual en Chinchorro.

Los resultados de esta investigación no solo contribuyen al conocimiento científico de la geomorfología de Cozumel, sino que también tienen implicaciones prácticas. La información cartográfica completa y de alta resolución elaborada, puede ser de utilidad en la planificación del uso del territorio, la gestión ambiental y la conservación de los recursos naturales de la isla. La comprensión detallada de la evolución del relieve es fundamental para tomar decisiones informadas sobre el manejo sostenible de este territorio insular. En este sentido, se recomienda llevar a cabo un levantamiento LiDAR con mayor resolución en la región de la cresta arrecifal central, para mejorar la precisión en la identificación de depresiones kársticas que actúan como reservorios de agua.

## AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a la Mtra. Ana Rosa Rosales Tapia por el tiempo y dedicación a la lectura de nuestro manuscrito.

## REFERENCIAS

- Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Chávez, E. y Hidalgo, E. (1988). Los arrecifes coralinos del Caribe noroccidental y Golfo de México en el contexto socioeconómico. *Anales Del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología*. UNAM, 167-176.
- COESPO. (2019). *Proyección de población al 2019*. COESPO.
- Colín, O., Frausto, O., Jiménez, J. y García, B. (2013). Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para la gestión sustentable de playas y costas en Cozumel, México. *Congreso Internacional de Investigación* (pp. 648-653).
- DeMets, C., Gordon, R. G. y Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), 1-80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
- ESRI. (2020). *ArcMap* (10.8).
- Freeland, G. y Dietz, R. (1971). Plate tectonic evolution of Caribbean-Gulf of Mexico region. *Nature*, 232, 20-23.
- Frontana-Uribe, S. y Solis-Weiss, V. (2011). First Records of Polychaetous Annelids from Cenote Aerolito (Sinkhole and Anchialine Cave) in Cozumel Island. *Journal of Cave and Karst Studies*, 73(1), 1-10. <https://doi.org/10.4311/jcks2009lsc0107>
- GEBCO. (2020). *Gridded Bathymetry Chart of the Oceans*.
- Gutiérrez, M. (2007). El papel del hombre en la creación y destrucción del relieve. *Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 101, 211-226.
- Instituto Nacional de Estadística, G. e I. (2012). *Modelo digital de elevación de alta resolución Lidar. Tipo terreno*.
- Jelgersma, S. y Tooley, M. (1995). Sea-level changes during the recent geological past. *Journal of Coastal Research*, 17, 123-139.
- Jordán E. (1988). Arrecifes profundos en la Isla de Cozumel, México. *Anal. Inst. Cienc. Mar Limnol.*, 15, 195-208.
- Jordán-Dahlgren, E. y Rodríguez-Martínez, R. E. (2003). The Atlantic coral reefs of Mexico. In *Latin American Coral Reefs* (pp. 131-158). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451388-5/50007-2>
- Kemp, A. C., Horton, B. P., Donnelly, J. P., Mann, M. E., Vermeer, M. y Rahmstorf, S. (2011). Climate related sea-level variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(27), 11017-11022. <https://doi.org/10.1073/pnas.1015619108>
- Lambeck, K. y Chappell, J. (2001). Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science*, 292(5517), 679-686. <https://doi.org/10.1126/science.1059549>
- Mann, M. E., Bradley, R. S. y Hughes, M. K. (1999). Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limita-

- tions. *Geophysical Research Letters*, 26(6), 759–762. <https://doi.org/10.1029/1999GL900070>
- Mathew, S., Davidson-Arnott, R. G. D. y Ollerhead, J. (2010). Evolution of a beach–dune system following a catastrophic storm overwash event: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, 1936–2005. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47(3), 273–290. <https://doi.org/10.1139/E09-078>
- May-Arias, E. M., Frausto-Martínez, O., Rodríguez-Castillo, J. F. y Arroyo-Arcos, L. (2024). Negative exokarstic units as a basis for urban management: Yucatan Peninsula, Mexico. *Discover Geoscience*, 2(1), 47. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00054-w>
- Mejía, L., Yáñez, G. y López, M. (2006). Fauna of five anchialine caves in Cozumel Island, México. *National Association for Cave Diving Journal*, 39, 11–15.
- Mejía, M., Yáñez, G. y Zarza, E. (2007). Cenotes (Anchialine Caves) on Cozumel Island, Quintana Roo, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69, 250–255.
- Moore, G. y Del Castillo, L. (1974). Tectonic evolution of the southern Gulf of Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 607–618.
- Muckelbauer, G. (1990). The shelf of Cozumel, Mexico: Topography and organisms. *Facies*, 23(1), 201–239. <https://doi.org/10.1007/BF02536714>
- Orellana, R., Nava, F. y Espadas, C. (2008). El clima de Cozumel y la Riviera Maya. En I. Mejía-Ortíz (Ed.), *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 23–32). Universidad Autónoma de Quintana Roo, Plaza y Valdés.
- Orlova, A. (1976). *Estructuras bloque y relieve*. Ed. Nedra.
- Orlova, A. (1981). *El mosaico móvil del planeta*. Ed. Nedra.
- Pindell, J. y Barret, S. (1990). The Caribbean Region, The Geology of North America. *Geological Evolution of the Caribbean Region*, 339–374.
- Rodríguez, F., Frausto, O. y Colín, O. (2021). Morfometría de depresiones kársticas a escala detallada: el Cedral, Cozumel - México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*.
- Salgado-Garrido, H. E., Valera-Fernández, D., Trejo-Pelayo, S., Solleiro-Rebolledo, E., Barragán, R., Yáñez-Mendoza, G., Mejía-Ortíz, L. M. y López-Martínez, R. (2022). The microfacies distribution pattern of Cozumel Island in southeastern Mexico: An atoll-like model led by quaternary glacioeustatic sea-level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, 118, 103933. <https://doi.org/10.1016/j.james.2022.103933>
- Schnack, E., Pousa, J. e Isla, F. (2002). Las fluctuaciones del nivel del mar durante el Cuaternario. *Museo*, 79–87.
- Spaw, R. (1977). *Late Pleistocene stratigraphy and geologic development of Cozumel Island, Quintana Roo, Mexico*. Rice University.
- Thompson, W. G. y Goldstein, S. L. (2006). A radiometric calibration of the SPECMAP timescale. *Quaternary Science Reviews*, 25(23–24), 3207–3215. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.02.007>
- Trejo Pelayo, S. (2020). *Geomorfología de la isla de Cozumel y su relación con los cambios del nivel del mar a partir del pleistoceno tardío*. Quintana Roo, México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Valera-Fernández, D., Solleiro-Rebolledo, E., López-Martínez, R. A., Pi-Puig, T., Salgado-Garrido, H. y Cabadas-Báez, H. (2020). Quaternary carbonates on the coast of the Yucatan Peninsula and the island of Cozumel, Mexico: Paleoenvironmental implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 102, 102670. <https://doi.org/10.1016/j.james.2020.102670>
- Ward, W. (1997). Geology of coastal islands, northeastern Yucatan Peninsula. En H. L. Vacher y T. M. Quinn (Eds.), *Geology and hydrogeology of carbonate islands* (vol. 54, pp. 275–298). Elsevier.
- Woodroffe, C. D. y Biribo, N. (2011). Atolls. En D. Hopley (Ed.), *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: structure, form and process* (pp. 51–71). Springer.