








Técnicas para el rescate y la colecta de distintos grupos de invertebrados marinos fósiles de México

Techniques for the rescue and collection of different fossil marine invertebrate groups from Mexico

Torres-Martínez, Miguel Angel^{1,*}; Campos-Méndez, Mirhan²;
Heredia-Jiménez, Daniela Paulina³; Juárez-Aguilar, Edwin Aldrin⁴;
Rosas-García, Hugo²; Alanis-Pavón, Alberto⁴; Ruiz-Naranjo, Metzeri⁵

¹Departamento de Paleontología, Instituto de Geología, Av. Universidad 3000, Circuito de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

²Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

³Doctorado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

⁴Doctorado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

⁵Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

* miguelatm@geologia.unam.mx

Resumen

El estudio de los invertebrados marinos fósiles de México ha colaborado ampliamente al conocimiento de la historia geológica del país, al ser algunos de ellos importantes indicadores paleoambientales, paleogeográficos y geocronológicos (fósiles índice) para diferentes periodos geológicos. En este sentido, México cuenta con un registro fósil de invertebrados marinos muy diverso; sin embargo, persiste cierta escasez de conocimiento sobre las correctas prácticas y procedimientos para su extracción y colecta, lo cual ha contribuido a la destrucción total o parcial del material fósil y, por consiguiente, a la pérdida de información potencial que este material brinda. Al ser parte del patrimonio geológico del país, se debe procurar la protección, conservación y gestión de este registro fósil, por lo que compartir el conocimiento sobre su correcto manejo contribuirá a conservar de mejor manera este material y a evitar su extracción desmedida. En este trabajo se describen, por experiencias de trabajo de campo, los procedimientos a seguir para la extracción, colecta, etiquetado, almacenaje y transporte de diferentes grupos de invertebrados marinos fósiles de México, incluyendo moluscos (p.e. bivalvos, rudistas, gasterópodos, ammonoideos, nautiloideos), braquiópodos, artrópodos (p.e. decápodos, ostrácodos) y equinodermos (p.e. crinoideos, equinoideos). Estos procedimientos pueden variar en función de factores como el grupo fósil, su grado y tipo de preservación, la roca portadora y la estructura anatómica preservada, entre otros. De acuerdo al grupo fósil que se estudie será la información que se pueda obtener, de tal manera que los bivalvos, rudistas, gasterópodos, ammonoideos, braquiópodos y equinoideos son considerados importantes fósiles índice en intervalos de tiempo particulares. Por otro lado, los organismos bentónicos como bivalvos, gasterópodos, rudistas, braquiópodos, crustáceos, crinoideos y equinoideos resultan adecuados para obtener información relacionada con los paleoambientes de depósito y su paleoecología. Finalmente, en cuanto a la información paleobiogeográfica, cada grupo tendrá una relevancia particular, pues tienen diferentes alcances a nivel local, regional o global.

Palabras clave: colecta, invertebrados, México, registro fósil, rescate.

Cómo citar / How to cite: Torres-Martínez, M. A., Campos-Méndez, M., Heredia-Jiménez, D. P., Juárez-Aguilar, E. A., Rosas-García, H., Alanis-Pavón, A., & Ruiz-Naranjo, M. (2024). Técnicas para el rescate y la colecta de distintos grupos de invertebrados marinos fósiles de México. *Paleontología Mexicana*, 13(2), 123-139.

Manuscript received: Marzo 6, 2024.

Manuscript corrected: Mayo 31, 2024.

Manuscript accepted: Junio 1, 2024.



Abstract

The study of fossil marine invertebrates from Mexico has widely collaborated to the knowledge of the country's geological history, since many of them are important paleoenvironmental, paleogeographic and geochronological proxies (index fossils) for different geological periods. Thus, Mexico has a very diverse fossil record of marine invertebrates. However, a certain lack of knowledge about the correct practices and procedures for extracting and collecting these samples remains. This has contributed to the total or partial destruction of fossil material and, consequently, to the loss of potential information that this material provides. Being part of the country's geological heritage, the protection, conservation, and management of this fossil record must be sought; so, sharing knowledge about its correct management will contribute to better conserving this material and avoiding its excessive extraction. Therefore, this work describes, based on fieldwork experiences, the procedures for the extraction, collection, labeling, storage, and transportation of different fossil marine invertebrate groups from Mexico, including mollusks (p.e. bivalves, rudists, gastropods, ammonoids, nautiloids), brachiopods, arthropods (p.e. decapods, ostracods) and echinoderms (p.e. crinoids, echinoids). These procedures may vary depending on factors such as the fossil group, the degree and type of preservation, the bearing rock, and the anatomical structure preserved, among others. The information that can be obtained will depend on the taxonomical group, for example bivalves, rudists, gastropods, ammonoids, brachiopods, and echinoids are considered important index fossils at particular time intervals. On the other hand, different benthic organisms such as bivalves, gastropods, rudists, brachiopods, crustaceans, crinoids, and echinoids are suitable for obtaining information related to depositional paleoenvironments and their paleoecology. Finally, regarding paleobiogeographic information, each group will have a particular relevance, displaying different scopes, whether local, regional, or global.

Keywords: fossil record, invertebrates, Mexico, recollection, rescue.

1. Introducción

El estudio de las unidades litoestratigráficas de México es de suma importancia, debido a que ha ampliado el conocimiento de la historia geológica de diferentes regiones del país. Una de las herramientas clave para el entendimiento de la estratigrafía del territorio mexicano ha sido el estudio de los invertebrados marinos, los cuales son considerados uno de los proxies más importantes, no solo porque algunos son fósiles índice y ayudan a establecer edades relativas fehacientes, sino también porque pueden brindar información relevante de los paleoambientes deposicionales y de la paleogeografía de diferentes periodos geológicos. Generalmente, estos fósiles se van a encontrar depositados junto a otros invertebrados similares, debido al tipo de asociaciones que formaban en vida, permitiendo estudiarlos con mayor precisión. No obstante, en algunas ocasiones, los invertebrados fósiles van a estar asociados a otros grupos taxonómicos diferentes, tales como vertebrados, plantas, microfósiles o icnofósiles; y aunque los invertebrados no sean el objetivo de la investigación, también terminan siendo colectados por la información que pueden aportar.

Sin embargo, antes de rescatar y colectar estos especímenes, hay que considerar diferentes puntos:

1) Grupo fósil depositado y utilidad: no todos los invertebrados son índice o de relevancia paleogeográfica, por lo que se debe plantear la relevancia de colectarlos si no es para resolver un cuestionamiento concreto; de lo contrario los fósiles serían extraídos de manera desmedida y sin un motivo aparente.

2) Preservación: establecer cómo se conservaron las muestras de acuerdo con los diferentes procesos de fosilización, ya sea permineralizados o como moldes autigenicos (moldes internos, externos o compuestos).

3) Roca portadora: dependiendo de esta, será el procedimiento a seguir para obtener las muestras con la mayor eficiencia.

4) Estructura preservada: esto hace referencia a no extraer todos los fósiles encontrados, ya que pueden ser solo fragmentos o especímenes mal preservados sin rasgos taxonómicos distintivos. Así se evitaría colectar material innecesario, incluyendo aquellas muestras que generalmente no dan mayor información.

5) Extracción y datos de colecta: contempla el procedimiento particular para extraer cada grupo de invertebrados fósiles. Además, todo material debe de incluir sus datos precisos de colecta, tales como la fecha, localidad, unidad litoestratigráfica, estrato, coordenadas geográficas, entre otros.

6) Transporte: incluye la forma de cómo embalar o embolsar las muestras para su transporte y estudio posterior, tomando en cuenta las características señaladas anteriormente.

Cuando se estudia una asociación de invertebrados, lo que se busca obtener son diferentes muestras de mano de los ejemplares para realizar comparaciones detalladas, dado que no todos van a conservar las características diagnósticas necesarias para identificarlos de manera precisa. Además, no es posible observar directamente en campo las variaciones anatómicas, convergencias morfológicas, rasgos novedosos o características internas de los organismos. Dichas particularidades únicamente se pueden determinar al utilizar las herramientas y procedimientos correctos, llevando a cabo, cuando es necesario, la elaboración de moldes de caucho-silicón, *peels*, secciones delgadas o cortes anatómicos precisos de las muestras, los cuales se podrán observar en algún microscopio, ya sea estereoscópico, petrográfico o electrónico de barrido. Asimismo, es necesaria la obtención de fotografías bajo la técnica de

blanqueado con cloruro de amonio, permitiendo resaltar los rasgos morfológicos más importantes de cada grupo. Con esto se podrán obtener imágenes detalladas de los especímenes, permitiendo revisarlos y compararlos adecuadamente.

No obstante, a pesar de que los invertebrados marinos presentan uno de los registros fósiles más diversos e importantes de todo México, aún prevalece cierto desconocimiento sobre cómo llevar a cabo la extracción y colecta de diferentes grupos taxonómicos. Esto termina contribuyendo a la fragmentación o destrucción parcial o total de los fósiles colectados, así como a la pérdida de la información de colecta, con lo cual estos materiales pierden toda su identidad y veracidad.

Cabe resaltar que el rescate, la colecta y el estudio de los fósiles de México, única y exclusivamente se debe llevar a cabo por personal capacitado de centros e instituciones académicas mexicanas, quienes podrán trabajar correctamente con estos especímenes. Hay que considerar que los bienes paleontológicos son un tipo de patrimonio geológico de México, debiendo procurarse su protección, conservación y gestión (Morales-Ortega *et al.*, 2021).

Dado el cierto grado de desconocimiento que prevalece sobre como rescatar, coleccionar y/o transportar el material de invertebrados marinos fósiles, aunado a la gran diversidad de este registro en diferentes unidades litoestratigráficas (Paleozoico–Cenozoico) a lo largo del territorio mexicano, es que se plantea el presente trabajo. Se prevé que compartir este conocimiento con gente del gremio, no solo permitirá conservar lo mejor posible a los especímenes potenciales, sino también evitará la extracción desmedida de estas muestras al momento de ser encontradas.

2. Rescate y colecta

Los invertebrados marinos representan un registro amplio e importante alrededor del mundo. No obstante, hay que considerar que, dependiendo del grupo, pueden ser calificados como excelentes fósiles índice, buenos indicadores paleoambientales o importantes proxies paleogeográficos; aunque existen algunos grupos que pueden incluir estos tres aspectos. En esta sección se describen algunos de los procedimientos a seguir, basados en experiencias de trabajo de campo, para la extracción, colecta y transporte de diferentes invertebrados marinos fósiles de México, como bivalvos (incluyendo rudistas), gasterópodos, ammonoideos, nautiloideos, braquiópodos, decápodos, ostrácodos, crinoideos y equinoideos. El enfoque en estos grupos es debido a que son de los que presentan un mejor registro fósil en México. Dado que los invertebrados comprenden alrededor de 33 phyla (sin considerar los de posición incierta), es imposible incluir todos los grupos taxonómicos en este artículo; además, el registro fósil de algunos phyla en México es muy escaso o nulo. Esto

abre la posibilidad de que se planteen otros trabajos similares al presente que incluyan grupos no tratados aquí.

2.1. Phylum Mollusca

2.1.1. Clases *Bivalvia* y *Gastropoda*

Dentro del phylum Mollusca, destaca el registro fósil de dos grupos en particular, los bivalvos y los gasterópodos. Los bivalvos son organismos que exhiben una simetría y compresión lateral, por lo general, presentando una elongación en dirección anteroposterior. Se distinguen por tener dos valvas calcificadas, típicamente convexas, que se conectan dorsalmente por músculos aductores, un ligamento y una charnela o bisagra. La concha presenta ornamentación diversa y se compone de diferentes variedades mineralógicas, cristalinas y estructurales (Cox, 1969). Aunque este grupo surgió a inicios del Paleozoico, su relevancia bioestratigráfica, paleoambiental y paleobiogeográfica se observa de manera más clara hasta el Mesozoico y, principalmente, el Cenozoico. Estos especímenes brindan valiosos datos cuando se preservan claramente la charnela y la ornamentación de las valvas, dado que, si solo se encuentran vaciados internos o fragmentos de la concha, no se puede obtener mayor información.

Por otro lado, los gasterópodos se caracterizan por tener una asimetría interna de sus órganos, y pueden o no presentar una concha (Martinell *et al.*, 2009). La concha puede ser enrollada o aplanada, presentar ornamentación, con una apertura que puede disponer de un opérculo y un ápice en dirección posterior (Camacho y del Río, 2008). Estos moluscos son ampliamente utilizados para estudios paleoecológicos, paleobiológicos y bioestratigráficos (Martinell *et al.*, 2009), sobre todo los especímenes del Mesozoico y Cenozoico. En este caso, los ejemplares que proporcionarán información significativa sobre las especies encontradas son los que se muestran más completos (para el número y forma de espiras), y que presenten una buena preservación de la apertura y ornamentación. Los vaciados internos y fragmentos no dan datos de gran relevancia.

El registro fósil de ambos grupos se compone principalmente de sus conchas, las cuales están compuestas principalmente de aragonita, una forma de carbonato de calcio termodinámicamente inestable. A diferencia de la aragonita, la calcita, una variante mineral con la misma composición química, se presenta como la forma más estable del carbonato de calcio. Por esta razón, durante el proceso de fosilización, las conchas tienden a experimentar un reemplazo mineral, siendo la aragonita sustituida por calcita, cuarzo, pirita, y otros minerales de fosfato de calcio (Campbell, 2006).

Si los bivalvos y gasterópodos están depositados en rocas siliciclásticas, se pueden preservar como conchas permineralizadas o moldes autigénicos (vaciados, moldes internos, moldes externos, etc.) (Figura 1). Cabe

resaltar que en las rocas con un tamaño de grano fino (lutitas, limolitas o areniscas de grano fino) se observa una mejor conservación de los moldes. Las conchas permineralizadas pueden conservar rasgos de la charnela y estructuras externas de la concha, aunque algunas veces se presentan como materiales fragmentarios. Estos se pueden extraer al golpear la roca con la pica de geólogo alrededor de los especímenes, hasta que sean prácticamente expulsados; al estar permineralizados resistirán mejor la fuerza mecánica. En el caso de los moldes autigénicos, están los internos, en los cuales es posible observar rasgos propios del interior, los moldes externos, que incluyen la ornamentación y forma externa de la concha (lo cual se puede observar detalladamente en moldes sintéticos de caucho-silicón), y los moldes compuestos, en los cuales se pueden observar tanto características internas como externas del fósil. Por lo general, las extracciones más exitosas de moldes

autigénicos se logran al obtener una pieza grande de roca, tomando una parte significativa de la matriz que rodea al espécimen. Hay que picar alrededor de la muestra, a una circunferencia de dos o tres veces el tamaño del fósil, ya que se corre el riesgo de que los ejemplares se fragmenten si la vibración llegase a alcanzar a los fósiles. Si hay diferentes especímenes en una roca se debe extraer toda la muestra completa, con lo cual serán separados posteriormente en el laboratorio. En caso de que los ejemplares se encuentren dentro de concreciones (Figura 1B), hay que volver a unir ambas partes con mucho cuidado, envolviéndolas con *masking tape*, con lo cual podrán ser abiertas y estudiadas posteriormente en laboratorio.

En el caso de rocas carbonatadas la preservación generalmente es mediante permineralización. Para obtener a los especímenes hay que golpear moderadamente a la roca para abrirla en dos partes, con lo cual quedará



Figura 1. A) Bivalvo permineralizado en calcarenita del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); B) Moldes de bivalvos en concreción del Pérmico de Guerrero; C) Gasterópodo permineralizado del Pérmico de Chiapas; D y E) Gasterópodos permineralizados en caliza masiva del Pérmico de Chiapas; F) Gasterópodo permineralizado del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); G) Gasterópodo permineralizado en caliza masiva del Pérmico de Chiapas; H) Gasterópodos permineralizados *in situ* en caliza masiva del Pérmico de Chiapas. Escala gráfica 1 cm.

expuesto el fósil. En calizas masivas la sustracción se vuelve más complicada (Figura 1H). En este caso, solo se puede extraer la parte del fósil que alcanza a sobresalir de la roca. Con un cincel y martillo se tiene que hacer una canaleta alrededor del fósil a obtener y golpear con fuerza moderada sobre esa canaleta, inclinando ligeramente el cincel en dirección al fósil. Al ir golpeando constantemente sobre el mismo rastro, llegará un momento en que el ejemplar saldrá expulsado de la roca portadora. Es importante destacar que el uso de ácido no se recomienda, ya que las conchas de los moluscos se disuelven junto con la matriz de la roca (Campbell, 2006). También es recomendable tomar muestras de la matriz original, en caso de que se quieran hacer estudios posteriores de paleoambientes deposicionales. Estas muestras se pueden obtener con un mazo, y deben ser guardadas en bolsas etiquetadas adecuadamente.

Una vez extraídos los ejemplares, habrá que guardarlos para su transporte. En el caso de especímenes pequeños, se aconseja envolverlos en papel o tela y almacenarlos en recipientes o pequeñas cajas de plástico con separaciones para limitar su movimiento. Las muestras grandes se envuelven en toallas de papel o papel periódico para evitar el roce directo entre los ejemplares. Todas estas se introducen en una bolsa (dejando las muestras más pesadas al fondo), la cual se cierra con cinchos o *masking tape*. Cada muestra debe contener los datos de colecta, ya sea escritos con plumón indeleble sobre la bolsa y/o por duplicado en el interior o exterior de la bolsa (si hay varias bolsas, por la fricción de una con otra, el marcaje externo en ocasiones puede borrarse total o parcialmente durante el transporte). En el caso de la caja de plástico, conviene el uso de fragmentos de papel que irán en cada división.

2.1.2. Clase *Bivalvia*, Subclase *Heterodonta*, Orden *Hippuritida*

Los rudistas son un grupo de bivalvos extintos del orden Hippuritida, que surgieron en el Jurásico Tardío y se extinguieron a finales del Cretácico. Este grupo habitó los mares someros de los márgenes del Tetis, adaptándose exitosamente gracias a las diversas formas de crecimiento de sus conchas (Skelton y Gili, 2002).

Estos bivalvos no son fácilmente reconocibles porque no presentan valvas simétricas, ni del mismo tamaño, salvo algunas excepciones. En la mayoría de estos, la valva inferior (generalmente fija al sustrato) es la de mayor tamaño; en cambio, la valva superior (libre) puede variar de tamaño desde cilíndrica, cónica, convexa, plana o reducida en forma de opérculo (Pons y Vicens, 2012). La concha está formada por dos capas, una externa de calcita baja en magnesio, la cual es más propensa a conservar su mineralogía original a pesar de las alteraciones diagenéticas, y una capa interna de aragonita, que muy frecuentemente es reemplazada por calcita secundaria (Skelton y Smith, 2000). Ambas valvas se unen en la charnela, la cual está conformada

por proyecciones denominadas dientes, que encajan en fosetas de la valva opuesta (Alencáster, 1971; Skelton, 1974); dos dientes en la valva inferior y uno en la superior. Estas estructuras, junto con las impresiones de fijación de los músculos aductores (mioforos) y las cavidades accesorias, son de las características morfológicas más utilizadas en la determinación taxonómica de las diversas familias de rudistas (Pons y Vicens, 2012).

Los rudistas tenían una marcada inclinación por los hábitats de aguas poco profundas en las plataformas carbonatadas (Kauffman y Sohl, 1979). Esto explica la razón de que estos fósiles se encuentren principalmente en litologías que consisten en rocas calizas (ocasionalmente dolomitizadas) y calizas intercaladas con capas siliciclásticas. Debido a esto es que el extraer rudistas de calizas es complicado, dado que la densidad y cohesión de estas hacen que los fósiles estén unidos a la matriz rocosa y su separación puede ocasionar daños a las estructuras de interés. En cambio, la extracción de rudistas de capas de calizas intercaladas con siliciclásticos se simplifica gracias a que estas capas suelen tener una textura más suelta y una menor cohesión que las calizas compactas. De esta manera, es posible separar los fósiles de la matriz rocosa. La extracción de rudistas generalmente involucra el uso de herramientas para microfósiles, como por ejemplo el martillo geológico y cincelos. Además, se utilizan pinceles y brochas para limpiar el excedente de material terrígeno que pudiera presentar el ejemplar de estudio.

Conseguir una alta resolución en el muestreo de rudistas bien preservados es una tarea desafiante, ya que las conchas tienden a estar fragmentadas, desarticuladas, erosionadas e incluso alteradas diagenéticamente (Figura 2). En parte, las descripciones de este grupo se han llevado a cabo mediante la evaluación de fotografías de campo en las que se muestran algunos de los caracteres más sobresalientes. Aunque las descripciones que más enriquecen la información de estos fósiles son aquellas basadas en materiales que se encuentran *in situ*. El estudiar a los rudistas en su posición original brinda información valiosa, ya que facilita la identificación de detalles morfológicos y la observación de caracteres internos y/o externos que podrían perderse durante la extracción de los fósiles. Lo más común es hallar registros de rudistas con una sola valva, siendo la valva inferior la que generalmente se preserva mejor debido a su mayor grosor y tamaño.

Para la identificación de la familia se recurre a algunas de las técnicas más comunes, como la elaboración de láminas delgadas o de *peels* de acetato. Es indispensable para la observación de las estructuras internas de los rudistas realizar secciones orientadas de forma transversal, longitudinal, tangencial y/o radial. El proceso de corte puede realizarse directamente del fósil aislado o de la roca en que está incrustado, siempre y cuando se hayan reconocido las características básicas, como las valvas inferior y superior y el plano de comisura, por ejemplo.

Los rudistas son reconocidos como buenos indicadores paleobiogeográficos debido a su amplia distribución geográfica, rápida tasa de evolución y diversidad ecológica considerable (e.g. Ross y Skelton, 1993). En función de las capacidades de alimentación y de estabilización, los rudistas comprenden tres morfotipos paleoecológicos: elevado o erecto, incrustante y recostado o recumbente (para ahondar en el tema consúltese Skelton y Gili, 2002). Partiendo del hecho de que la capa externa de calcita se conserva más comúnmente y con pocos cambios en su mineralogía original, esta ha sido ampliamente utilizada en estudios geoquímicos que tienen la finalidad de obtener información relevante sobre los paleoambientes (e.g. de Winter et al., 2020; Schmitt et al., 2022).

2.1.3. Clase Cephalopoda, subclases Ammonoidea y Nautiloidea

Los cefalópodos son los moluscos que muestran una complejidad estructural mayor a la de otros invertebrados, habitan ambientes típicamente marinos y se encuentran en un amplio rango de latitudes y profundidades (Martinell et al., 2009), siendo de gran interés para

todo el público dadas las habilidades cognitivas que poseen, las adaptaciones al medio en el que viven y la competencia ecológica con otros organismos acuáticos (Hildenbrand et al., 2021). Estos tienen una amplia historia de vida en la Tierra, originándose en el Cámbrico tardío, probablemente a partir de un molusco similar a un monoplacóforo (Landing et al., 2023). Este ancestro es relevante en la historia de los cefalópodos ya que, gracias a su concha externa de forma cónica, pudo regular su flotabilidad, favoreciendo que el grupo evolucionara rápidamente hasta diversificarse durante el Ordovícico (Kröger et al., 2011; López-Córdova et al., 2022). Dentro de esta gran radiación se encuentran los nautiloideos, los cuales tuvieron una gran diversidad durante el Paleozoico, aunque su diversidad decreció de forma importante durante el Cenozoico, perdurando al presente solo el género *Nautilus* (Guerra, 2006). En tanto que, se ha propuesto que los cefalópodos actuales (Celoidea: pulpos, calamares y sepias) y los extintos ammonoideos derivan de los bacríctidos (Kröger et al., 2011).

La información referente a la evolución del grupo se puede conocer gracias al registro fósil que los cefalópodos han dejado como vestigios de vida en las rocas sedimentarias marinas (Figura 3). De los tres grupos



Figura 2. Fotografías de campo y ediciones con ampliación de rudistas del Cretácico Superior de localidades de San Luis Potosí (A-C) y Chiapas (D-E). Las flechas blancas señalan los fósiles de rudistas y las flechas rojas la valva libre. Abreviaturas anatómicas: CA, cavidad accesoria; CC, cavidad central; DC, diente central; MA, mioforo anterior; MP, mioforo posterior; PC, plano de comisura; VI, valva inferior. Escalas en orden de las fotos: 10, 33, 16, 20 y 35 cm.

principales de cefalópodos: nautiloideos, ammonoideos y coloideos; los dos primeros tienen una concha externa mineralizada de carbonato de calcio, la cual se puede llegar a preservar en el registro fósil, mientras que los coloideos han interiorizado o perdido completamente dicha concha, lo cual ha influido en la escasez de registro fósil de este grupo. Sin embargo, ha habido descubrimientos excepcionales donde se han encontrado rasgos de partes blandas de estos organismos,

por ejemplo de los pulpos (Fuchs *et al.*, 2009; Kröger *et al.*, 2011). Por esta razón, los cefalópodos con concha externa representan más de 1000 géneros de taxones extintos, siendo la mayoría de ellos utilizados como fósiles índice. En particular, las conchas de los ammonoideos y nautiloideos, que están constituidas de aragonita, y en las cuales es observable algún tipo de ornamentación (*e.g.*, costillas, liras, tubérculos, espinas), además de la línea de sutura que en los ammonoideos

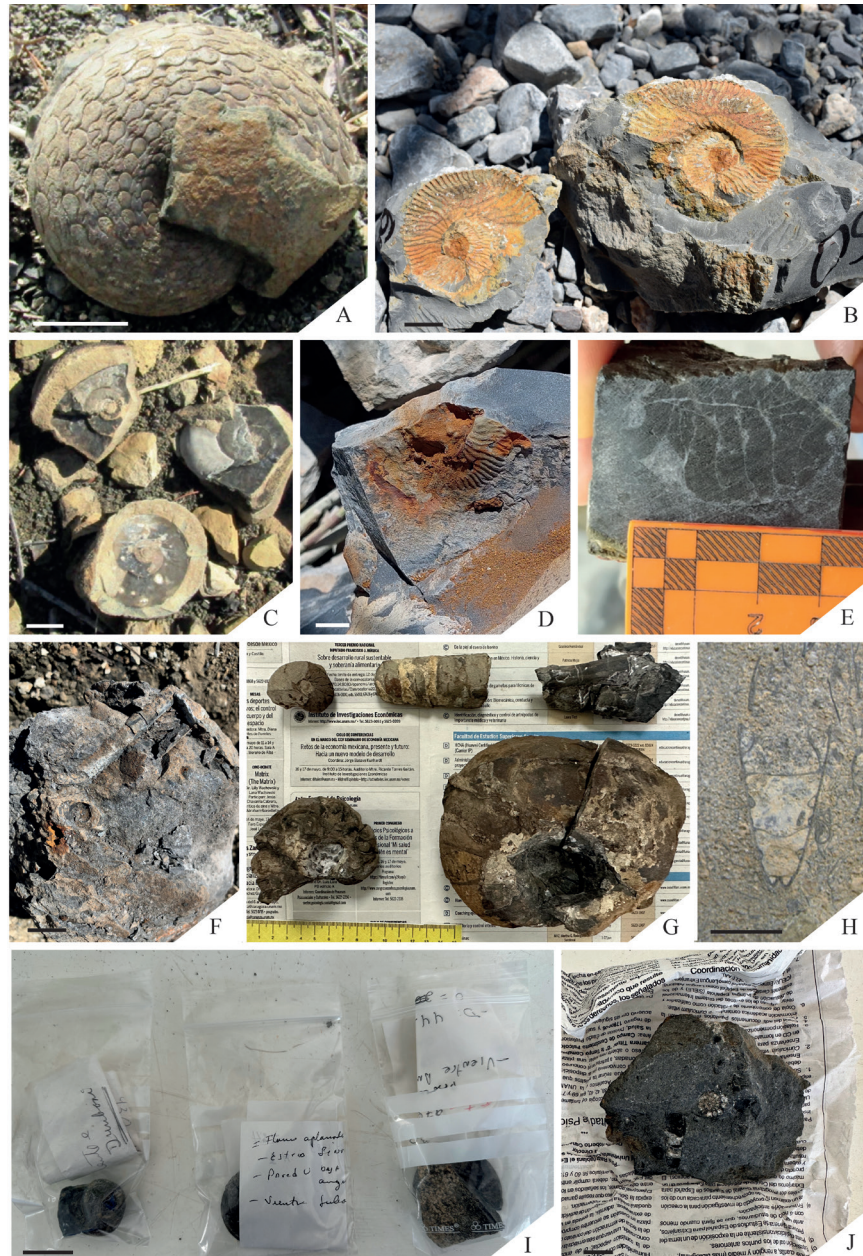


Figura 3. A) Ammonoideo permineralizado en calcarenita del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); B) Ammonoideos permineralizados en calizas pelágicas del Cretácico de Coahuila (Fotografía de José Roberto Ovando Figueroa); C) Ammonoideos permineralizados en concreciones del Pérmico de Coahuila; D) Fragmento de ammonoideo permineralizado en calizas pelágicas del Cretácico de Coahuila (Fotografía de José Roberto Ovando Figueroa); E) Corte de ammonoideo en caliza masiva del Pérmico de Chiapas (Fotografía Norma Betania Palacios García); F) Nautiloideo permineralizado del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); G) Nautiloideos permineralizados del Pérmico de Coahuila; H) Corte de nautiloideo del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); I) Ammonoideos en bolsas individuales con datos de campo; J) Ammonoideo permineralizado en caliza del Pérmico de Coahuila, previo a ser envuelto en periódico para su transporte. Escala gráfica 1 cm.

paleozoicos es fundamental para su identificación taxonómica (Aguirre-Urreta y Cichowolski, 2008; Alanis-Pavón et al., 2023). Cabe resaltar que, a diferencia de los nautiloideos, los ammonoideos del Paleozoico y Mesozoico, debido a su rápida evolución y amplia distribución geográfica, tienen una función clave en la bioestratigrafía del Fanerozoico. Dada la relevancia bioestratigráfica de estos cefalópodos, es necesario tener un control estratigráfico muy estricto de las muestras recolectadas durante el trabajo de campo. Esto se traduce en llevar a cabo una metodología detallada, comenzando con delimitar la zona a estudiar y obtener las coordenadas geográficas del área donde es posible encontrar las conchas de ammonoideos y/o nautiloideos. El siguiente paso es medir una sección estratigráfica, reconociendo y midiendo los estratos a analizar. Es importante asignar una nomenclatura en forma de seriación, comenzando con el primer estrato de abajo hacia arriba, por ejemplo, si el nombre de la sección estratigráfica es Las Margaritas, la nomenclatura será Mt con su número ascendente correspondiente a cada estrato: Mt-1, Mt-2, Mt-3, y así sucesivamente hasta incluir todos los estratos de la sección estratigráfica estudiada. Se recomienda marcar con pintura con base de aceite la nomenclatura en cada estrato, lo cual servirá en caso de que sea necesario regresar por más datos o material, teniendo un buen control estratigráfico para los diferentes trabajos realizados en el lugar.

En el caso de los ammonoideos paleozoicos, es importante que se preserve la forma de la concha y las suturas (Figura 3A), mientras que en los mesozoicos la forma y ornamentaciones serán clave para poder establecer con precisión las especies encontradas (Figura 3B). Los ejemplares del Paleozoico que se han encontrado mejor preservados ocurren en calcarenitas (permineralizados) y concreciones lutíticas (moldes autigénicos), en tanto que estos cefalópodos del Mesozoico están mejor conservados como permineralizaciones en margocalizas, calizas pelágicas o concreciones carbonatadas. Cuando están dentro de concreciones (Figura 3C), es necesario unir con mucho cuidado ambas partes de la concreción y cerrarla con *masking tape* para poder llevarlos al laboratorio y estudiarlos posteriormente. Algunas veces, cuando forman moldes autigénicos dentro de la concreción pueden oxidarse al entrar en contacto con el ambiente aéreo, siendo indispensable evitar exponer el fósil al medio externo. Con respecto a los nautiloideos, para identificar a los taxones es necesario que se preserve la forma de la concha, la sutura, el sifúnculo y las ornamentaciones. Estos cefalópodos presentan conservaciones semejantes a los ammonoideos, y es necesario seguir los mismos procedimientos para su extracción, aunque es más común encontrarlos en rocas sedimentarias siliciclásticas. Cuando ambos se llegan a preservar en calizas masivas (Figura 3E), no es posible observarlos o trabajarlos de manera eficiente, dado que no se pueden notar sus rasgos morfológicos a detalle.

Para su transporte, es recomendable envolver en papel y sujetar con cinta adhesiva tipo *masking tape* el material, esto con el fin de asegurar y proteger al fósil de fracturarse o perder detalles diagnósticos externos presentes. A su vez, el material deberá ser guardado en una bolsa con la nomenclatura correspondiente al estrato del que fue colectado (Montero y Diéguez, 2001). Cuando los ejemplares son pequeños se pueden guardar en cajas de plástico con separaciones o en bolsas individuales (Figura 3I y 3J), con sus datos respectivos. Otro detalle es documentar mediante material fotográfico todo el proceso de trabajo de campo.

2.2. Phylum Brachiopoda

Los braquiópodos son un grupo de invertebrados marinos que muestran un plano corporal compuesto de partes blandas (incluyendo lofóforo, pedúnculo, músculos laterales, ajustores, aductores y/o diductores) y un exoesqueleto conformado por una concha bivalva (valva ventral y dorsal) mineralizada por fosfato de calcio (Linguliformea) o por carbonato de calcio (Craniiformea y Rhynchonelliformea) (Álvarez y Martínez-Chacón, 2009). Al morir estos organismos, las partes blandas se van desintegrando con el paso del tiempo, mientras que el exoesqueleto se puede llegar a preservar. En cuanto a su utilidad geológica, los braquiópodos del Paleozoico son muy buenos proxies estratigráficos; además, son valiosos indicadores paleoambientales debido a que sus morfologías varían conforme las características del ambiente de depósito; e incluso, debido a sus cambios de distribución y regionalizaciones taxonómicas son excelentes indicadores paleobiogeográficos. En el caso de los braquiópodos mesozoicos y cenozoicos, su utilidad radica principalmente en los paleoambientes deposicionales y cambios en su distribución paleobiogeográfica.

Con respecto al registro fósil, las diferentes estructuras morfológicas conservadas de los braquiópodos son útiles para establecer taxones, y dependiendo de las muestras que se tengan será posible llegar a un nivel taxonómico particular (Figura 4) (con excepción del material fragmentario de la región anterior, así como los cortes longitudinales simples de los especímenes, lo cual brinda muy poca información de los grupos) (Figuras 4A y 4B). No obstante, lo más importante sería encontrar especímenes donde se puedan observar rasgos externos importantes (forma externa, charnela, umbos, ornamentaciones) o internos (proceso cardinal, crestas, braquidio, impresiones musculares, etc.). Cuando se presenten moldes externos se pueden realizar modelos de caucho-silicón en laboratorio para observar al espécimen en tres dimensiones.

En el trabajo de campo, que consiste, entre otras actividades, en realizar la extracción y colecta de los ejemplares de braquiópodos, se ha observado que no existe una distinción litológica que defina el tipo de preservación en que se pueden hallar estos fósiles (con excepción de las calizas, donde se conservan

permineralizados), encontrándose en calcarenitas, areniscas, limolitas y lutitas. Este grupo de metazoos están representados en México por muestras con diferentes tipos de preservación: una es la autigénica, formándose por el endurecimiento o cementación rápida de los sedimentos adyacentes a los restos orgánicos, así como por la incorporación o llenado de sedimentos en algunas cavidades. Por otro lado, está la permineralización, formándose por la precipitación de minerales en la

estructura porosa de las conchas o valvas, siendo el mineral infiltrado, generalmente de composición química distinta a la composición original de las partes duras (García-Barrera, 1997). Si los especímenes se conservan como moldes, las partes duras conservadas pueden ser moldes internos (impresiones de estructuras internas) ya sea de la valva ventral, la valva dorsal o ambas valvas, moldes externos (estructuras externas de cualquiera de las valvas) o moldes compuestos (donde se observan

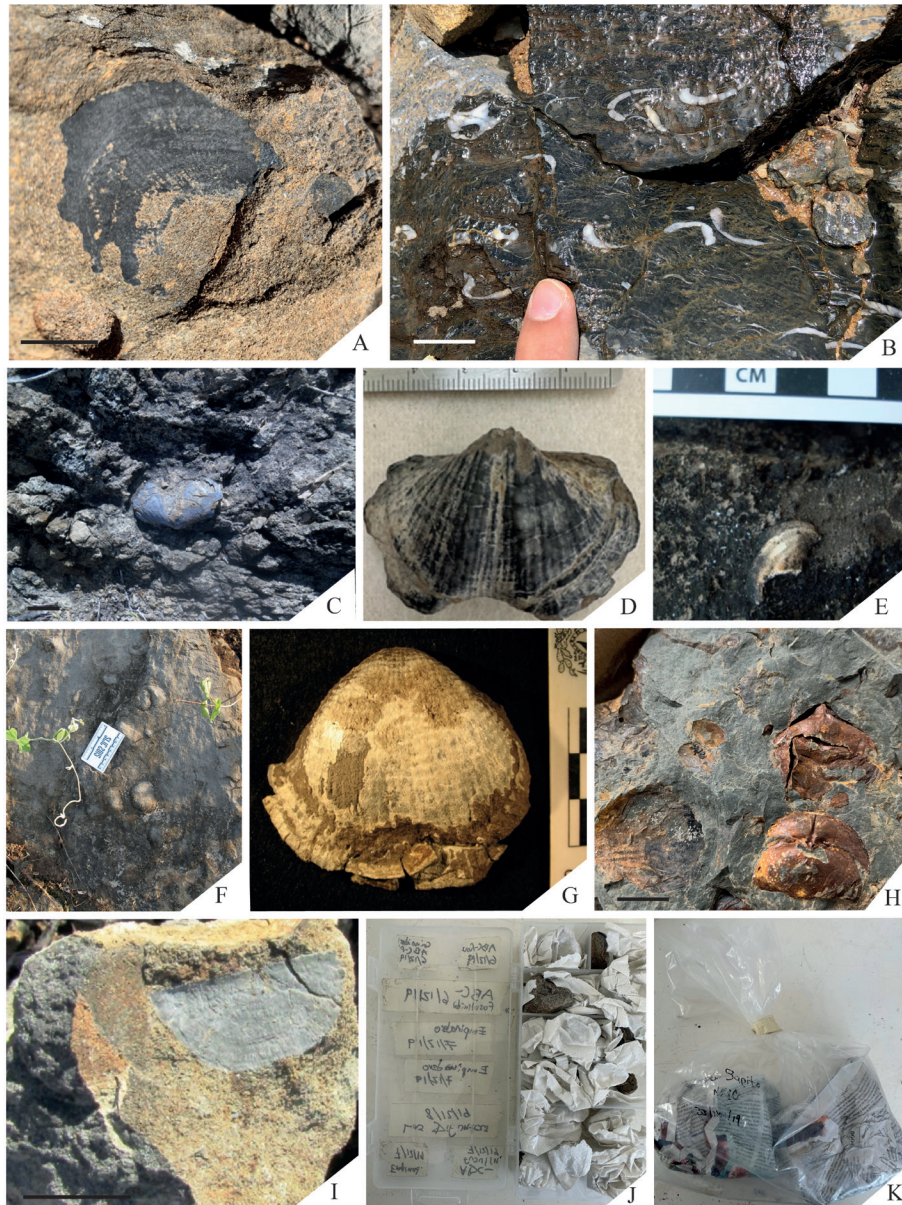


Figura 4. A) Valva permineralizada en calcarenita del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); B) Cortes de valvas de braquiópodos permineralizados en calizas del Carbonífero de Oaxaca (Fotografía de Sandra Guerrero Moreno); C) Braquiópodo permineralizado depositado en lutitas del Pérmico de Coahuila; D) Braquiópodo extraído de la matriz siliciclástica del Pérmico de Coahuila; E) Braquiópodo embebido en caliza masiva del Pérmico de Chiapas; F) Braquiópodos permineralizados depositados en calizas masivas del Pérmico de Chiapas; G) Braquiópodo permineralizado extraído directamente de una caliza masiva del Pérmico de Chiapas; H) Moldes internos de braquiópodos en lutitas del Carbonífero de Oaxaca; I) Valva de braquiópodo permineralizada en calcarenita del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); J) Caja pequeña de plástico con divisiones para trasportar fósiles pequeños, incluyendo sus datos de campo; K) Muestras envueltas en periódico y guardadas en bolsa de plástico para ser transportados. Escala gráfica 1 cm.

tanto estructuras internas como estructuras externas) igualmente de ambas valvas. Si la preservación es por permineralización, los fósiles pueden estar representados por conchas completas (ambas valvas articuladas) o valvas ventrales (internas o externas), dorsales (internas o externas) o sólo fragmentos de las mismas (Benedetto, 2020; Torres-Martínez y Sour-Tovar, 2023). Cabe mencionar que se tiene un registro sobre lo que podría ser la preservación de tejidos blandos (lofóforo) en ejemplares de braquiópodos del Silúrico; no obstante, es muy difícil que se pueda llegar a dar la preservación de partes blandas en este grupo de invertebrados fósiles (Sutton *et al.*, 2005).

Dependiendo de la composición de la matriz portadora es que se realiza el proceso de colecta, ya sea en rocas sedimentarias clásticas de grano fino (limolitas, areniscas de grano fino, lutitas e incluso calcarenitas) o en rocas carbonatadas. Para extraerlos se puede seguir el mismo procedimiento señalado en la sección de bivalvos y gasterópodos (Figuras 4C a 4G). Cuando exista una alta diversidad de especímenes en estas rocas carbonatadas se recuperarán los bloques completos que contengan los fósiles. En este caso, también es importante coleccionar y etiquetar correctamente diferentes muestras de las rocas carbonatadas asociadas, por si se requieren estudios paleoambientales posteriores.

Es importante mencionar que se debe levantar una columna estratigráfica de la sección donde se obtengan los braquiópodos fósiles, identificando sistemáticamente cada estrato donde se encuentren los especímenes, ya que de esta manera se tendrá un verdadero control estratigráfico de los mismos; así como de otros grupos que se encuentren asociados.

Posteriormente, una vez obtenidos los ejemplares se llevará a cabo el proceso de embalaje, envolviéndose en papel periódico o toallas de papel cuando se trata de muestras de tamaño moderado o grandes y más resistentes, introduciéndose en bolsas de plástico grueso. Estas se cierran con cinta *masking tape* y se etiquetan adecuadamente (con plumón permanente), incluyendo el número de estrato, nombre de la sección o localidad, formación y fecha de colecta (en algunos casos se agrega alguna nota adicional si así se requiere). Cuando los ejemplares son más frágiles o muy pequeños se envuelven en papel higiénico y se guardan en cajas de plástico con divisiones, para que no sufran ningún tipo de daño; y de igual manera se etiquetan con los mismos datos para tener un control estratigráfico fidedigno (Figuras 4J y 4K). Finalmente, las bolsas, cajas o bloques de roca son resguardados en cajas grandes de plástico para que de esta manera se transporten de manera segura al lugar donde posteriormente serán analizados y estudiados (Montero y Diéguez, 2001).

2.3. Phylum Arthropoda

Los artrópodos constituyen un grupo de animales con una historia evolutiva extensa, diversa y exitosa.

Además, son objeto de estudios paleobiogeográficos y paleoecológicos (Sánchez de Posada *et al.*, 2009). Una característica distintiva de este grupo es su exoesqueleto, una cubierta externa que recubre todo su cuerpo. Este exoesqueleto, compuesto principalmente de quitina, puede presentar impregnaciones de sales minerales, carbonato cálcico y fosfato cálcico, proporcionándoles flexibilidad y protección. Existen variaciones de esta estructura dentro de los diferentes grupos de artrópodos, las cuales, influenciadas por los diversos hábitats que ocupan, se reflejan en un registro fósil heterogéneo entre sus integrantes (Sánchez de Posada *et al.*, 2009). De los artrópodos, los crustáceos constituyen un grupo notablemente polimórfico, el cual ha sido muy exitoso a lo largo del Fanerozoico, principalmente en ambientes marinos (Sánchez de Posada *et al.*, 2009).

2.3.1. Clase Malacostraca, Orden Decapoda

Dentro de los principales representantes de los crustáceos se encuentran los decápodos, caracterizados por poseer un exoesqueleto débilmente calcificado, lo que limita su potencial de preservación (Buatois *et al.*, 2016). A pesar de ello, son frecuentes en el registro fósil, especialmente en rocas sedimentarias de origen marino, asociadas a ambientes someros (González-León *et al.*, 2018). Además, han sido encontrados en estratos relacionados con depósitos de tormentas y periodos de crecimiento poblacional de tipo oportunista (Hernández-Monzón, 2009).

El registro fósil de los decápodos incluye la preservación de cuerpos completos en tres dimensiones o comprimidos, elementos estructurales como sus exuvias (mudas del exoesqueleto que dejan durante su crecimiento), cutículas y otros restos parciales (Figuras 5A a 5D). De acuerdo con Feldmann y Schweitzer (2017), los especímenes que se preservan con abdomen, apéndices articulados y en posición de vida se consideran cuerpos. Por otro lado, aquellos que conservan el abdomen y apéndices asociados al caparazón, pero con el caparazón separado de otros elementos del exoesqueleto, son considerados exuvias. En lo que respecta a la cutícula, algunos decápodos fósiles presentan una cutícula que parece ser original, mientras que en otros casos se observa una alteración con la adición de material calcítico o fosfático, lo que les confiere una apariencia negra. En casos excepcionales, la cutícula es reemplazada por sílice, óxidos de hierro, hematita o limolita (Feldmann *et al.*, 2007).

La técnica de colecta de los decápodos fósiles depende del tipo de roca en el que se encuentren. Idealmente un fósil se puede extraer de manera directa de la roca dentro de la secuencia estratigráfica, de este modo se asegura el conocimiento de la posición exacta de los fósiles dentro de la sección. De esta manera se puede determinar la orientación del espécimen, así como su relación con la superficie y con otros fósiles. Sin embargo, pocas veces se dan las condiciones ideales para realizar

este tipo de extracción (Figura 5E). Por ello, también se llevan a cabo extracciones de bloques desprendidos, lo que requiere establecer correctamente la capa original a la que pertenece la muestra (Feldmann y Schweitzer, 2017).

En las rocas siliciclásticas de grano fino y grueso, los fósiles se encuentran como concreciones o libres en la matriz, con posibles efectos de descalcificación a causa de ambientes ácidos. Al buscar estos fósiles, es crucial la minuciosidad, ya que los colores pueden confundirse con la matriz circundante. En algunos afloramientos se pueden separar las capas de rocas con cincel y martillo, o se pueden utilizar estas herramientas para trabajar alrededor del espécimen, preservando la mayor cantidad posible de roca que rodea al ejemplar. En rocas no cementadas se requiere precaución al excavar debido a la fragilidad de estas, ya que los apéndices, especialmente los pereiópodos y la superficie ventral, pueden desarticularse del caparazón dorsal. Al final de la extracción, la muestra se debe envolver meticulosamente en papel, asegurando la preservación de todas las piezas que puedan contener elementos de apéndice. Las concreciones suelen tener decápodos excepcionalmente

bien conservados. La recolección de decápodos dentro de las concreciones es relativamente sencilla, basta con golpearlas con un martillo a lo largo del eje mayor y perpendicular al eje más corto de la concreción, preferiblemente apoyándola sobre otra roca. Es esencial tener precaución y equilibrar la concreción correctamente durante este proceso, evitando sostenerla con las manos. Las concreciones se dividen generalmente a lo largo de una zona débil, ya sea en el caparazón dorsal o la superficie ventral del decápodo. Posteriormente, las concreciones se envuelven en papel, con una toalla de papel entre las dos mitades para proteger el fósil. Es crucial recolectar tanto la parte como la contraparte de los especímenes conservados en concreciones, uniendo ambas con cinta *masking tape* para garantizar la integridad de la pieza y su contraparte (Feldmann y Schweitzer, 2017).

En las rocas carbonatadas de grano fino y grueso, que son químicamente menos estables que las siliciclásticas, se conservan caparazones o moldes, incluso cuando están poco cementadas. Para la recolección de fósiles en este tipo de roca, se recomienda iniciar con la identificación de estos en la matriz, utilizando un

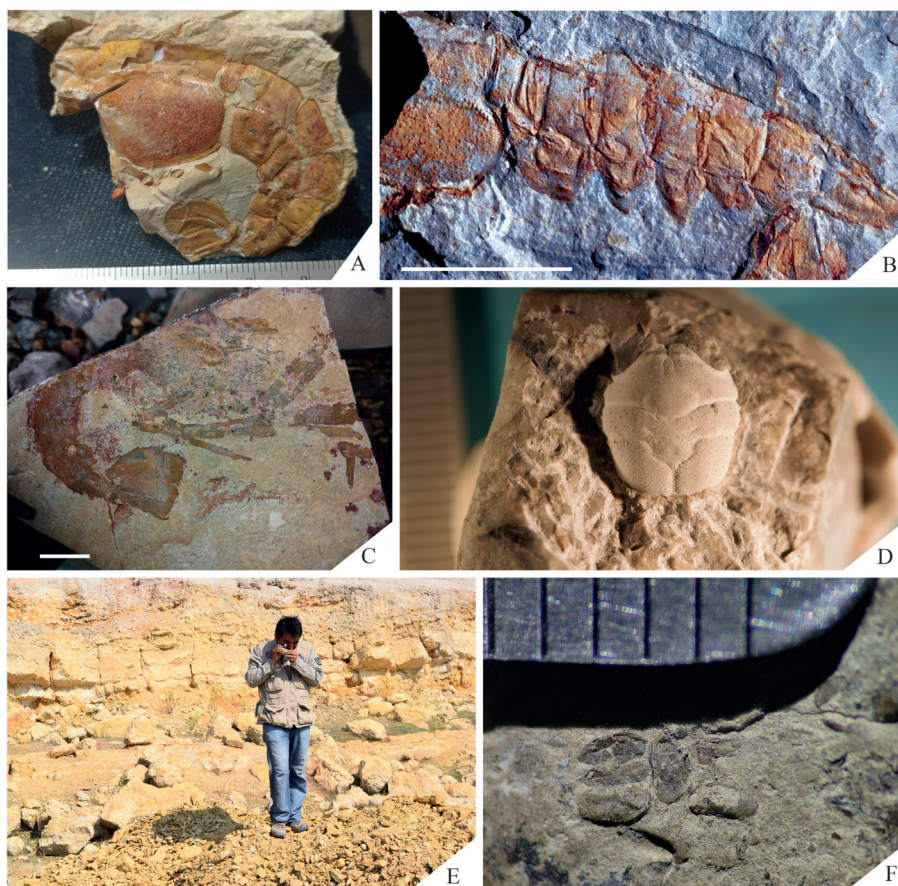


Figura 5. A) Decápodo permineralizado en margita del Cretácico de Puebla; B) Decápodo permineralizado en caliza del Cretácico de Puebla; C) Decápodo permineralizado en lutita del Cretácico de Chihuahua; D) Decápodo permineralizado en caliza del Cretácico de Puebla; E) Trabajo de campo para búsqueda de decápodos (Fotografías de Oscar González León); F) Ostrácodos permineralizados en limolitas del Cretácico de Sonora. Escala gráfica 1 cm.

marcador para visualizarlos fácilmente, así como una lupa para examinar detalladamente las superficies. Una vez identificados, se fragmenta la roca en trozos pequeños, los cuales deben de ser examinados individualmente. Al finalizar, cada uno debe involucrarse cuidadosamente en papel para conservar su integridad (Feldmann y Schweitzer, 2017).

Por último, en sedimentos no consolidados se puede realizar un tamizado. Este proceso implica colocar sedimento en un recipiente con una malla en la parte inferior, agitar suavemente o sumergir repetidamente el recipiente de agua para eliminar todo el material más pequeño que el tamaño de la malla. El material restante sobre la malla puede identificarse posteriormente bajo un microscopio (Feldmann y Schweitzer, 2017).

2.3.2. Clase Ostracoda

Los ostrácodos son crustáceos microscópicos que constituyen otro grupo importante dentro de los artrópodos, los cuales son considerados de los microfósiles más abundantes. Se distinguen por poseer un caparazón carbonatado que cubre todo su cuerpo; además, viven en casi todo tipo de medios acuáticos, desde zonas someras hasta abisales y desde lagos o ríos superficiales hasta aguas continentales subterráneas (Sánchez de Posada *et al.*, 2009). Estas cualidades los hacen excelentes indicadores paleoambientales, ya que se ha observado que el medio donde se encuentran y los factores relacionados a él, moldean morfológicamente su exoesqueleto, la ornamentación de su caparazón y su distribución local y regional (Sánchez de Posada *et al.*, 2009). Aunque se han realizado trabajos bioestratigráficos con ostrácodos, estos son regionales, específicamente del Mesozoico-Cenozoico (*e.g.* Poropat y Colin, 2012; Evangelista-Nogueira y Rodrigues-Nogueira, 2017). Además, es por su caparazón bivalvo calcificado que este grupo tiene un amplio registro fósil. La preservación de las partes blandas del organismo es extremadamente rara, sin embargo, hay registros de sus apéndices articulados (Horne y Siveter, 2016).

En el trabajo de campo es importante detectar dónde se encuentran los especímenes a lo largo de una sección estratigráfica, ya que su presencia ayudará a realizar interpretaciones paleoambientales fidedignas. Al ser microscópicos, solo se pueden coleccionar muestras de mano que incluyan diversos especímenes, los cuales podrán ser observados más adelante en los microscopios del laboratorio (Figura 5F). Los ostrácodos fósiles se encuentran predominantemente en lutitas y areniscas calcáreas, especialmente en horizontes de lutitas pertenecientes a sucesiones sedimentarias de calizas (Sohn, 1961). Así, las muestras extraídas se envuelven en toallas de papel o periódico, para después ser embolsadas. La bolsa se cierra con *masking tape* y se incluyen sus datos respectivos.

Existe una técnica estándar para la extracción de los caparazones de ostrácodos, principalmente aplicada

en rocas con sedimentos finos como arcillas, limos y margas. Este método implica la recolección de muestras de sedimentos o rocas siliciclásticas, seguido de un proceso de disgregación y tamizaje. Los residuos retenidos en el tamiz son examinados bajo un microscopio y montados en un portaobjetos. Esta técnica no es recomendada para sedimentos gruesos por su susceptibilidad a la pérdida de ejemplares por lixiviación (Horne y Siveter, 2016). Se han propuesto alternativas para la recuperación de ostrácodos que presenten una conservación no calcárea o que se encuentren en rocas que no permitan la extracción mediante la técnica de lavado. Entre estas técnicas se incluye el método de extracción de especímenes calcáreos preservados en calizas, que consiste en el calentamiento repetitivo de la roca caliza seguido de un enfriamiento rápido en agua. También, se emplea la técnica de acetólisis caliente, donde las muestras se sumergen previamente secas en ácido acético caliente durante un periodo de días o semanas (Lethiers y Crasquin-Soleau, 1988). Para la recuperación de ostrácodos silicificados de calizas se puede utilizar ácido clorhídrico en baja concentración, teniendo un tiempo de procesamiento que conlleva desde una semana hasta meses, dependiendo de la temperatura, la concentración de la solución ácida y la resistencia de las muestras de caliza (Horne y Siveter, 2016). Es común que se conserven moldes de la morfología externa e interna de los ostrácodos, principalmente en lutitas, areniscas y limolitas, e incluso se pueden obtener moldes de caucho-silicón para el análisis morfológico de los especímenes (Horne y Siveter, 2016).

En casos excepcionales de preservación, donde se conservan detalles tridimensionales que son imposibles de extraer por métodos físicos o químicos, los fósiles son fragmentados y capturados digitalmente mediante tomas en serie y fotografía digital. Posteriormente se reconstruyen en 3D utilizando técnicas informáticas, dando lugar a lo que se denomina como 'fósiles virtuales' (Sutton *et al.*, 2001).

2.4. Phylum Echinodermata

Los equinodermos son invertebrados marinos que se caracterizan generalmente por tres rasgos anatómicos: esqueleto, sistema ambulacral y simetría secundaria pentarradial. La gran mayoría son bentónicos y se encuentran en todos los océanos y profundidades, aunque son más comunes en ambientes costeros (Domínguez *et al.*, 2009). Su registro fósil es diverso, el cual data de al menos el Cámbrico (Brusca *et al.*, 2016).

2.4.1. Clase Crinoidea

Los crinoideos son los equinodermos más antiguos que viven en la actualidad. El endoesqueleto se compone de diversas placas de calcita magnésiana unidas por suturas, ya sea flexibles o rígidas (Domínguez *et al.*, 2009), presentando una forma corporal de copa o cáliz,

con la superficie oral dispuesta hacia arriba (Brusca *et al.*, 2016). El cuerpo está dividido en tres partes principales: tallo, teca o cáliz y aparato branquial, donde se ubican los brazos (Domínguez *et al.*, 2009). El registro fósil del grupo se remonta al Ordovícico Temprano, y aunque los crinoideos paleozoicos fueron muy diversos, en la actualidad únicamente sobrevive una subclase, la cual surgió en el Triásico. Estos equinodermos han sido un proxy muy utilizado en un contexto paleobiológico y paleoambiental, siendo muy útiles para establecer ambientes deposicionales (Baumiller, 2008). Con respecto a la relevancia bioestratigráfica, esta es limitada, ya que debido a su conservación solo ciertos taxones son considerados importantes, en tanto que los osículos columnares disociados poseen alcances temporales muy

amplios y poco precisos (Domínguez *et al.*, 2009; Huitrón-Vargas y Torres-Martínez, 2023).

En el caso de México, el registro fósil está principalmente representado por osículos columnares desarticulados (morfotipos) (*e.g.* Buitrón-Sánchez *et al.*, 2023; Huitrón-Vargas y Torres-Martínez, 2023), siendo los ejemplares con cálices completos sumamente escasos (*e.g.* Villanueva-Olea y Sour-Tovar, 2014) (Figuras 6A a 6E). La preservación de los especímenes completos o fragmentados va a ser variable, encontrándose principalmente moldes autigénicos internos o externos (cálices y osículos columnares) y permineralizaciones (osículos columnares). Cabe resaltar que la mejor conservación de este grupo se observa en rocas siliciclásticas, ya que el material preservado en calizas suele estar



Figura 6. A) Osículo columnar de crinoideo permineralizado en calcarenita del Pérmico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); B) Moldes internos y externos de osículos y columnares de crinoideos en areniscas del Pérmico de Chiapas; C) Moldes de caucho-silicón de osículos columnares del Pérmico de Chiapas; D) Bloque de caliza del Pérmico de Sonora, con numerosos osículos columnares de crinoideos permineralizados bien preservados; E) Bloque de caliza del Pérmico de Chiapas, con osículos columnares de crinoideos permineralizados recrystalizados; F) Erizos regulares permineralizados del Jurásico de Durango (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán); G) Erizos irregulares permineralizados del Cretácico de Coahuila (Fotografía de Jesús Quiroz Barragán). Escala gráfica a 1 cm.

recristalizado e intemperizado (generalmente formando encrinitas), lo cual en la mayoría de los casos hace difícil llevar a cabo determinaciones taxonómicas confiables (Figura 6E).

Con respecto a la extracción, se utiliza una pica geológica, considerando el tipo de estructura y preservación de los especímenes. En el caso de los moldes autigénicos, si el espécimen conserva el cáliz, se tiene que extraer el bloque o la laja que conserva al organismo, procurando no golpear de manera cercana al ejemplar. Al obtenerlo, hay que envolverlo en toalla de papel o papel higiénico y meterlo en una bolsa con sus datos de colecta respectivos, evitando en absoluto poner algún otro material o ejemplar sobre el fósil en cuestión. Para los moldes de osículos columnares (Figura 6B), estos se pueden obtener de manera más sencilla, extrayendo los bloques que contengan estos especímenes (generalmente cada muestra va a contener numerosos ejemplares). Lo colectado se tiene que envolver en periódico o toallas de papel, después hay que guardarlas en una bolsa cerrada con *masking tape*, escribiendo sobre la bolsa los datos de colecta. Incluso, se pueden introducir (sin llegar a meter demasiadas y apretar mucho las rocas entre ellas) diferentes muestras en una misma bolsa. En ambos casos, para estudiar a los especímenes será imprescindible realizar moldes de caucho-silicón en el laboratorio (Figura 6C).

Cuando los ejemplares están permineralizados en areniscas o calcarenitas, solo es necesario golpear la matriz que está embebiendo a los especímenes, con lo cual será posible obtener osículos columnares u osículos disociados de los tallos de crinoideos. Estos especímenes suelen ser pequeños, por lo que se corre el riesgo de que se pierdan o se rompan al ser liberados de la matriz, siendo necesario envolverlos en papel higiénico o toallas de papel para guardarlos en cajas de plástico con separaciones, procurando etiquetar correctamente las muestras con sus datos de campo. Si la matriz está muy solidificada, se tendrá que extraer la muestra con el fósil dentro, para posteriormente ser limpiada en laboratorio con un lápiz percutor. Para transportar, se pueden envolver las muestras en periódico, para guardarse después en una bolsa de plástico con sus datos respectivos (Figura 6D).

Cuando los osículos están depositados en calizas, y presentan buena preservación, lo más recomendable será extraer el bloque completo. Este se envuelve en periódico y se guarda en bolsas etiquetadas para su manejo posterior. Con esto se podrá llevar a cabo el análisis de los fósiles directamente en laboratorio.

2.4.2. Clase Echinoidea

Los equinoideos o erizos de mar son organismos bentónicos que habitan todos los mares a diferentes profundidades, incluso en zonas abisales (Domínguez et al., 2009). En general, su cuerpo está constituido por placas esqueléticas calcíticas unidas por una matriz

de colágeno, espinas móviles y surcos ambulacrales cerrados. Además, de acuerdo con algunas características morfológicas particulares, van a estar divididos tradicionalmente en dos grupos principales: regulares e irregulares (Brusca et al., 2016). Los regulares están caracterizados por un endoesqueleto globoso, espinas alargadas sólidas o huecas, ano aboral con placas ambulacrales y un aparato mandibular interno, formado por una linterna de Aristóteles de tamaño considerable. Mientras que los irregulares (comúnmente llamados bollos y galletas de mar) presentan un cuerpo globular o discoidal con tendencia a la simetría bilateral secundaria, ano variable (en posición oral o posterior), espinas usualmente pequeñas y una linterna de Aristóteles reducida (presente solo en galletas de mar) (Brusca et al., 2016). El reporte más antiguo de estos equinodermos es del Ordovícico, observándose en el registro fósil que hubo una fuerte diversificación del grupo durante el Triásico Tardío–Jurásico Temprano, e incluso surgieron los erizos irregulares a finales de este intervalo de tiempo (Domínguez et al., 2009). Este grupo es reconocido como un proxy paleoecológico importante, principalmente desde mediados del Mesozoico hasta finales del Cenozoico, sobre todo porque los erizos regulares e irregulares habitan ambientes deposicionales distintos (Domínguez et al., 2009). En cuanto a la bioestratigrafía, solo los representantes del Cretácico–Paleógeno son considerados fósiles índice.

La preservación de macrofósiles en México se da generalmente como permineralizaciones del Mesozoico–Cenozoico (Figuras 6F y 6G), siendo los moldes autigénicos muy escasos. En el caso de los equinoideos es necesario encontrar especímenes donde se observen las suturas, así como el número y forma de las placas del endoesqueleto, ya que son necesarios para realizar una asignación específica fehaciente. Aunque el material de este grupo es diverso en el país, el registro fósil está mayormente representado por los erizos irregulares. Esto se ha atribuido al estilo de vida infaunal que presentan estos organismos (Domínguez et al., 2009). Así, la mejor preservación se ha observado en las rocas siliciclásticas (margas, limolitas, areniscas y calcarenitas), de donde se pueden extraer testas permineralizadas completas o incluso espinas enteras. Para esto, es necesario golpear moderadamente con una pica la matriz donde se encuentra el fósil, extrayendo la muestra al liberarse de la roca portadora. Si la matriz está muy solidificada, se guarda la muestra completa para después extraer al espécimen en el laboratorio, utilizando un lápiz percutor.

Cuando se extraen ejemplares pequeños, se tienen que envolver en periódico o toallas de papel, para después guardarse en cajas de plástico con separaciones (y su respectiva información de colecta). Pero cuando son especímenes de tamaño moderado o grande se pueden envolver en periódico, guardando varias muestras (sin apretarlas demasiado) en la misma bolsa, la cual estará cerrada con *masking tape* y etiquetada adecuadamente.

3. Discusión y conclusiones

Los invertebrados marinos son una valiosa herramienta cuando se está trabajando la paleontología o geología de una región en particular, sobre todo de México, en donde se pueden localizar taxones de distintas eras y periodos del Fanerozoico. La información que se pueda obtener dependerá del grupo con el que se trabaje, por lo que será necesario considerar qué datos pueden proporcionar determinados fósiles antes de ser extraídos para estudiarlos. De los grupos que se trataron en este trabajo, los bivalvos (Mesozoico–Cenozoico), rudistas (Jurásico Tardío–Cretácico), gasterópodos (Mesozoico medio–Cenozoico), ammonoideos (Devónico–Cretácico), braquiópodos (Ordovícico–Jurásico) y equinoideos (Cretácico–Paleógeno) son considerados importantes fósiles índice en intervalos de tiempo particulares.

Con respecto a los paleoambientes de depósito, la información que nos pueden brindar los diferentes grupos de organismos bentónicos es significativa, dado que estos tendrán mayor posibilidad de fosilizarse en sus ambientes originales. Así, en bivalvos o gasterópodos se pueden observar morfologías funcionales relacionadas con sus hábitos de vida, variando de acuerdo con el tipo de sustrato y forma de alimentación (Martinell *et al.*, 2009; Quiroz-Barroso, 2017), e incluso se pueden inferir condiciones paleoambientales al realizar estudios geoquímicos en conchas de bivalvos fósiles (Camacho *et al.*, 2008). Esto incluye a los rudistas (bivalvos modificados), que presentan morfologías que les permitieron vivir en plataformas calcáreas someras de los márgenes del Tethys (Pons y Vicens, 2012). En cuanto a los braquiópodos, se observa una amplia diversidad de morfologías en la concha, reflejando diferentes soluciones adaptativas para habitar distintos sustratos, con un modo de vida fijo o libre, ya sea de manera epifaunal, seminafaunal o infaunal (Manceñido y Damborenea, 2007). En el caso de los crustáceos, su registro fósil brinda datos sobre su respuesta a cambios ambientales a corto y largo plazo, e incluso algunos tipos de estrategias de recuperación a eventos catastróficos (Vega, 2017). Dado el tipo de preservación de los crustáceos decápodos, también se puede recurrir al análisis de sus microcoprolitos para hacer estudios paleoecológicos (*e.g.*, Torres-Martínez *et al.*, 2020), cuyo campo de conocimiento está apenas en desarrollo. Respecto a los crinoideos, al presentar una clara estabilidad entre su modo de vida y ambientes deposicionales, tanto en los representantes actuales como fósiles, son considerados un grupo clave en el conocimiento sobre la estructura de las comunidades marinas del pasado (Ausich y Simms, 2002). Y finalmente los equinoideos, que al ser habitantes epifaunales (formas regulares) e infaunales (formas irregulares) de diferentes sustratos, permiten identificar como eran las condiciones sedimentarias del ambiente donde se depositaron (Domínguez *et al.*, 2009), tomando en cuenta que incluso se ha detectado, en organismos actuales, una correspondencia entre diferentes estadios de crecimiento

con el tipo de sustrato que habitan (Torres-Martínez *et al.*, 2016).

En un contexto paleobiogeográfico, cada grupo va a tener su propia relevancia, ya que pueden proporcionar datos a nivel local, regional o global. Además, la presencia de barreras geográficas formadas a lo largo de la historia geológica de la Tierra ha influenciado en la distribución y surgimiento de nuevos taxones, produciéndose diferentes regionalizaciones taxonómicas. Así, en diferentes periodos de tiempo se ha visto que algunos organismos bentónicos pueden formar distintas provincias bióticas a nivel global, por ejemplo, los braquiópodos y gasterópodos (*e.g.* Yancey, 1975), mientras que en los nectónicos se ha observado la formación de diferentes reinos, cuya asociación ocupa una mayor extensión territorial, por ejemplo, los ammonoideos (*e.g.* Ruiz-Naranjo y Torres-Martínez, 2022 y Alanis-Pavón *et al.*, 2023).

Finalmente, hay que recalcar que el rescate y colecta de los ejemplares fósiles solo se puede hacer bajo un estricto control de un protocolo de investigación. Además, hay que considerar que el registro fósil es un valioso referente de la biodiversidad que habitó nuestro país en el pasado geológico, y nos puede brindar gran cantidad de información sobre la historia geológica del territorio mexicano.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Carlos Castañeda-Posadas y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por la invitación a participar en el presente trabajo. Del mismo modo, un reconocimiento para: Dr. Jesús Quiroz-Barragán, Dr. Oscar González-León, M. en C. José Roberto Ovando-Figueroa, M. en C. Sandra Guerrero-Moreno y M. en C. Norma Betania Palacios-García por el material fotográfico que contribuyó a ilustrar el presente trabajo. MATM agradece el apoyo proporcionado a través del proyecto PAPIIT-DGAPA-UNAM IN114623, el cual financió parcialmente este manuscrito.

Referencias

- Aguirre-Urreta, B., & Cichowolski, M. (2008). Cephalopoda. En H. H. Camacho, & M. I. Longobucco (Eds.), *Los invertebrados fósiles: Tomo II* (pp. 441–476). Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Vazquez Mazzini editores.
- Alanis-Pavón, A., Moreno-Bedmar, J. A., Torres-Martínez, M. A., & Guerrero-Suastegui, M. (2023). Los ammonoideos pérmicos de Guerrero: importancia bioestratigráfica y paleobiogeográfica. *Paleópolis*, 4(2), 16–21.
- Alencáster, G. (1971). Rudistas del Cretácico Superior de Chiapas. *Paleontología Mexicana*, 34, 1–91.
- Álvarez, F., & Martínez-Chacón, M. L. (2009). Braquiópodos. En M. L. Martínez-Chacón, & P. Rivas (Eds.), *Paleontología de Invertebrados* (pp. 377–418). Sociedad Española de Paleontología. Instituto Geológico y Minero de España. Universidad de Oviedo y Universidad de Granada.

- Ausich, W. I., & Simms, M. J. (2002). Ecology and ecological interactions. In H. Hess, W. I. Ausich, C. E. Brett, & M. J. Simms (Eds.), *Fossil crinoids* (pp. 55–59). Cambridge University Press.
- Baumiller, T. K. (2008). Crinoid ecological morphology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36(1), 221–249. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124116>
- Benedetto, J. L. (2020). Braquiópodos del Caradociano Temprano de la Formación La Pola, sierra de Villicum, Precordilera de San Juan (Argentina). *Ameghiniana*, 40(1), 33–52.
- Brusca, R. C., Moore, W., & Shuster, S. M. (2016). *Invertebrates*. Sinauer Associates.
- Buatois, L. A., Carmona, N. B., Curran, H. A., Netto, R. G., Mángano, M. G., & Wetzel, A. (2016). The Mesozoic marine revolution. In M. G. Mángano, & L. A. Buatois (Eds.), *The Trace-Fossil Record of Major Evolutionary Events: Volume 2: Mesozoic and Cenozoic* (pp. 19–134). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9597-5_2
- Buitrón-Sánchez, B. E., Cuadros-Mendoza, I. M., Cuen-Romero, F. J., & Torres Martínez, M. A. (2023). Crinoideos (Echinodermata: Crinoidea) del Misisípico-Pensilvánico de la sierra Santa Teresa, región central del estado de Sonora, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94, 1–14. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.5134>
- Camacho, H. H., & del Río, C. J. (2008). Gastropoda. En H. H. Camacho, & M. I. Longobucco (Eds.), *Los invertebrados fósiles: Tomo I* (pp. 323–376). Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Vazquez Mazzini editores.
- Camacho, H. H., Damborenea, S. E., & del Río, C. J. (2008). Bivalvia. En H. H. Camacho, & M. I. Longobucco (Eds.), *Los invertebrados fósiles: Tomo I* (pp. 387–440). Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Vazquez Mazzini editores.
- Campbell, D. (2006). Fossil mollusks. In C. F. Sturm, T. A. Pearce, & A. Valdés (Eds.), *The Mollusks: A Guide to Their Study, Collection, and Preservation* (pp. 197–205). American Malacological Society.
- Cox, L. R. (1969). General features of Bivalvia. In R. C. Moore (Ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology: Part N, Mollusca 6: Bivalvia* (vol. 1, pp. 2–129). Geological Society of America and University of Kansas Press.
- de Winter, N. J., Goderis, S., Van Malderen, S. J. M., Sinnesael, M., Vansteenberge, S., Snoeck, C., Belza, J., Vanhaecke, F., & Claeys, P. (2020). Subdaily-scale chemical variability in a *Torreites sanchezi* rudist shell: implications for rudist paleobiology and the Cretaceous day-night cycle. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(2), 1–21. <https://doi.org/10.1029/2019PA003723>
- Domínguez, P., Menn, J. L., Martí-Mus, M., & Paz-Villalba, M. (2009). Equinodermos. En M. L. Martínez-Chacón, & P. Rivas (Eds.), *Paleontología de Invertebrados* (pp. 447–496). Sociedad Española de Paleontología. Instituto Geológico y Minero de España. Universidad de Oviedo y Universidad de Granada.
- Evangelista-Nogueira, A. A., & Rodrigues-Nogueira, A. C. (2017). Ostracods biostratigraphy of the Oligocene–Miocene carbonate platform in the Northeastern Amazonia coast and its correlation with the Caribbean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 80(178), 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.10.006>
- Feldmann, R. M., & Schweitzer, C. E. (2017). Collecting fossil decapods and other large crustaceans. *Journal of Crustacean Biology*, 37(2), 220–227. <https://doi.org/10.1093/jcbl/rux013>
- Feldmann, R. M., Schweitzer, C. E., Redman, C. M., Morris, N. J., & Ward, D. J. (2007). New Late Cretaceous lobsters from the Kyzylkum desert of Uzbekistan. *Journal of Paleontology*, 81(4), 701–713. [https://doi.org/10.1666/pleo0022-3360\(2007\)081\[0701:NLCLFT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/pleo0022-3360(2007)081[0701:NLCLFT]2.0.CO;2)
- Fuchs, D., Bracchi, G., & Weis, R. (2009). New octopods (Cephalopoda: Coleoidea) from the Late Cretaceous (Upper Cenomanian) of Hâkel and Hâdjoula, Lebanon. *Palaeontology*, 52(1), 65–81. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2008.00828.x>
- García-Barrera, P. (1997). Fosilización. En P. García-Barrera, F. Sour, & M. Montellano (Eds.), *Paleontología* (1ª ed., pp. 75–90). Editorial Prensas de Ciencias.
- González-León, O., Vega, F. J., Ferratges, F. A., & Moreno-Bedmar, J. A. (2018). La presencia del crustáceo fósil *Atherfieldastacus magnus* en México. *Nuestra Tierra*, 30, 11–15.
- Guerra, A. (2006). Estrategias evolutivas de los cefalópodos. *Investigación y ciencia*, 355, 50–59.
- Hernández-Monzón, O. F. (2009). *Una revisión de lophoranina cristaspina (Crustáceo, decapodo) del Eoceno medio de Chiapas, México e implicaciones paleobiológicas y evolutivas* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000643126>
- Hildenbrand, A., Austermann, G., Fuchs, D., Bengtson, P., & Stinnesbeck, W. (2021). A potential cephalopod from the early Cambrian of eastern Newfoundland, Canada. *Communications Biology*, 4(388), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01885-w>
- Horne, D. J., & Siveter, D. J. (2016). Collecting and processing fossil ostracods. *Journal of Crustacean Biology*, 36(6), 841–848. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002487>
- Huitrón-Vargas, G., & Torres-Martínez, M. A. (2023). Nuevos registros de osículos columnares de crinoideos del Pérmico (Cisuraliano temprano) de Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 75(2), 1–14. <http://dx.doi.org/10.18268/BSG-M2023v75n2a120423>
- Kauffman, E. G., & Sohl, N. F. (1979). Rudists. In R. W. Fairbridge (Ed.), *Encyclopedia of Paleontology* (pp. 723–737). Springer Berlin, Heidelberg.
- Kröger, B., Vinther, J., & Fuchs, D. (2011). Cephalopod origin and evolution: a congruent picture emerging from fossils, development and molecules: extant cephalopods are younger than previously realised and were under major selection to become agile, shell-less predators. *Bioessays*, 33(8), 602–613. <https://doi.org/10.1002/bies.201100001>
- Landing, E., Kröger, B., Westrop, S. R., & Geyer, G. (2023). Proposed Early Cambrian cephalopods are chimaeras, the oldest known cephalopods are 30 my younger. *Communications Biology*, 6(32), 1–3. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-04383-9>
- Lethiers, F., & Crasquin-Soleau, S. (1988). Comment extraire les microfossiles à tests calcitiques des roches calcaires dures. *Revue de micropaléontologie*, 31(1), 56–61.
- López-Córdova, D. A., Avaria-Llautureo, J., Ulloa, P. M., Braid, H. E., Revell, L. J., Fuchs, D., & Ibáñez, C. M. (2022). Mesozoic origin of coleoid cephalopods and their abrupt shifts of diversification patterns. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 166, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2021.107331>
- Manceñido, M. O., & Damborenea, S. E. (2007). Brachiopoda. En H. H. Camacho, & M. I. Longobucco (Eds.), *Los invertebrados fósiles: Tomo I* (pp. 243–292). Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Vazquez Mazzini editores.
- Martinell, J., Checa, A., Domenech, R., Gili, C., Olóriz, F., & Rodríguez-Tovar, F. J. (2009). Moluscos. En M. L. Martínez-Chacón, & P. Rivas (Eds.), *Paleontología de Invertebrados* (pp. 227–376). Sociedad Española de Paleontología. Instituto Geológico y Minero de España. Universidad de Oviedo y Universidad de Granada.
- Montero, A., & Diéguez, C. (2001). Colecta y conservación de fósiles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 9(2), 121–126.
- Morales-Ortega, P., Aguilar, F. J., & Nava-Sánchez, E. H. (2021). ¿Qué sabemos sobre la legislación de los fósiles en México?, un análisis preliminar. *Paleontología Mexicana*, 10(1), 1–23.
- Pons, J. M., & Vicens, E. (2012). Los rudistas, objeto del interés paleontológico de la Dra. Alencáster. Morfología constructiva de la concha de los rudistas. *Paleontología Mexicana*, 62, 37–51.
- Poropat, S. F., & Colin, J. P. (2012). Early Cretaceous ostracod biostratigraphy of eastern Brazil and western Africa: An overview. *Gondwana Research*, 22(3–4), 772–798. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.06.002>
- Quiroz-Barroso, S. A. (2017). El orden Pectinida (Mollusca: Bivalvia) a través del tiempo y del espacio. En S. Cevallos-Ferriz, & A. R. Huerta-Vergara (Eds.), *Paleobiología, interpretando procesos de la vida pasada* (vol. 2, pp. 189–231). Publicaciones y Fomento Editorial UNAM.

- Ross, D. J., & Skelton P. W. (1993). Rudist formations of the Cretaceous: A paleoecological, sedimentological and stratigraphical review. In V. P. Wright (Ed.), *Sedimentology Review 1* (pp. 73–91). Blackwell Scientific Publications.
- Ruiz-Naranjo, M., & Torres-Martínez, M. A. (2022). El registro fósil de los ammonoideos del Carbonífero–Pérmico de México y sus aportes bioestratigráficos, paleobiogeográficos y paleoambientales: una revisión. *Paleontología Mexicana*, 11(2), 59–76.
- Sánchez de Posada, L. C., Arbizu, M., Delclós, X., Gozalo, R., Liñán, E., Peñalver, E., Rábano, I., & Rodríguez-Lázaro, J. (2009). Artrópodos. En M. L. Martínez-Chacón, & P. Rivas (Eds.), *Paleontología de Invertebrados* (pp. 111–226). Sociedad Española de Paleontología. Instituto Geológico y Minero de España. Universidad de Oviedo y Universidad de Granada.
- Schmitt, K. E., Huck, S., Krummacker, M., de Winter, N. J., Godet, A., Claeys, P., & Heimhofer, U. (2022). Radiolitid rudists: an underestimated archive for Cretaceous climate reconstruction?. *Leithaia*, 55(4), 1–21. <https://doi.org/10.18261/let.55.4.4>
- Skelton, P. W. (1974). Aragonitic shell structures in the rudist *Biradiolites*, and some paleobiological inferences. *Géologie méditerranéenne*, 1(2), 63–74. <https://doi.org/10.3406/geolm.1974.928>
- Skelton, P. W. (1979). Preserved ligament in a radiolitid rudist bivalve and its implication of mantle marginal feeding in the group. *Paleobiology*, 5(2), 90–106.
- Skelton, P. W., & Smith, A. B. (2000). A preliminary phylogeny for rudist bivalves: Sifting clades from grades. In E. M. Harper, J. D. Taylor, & J. A. Crame (Eds.), *The Evolutionary Biology of the Bivalvia* (vol. 177, pp. 97–127). Geological Society.
- Skelton, P. W., & Gili, E. (2002). Paleoecological classification of rudist morphotypes. In *Proceedings First International Conference on Rudists*, Beograd, 1988, ed. Mileva Sladić-Trifunović, “Rudists”, Union of Geological Societies of Yugoslavia, Memoir Publication, 265–285.
- Sohn, I. G. (1961). Techniques for preparation and study of fossil ostracodes. In R. C. Moore (Ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology: Part Q, Arthropoda 3: Crustacea, Ostracoda* (pp. 64–69). Geological Society of America and University of Kansas Press.
- Sutton, M. D., Briggs, D. E., Siveter, D. J., & Siveter, D. J. (2001). Methodologies for the visualization and reconstruction of three-dimensional fossils from the Silurian Herefordshire Lagerstätte. *Palaentologia Electronica*, 4(1), 1–17.
- Sutton, M. D., Briggs, D. E., Siveter, D. J., & Siveter, D. J. (2005). Silurian brachiopods with soft-tissue preservation. *Nature*, 436(7053), 1013–1015. <https://doi.org/10.1038/nature03846>
- Torres-Martínez, M. A., Solís-Marín, F. A., Laguarda-Figueras, A., & Sour-Tovar, F. (2016). Influencia de las variables fisicoquímicas en la estructura de tallas y distribución de *Meoma ventricosa grandis* (Echinodermata: Brissidae) dentro del canal Boca Chica, Acapulco, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 51(2), 373–383. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572016000200014>
- Torres-Martínez, M. A., Núñez-Useche, F., & Barragán, R. (2020). Ich-nologic note first occurrence of the microcoprolite *Palaxius salataensis* in the Aptian (Lower Cretaceous) of northeast Mexico and its paleoecological implications. *Ichnos*, 27(4), 361–368. <https://doi.org/10.1080/10420940.2020.1747060>
- Torres-Martínez, M. A., & Sour-Tovar, F. (2023). New rhynchonellid and spire-bearing brachiopods from the Carboniferous of Mexico. Paleogeographical significance of the Oaxacan brachiopod fauna through the Serpukhovian–Moscovian. *Journal of Paleontology*, 97(1), 90–111. <https://doi.org/10.1017/jpa.2022.70>
- Vega, F. J. (2017). El registro fósil de crustáceos en México. En S. Cevallos-Ferriz, & A. R. Huerta-Vergara (Eds.), *Paleobiología, interpretando procesos de la vida pasada: Volumen II* (pp. 211–231). Publicaciones y Fomento Editorial UNAM.
- Villanueva-Olea, R., & Sour-Tovar, F. (2014). A new genus and four new species of cladid crinoids from the Carboniferous of Oaxaca State, Mexico. *Journal of Systematic Palaeontology*, 13(7), 527–542. <https://doi.org/10.1080/14772019.2014.913719>
- Yancey, T. E. (1975). Permian marine biotic provinces in North America. *Journal of Paleontology*, 49(4), 758–766.