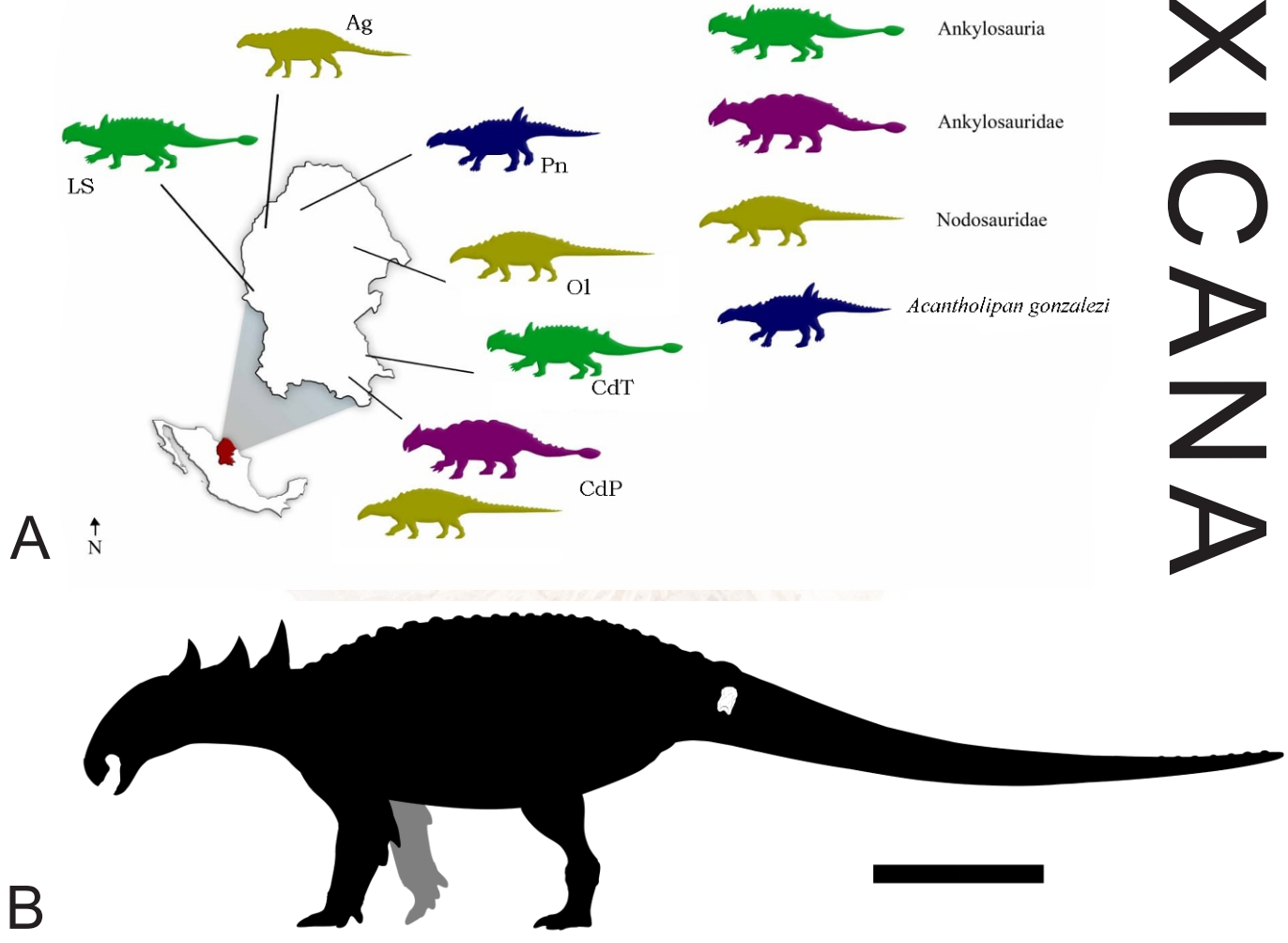


PALEONTOLOGÍA

MEXICANA

Volumen 14 Número 1



A: Formaciones geológicas de Coahuila donde se han encontrado restos de ankylosáuridos y nodosáuridos: Ag) Formación Aguja (Campaniano); CdT) Formación Cañón del Tule (Maastrichtiano); Pn) Formación Pen (Santoniano); LS) Estratos de La Soledad (Campaniano); CdP) Formación Cerro del Pueblo (Campaniano); OI) Formación Olmos (Campaniano-Maastrichtiano). B: Silueta de un tireóforo mostrando CPC 3046. Barra de escala = 1 m.



Universidad Nacional Autónoma de México





PALEONTOLOGÍA MEXICANA

e-ISSN (versión electrónica): 2007-5189.

ISSN (revista impresa): 0185-478X.

ISSN-L: 0543-7652.

Número de reserva: 04-2022-072810185500-102.

Segunda Época (2012-actualidad).

Entidad de edición: Unidad Editorial del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Revista incluida en: Periódica, Biblat, MIAR, Toda la UNAM en línea, Ulrich's Web, Geomex, Latindex catálogo y Revistas UNAM.

EDITOR EN JEFE — EDITOR-IN-CHIEF

Josep Anton Moreno Bedmar
Instituto de Geología, México.

COMITÉ EDITORIAL — EDITORIAL ADVISORY BOARD

Miguel Company Sempere
Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, España.

Carles Martin Closas
Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, España.

Francisco Javier Vega Vera
Instituto de Geología, UNAM, México.

Angélica Oviedo García, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Chihuahua, México.

Gerardo F. Carbot Chanona
Museo de Paleontología Eliseo Palacios Aguilera, Instituto de Historia Natural, Chiapas, México.

Victor Adrian Pérez Crespo
Instituto de Geología, UNAM, México.

Roque Aguado Merlo
Departamento de Geología, Universidad de Jaen, España.

Beatriz Aguirre Urreta
Departamento de Paleontología, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Liseth Pérez Alvarado
Instituto de Geosistemas y Bioindicaciones, Universidad Técnica de Braunschweig, Alemania.

EDICIÓN TÉCNICA Y PÁGINA WEB — TECHNICAL EDITION AND WEBSITE

Coordinadora de edición técnica: Sandra Ramos Amézquita.

Edición técnica: José Roberto Ovando Figueroa, Lia Rodríguez Gómez y Sandra Ramos Amézquita.

Corrección de estilo: José Roberto Ovando Figueroa y Lia Rodríguez Gómez.

Formación y diseño: León Felipe Álvarez Sánchez, Lia Rodríguez Gómez, Mónica Antúnez Argüelles y José Roberto Ovando Figueroa.

Apoyo página web: Alejandro Silva.

NÚMERO REGULAR – *REGULAR ISSUE*

Paleozoología

PÁGINA / PAGES	ARTÍCULOS – ARTICLES
1	An ornithopod trackway from the Albian-Turonian Arcurquina Formation, Arequipa, Peru, and its paleoecological implications. Guillermo-Ochoa, Angel A.; Zevallos-Valdivia, Leonardo M.; Castro-Eguiluz, Camila; Garcia-Flores, Vilma; Martinez, Jean-Noël; Silupú-Cárdenas, Omar Alfredo; Sánchez-Alva, Claudia Isabel; Epiquien-Llaja, José Luis; Pintado-Abarca, Thalía del Pilar; Delgado-Quiroz, Lizbeth Mariana; Rodríguez-de la Rosa, Rubén A.
13	Ankylosaurians from Coahuila, Mexico. Rivera-Sylva, Héctor E.; Aguillón-Martínez, Martha C.; Guzmán-Gutiérrez, José Rubén; Flores-Ventura, José.

Geoquímica

PÁGINA / PAGES	ARTÍCULOS – ARTICLES
29	Major element analysis in sedimentary rocks from the Middle Mississippian– Middle Pennsylvanian La Joya section in Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico. Villanueva-Olea, Rafael; Sánchez-Beristain, Francisco; Palafox-Reyes, Juan José; Buitrón-Sánchez, Blanca Estela.

Colecciones paleontológicas y museografía

PÁGINA / PAGES	ARTÍCULOS – ARTICLES
45	Sistematización de la Colección Paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur. Morales Ortega, Priscila; Hernández Cisneros, Atzcalli Ehécatl.

Micropaleontología

PÁGINA / PAGES	ARTÍCULOS – ARTICLES
63	Extracción de foraminíferos: Aporte metodológico de muestras de canal derivadas de pozos petroleros. Méndez-Berlanga, Wendy J.; Silva Martínez, Luis Encarnación; Arellano-Gil, Javier; Gutiérrez-Alejandro, Alejandra G.; Chacón-Baca, Elizabeth.

DATOS DEL PRESENTE NÚMERO – DATA OF THIS NUMBER

Título: Paleontología Mexicana

ISSN-L: 0543-7652

(revista electrónica): 2007-5189

ISSN (revista impresa): 0185-478X

Número de reserva: 04-2022-072810185500-102

Tipo de publicación: Periódica

Periodicidad: Semestral

Número de publicación: Volumen 14 Número 1

Fecha de publicación: Enero de 2025 (finales)

Año de inicio de la publicación: 1954

Materia de la publicación: 550 (Ciencias de la Tierra)

Editada por: Unidad Editorial del Instituto de Geología de la UNAM

Domicilio: Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, 04360, Coyoacán, CDMX. (México)

Tiraje: No aplica

Tipo de impresión: No aplica

Gramaje: No aplica

Tipo de papel: No aplica

AGRADECIMIENTOS – ACKNOWLEDGEMENTS

El jefe editorial agradece a la M. en C. Sandra Ramos Amézquita y al M. en C. León Felipe Álvarez Sánchez por su trabajo editorial realizado en el volumen 14(1). También agradece al Mtro. Alejandro Silva por su apoyo como técnico-ingeniero en el ojs3.

DECLARATORIAS – STATEMENTS

Declaratoria de Acceso Abierto

Paleontología Mexicana (PM) provee acceso abierto a todos sus contenidos para la labor académica. Todo el contenido de la revista, desde el inicio de publicación de la revista (1954) hasta la actual fecha, se encuentra publicado en acceso abierto por PM. No existe cargo alguno a los autores y lectores por publicar o descargar el material publicado para fines académicos. De esta forma, PM está bajo el modelo acceso abierto dorado. El acceso a los contenidos de PM es libre en todo momento y sin restricciones. Paleontología Mexicana depende del apoyo financiero del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, del apoyo de la Unidad Editorial del Instituto de Geología, de su comité editorial y su padrón de revisores expertos.



Creative Commons License CC-BY-NC-ND

Paleontología Mexicana (PM) sigue las líneas de la organización Creative Commons. El usuario de PM está en libertad de:

- Copiar, compartir y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Bajo los siguientes términos:
- Atribución —Usted debe dar el crédito apropiado, proveer un vínculo a la licencia, e indicar si se hicieron cambios. Lo puede hacer en cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o a su uso.
- No comercial — No puede usted usar el material para propósitos comerciales.
- Sin restricciones adicionales—Usted no puede aplicar términos legales medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier otra cosa que la licencia permite.
- Sin Derivados —Si usted hace un remix, transforma, o reconstruye el material, entonces usted no puede distribuir el material modificado.

Avisos:

- No se dan garantías. Es posible que la licencia no le proporcione todos los permisos necesarios para su uso previsto. Por ejemplo, otros derechos como la publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar el uso del material.
- Usted no tiene que cumplir con la licencia para elementos del material de dominio público o donde su uso está permitido por una excepción o limitación aplicable.

Sobre derechos de autor (copyright) y de publicación

Paleontología Mexicana permite a los autores mantener los derechos de autor sobre el material incluido en sus contribuciones (a menos que existan demandas legítimas de terceros) y retener los derechos de publicación sin restricciones, con la condición de citar de forma precisa la fuente exacta de PM para así respetar los derechos de autor.



DORA: Declaración de San Francisco sobre la evaluación de la Investigación.

Paleontología Mexicana se adhiere como firmante a la Declaración de San Francisco sobre la Evaluación de la Investigación (San Francisco Declaration on Research Assessment, DORA). Ver la siguiente liga: <https://sfedora.org/read/es>

Open Access Statement

Paleontología Mexicana (PM) provides open access to all the articles that it publishes. All the content of the journal, from the beginning of publication of the journal (1954) to the current date, is published in open access. There is no charge to authors and readers for publishing or downloading the published material for academic purposes. In this way, PM is under the golden open access model. Access to PM content is free at all times and without restrictions. PM depends on the financial support of the Institute of Geology of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), on the editorial support of the Department of publications of the Institute of Geology, UNAM, on its editorial committee and its list of expert reviewers.



Creative Commons License CC-BY-NC-ND

Paleontología Mexicana follows the Creative Commons lines. You are free to:

- Share —copy and redistribute the material in any medium or format

Under the following terms:

- Attribution —You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.
- Non-Commercial —You may not use the material for commercial purposes.
- No additional restrictions —You may not apply legal terms or technological measures that legally restrict others from doing anything the license permits.
- No Derivatives —If you transform, remix or build upon the material, you may not distribute the modified material.

Notices:

- No warranties are given. The license may not give you all of the permissions necessary for your intended use. For example, other rights such as publicity, privacy, or moral rights may limit how you use the material.
- You do not have to comply with the license for elements of the material in the public domain or where your use is permitted by an applicable exception or limitation.

Concerning copyright and publishing rights

Paleontología Mexicana allows all authors to hold the copyright of the material included in their contributions (provided that no rightful claims can be raised by a third party) and to retain publishing rights, without restrictions. The authors are required to cite the original source of such material within Paleontología Mexicana.














DORA: San Francisco Declaration on Research Assessment.

Paleontología Mexicana adheres as a signatory to the San Francisco Declaration on Research Assessment (DORA). Please see the link: <https://sfedora.org/read/>

An ornithopod trackway from the Albian-Turonian Arcurquina Formation, Arequipa, Peru, and its paleoecological implications

Un rastro de ornitópodo, del Albiano-Turoniano de la Formación Arcurquina, Arequipa, Perú, y sus implicaciones paleoecológicas

Guillermo-Ochoa, Angel A.¹; Zevallos-Valdivia, Leonardo M.¹; Castro-Eguiluz, Camila¹; Garcia-Flores, Vilma¹; Martinez, Jean-Noël²; Silupú-Cárdenas, Omar Alfredo²; Sánchez-Alva, Claudia Isabel²; Epiquien-Llaja, José Luis²; Pintado-Abarca, Thalía del Pilar²; Delgado-Quiroz, Lizbeth Mariana³; Rodríguez-de la Rosa, Rubén A.^{3,*}

¹Laboratorio de Paleontología, Facultad de Geología Geofísica y Minas. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, esquina Avenida Independencia con calle Paucarpata S/N, Arequipa, Perú.

²Instituto de Paleontología, Universidad Nacional de Piura, Campus Universitario, Urbanización Miraflores, Castilla, Piura, Perú.

³Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Calzada Solidaridad, esq. Paseo de la Bufa S/N, Campus II, C.P. 98060, Zacatecas, Mexico.

* rubenrodriguezr@uaz.edu.mx

Abstract

Tracks and trackways of swimming ornithopod dinosaurs are rather rare in the ichnological record; in this paper, a short trackway of a small ornithopod dinosaur is described from Albian-Turonian sediments of the Arcurquina Formation, at Yura District, southern Peru. According to the age and overall footprint morphology, a basal member of Iguanodontia is proposed as the potential trackmaker. The trackway consists of three consecutive tridactyl and mesaxononic footprints, preserved as concave impressions or negative epichnia. The first footprint preserves impressions of digits II to IV with a very low angle of total divarication (7.5°). The second footprint preserves a half-moon shaped plantar impression, with no traces of digits II and IV; however, digit III is observed as an elongate and narrow impression, bearing an acuminate end and a proximal subcircular impression; a sediment mound, behind the impression of digit III is preserved as well. The third footprint preserves the whole impression of digit III, while digits II and IV preserve their most distal ends as sub-triangular impressions. The second step is shortest; this characteristic, as well as the different morphology of the three footprints, can be explained by a scenario in which a small ornithopod dinosaur was in underwater locomotion; however, the action of the waves influenced the locomotion of the producer of the footprints. This finding represents an important addition to the ichnological record of dinosaurs in Peru.

Keywords: Arcurquina Formation, Ornithopoda, Peru, subaqueous locomotion, Yura.

Resumen

Huellas y rastros de dinosaurios ornitópodos nadando son raros en el registro icnológico; en esta publicación, el rastro corto de un dinosaurio ornitópodo pequeño, es descrito de sedimentos del Albiano-Turoniano, de la Formación Arcurquina, en el Distrito de Yura, al sur de Perú. De acuerdo con la edad y a la morfología general de las huellas, un miembro basal de Iguanodontia es propuesto como el productor potencial de las huellas. El rastro se conforma por tres huellas consecutivas; estas son tridáctilas, mesaxónicas y se conservan como impresiones cóncavas, o epichnia negativa. La primera huella conserva impresiones de los dígitos II al IV con un ángulo de divergencia total muy bajo, de tan sólo 7.5°. La segunda huella conserva una zona plantar en forma de medialuna e impresiones de los dígitos II y IV ausentes; sin embargo,

Cómo citar / How to cite: Guillermo-Ochoa, A. A., Zevallos-Valdivia, L. M., Castro-Eguiluz, C., Garcia-Flores, V., Martinez, J.-., Silupú-Cárdenas, O. A., Sánchez-Alva, C. I., Epiquien-Llaja, J. L., Pintado-Abarca, T. del P., Delgado-Quiroz, L. M., & Rodríguez-de la Rosa, R. A. (2025). An ornithopod trackway from the Albian-Turonian Arcurquina Formation, Arequipa, Peru, and its paleoecological implications. *Paleontología Mexicana*, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2025.14.1.388>

Manuscrito recibido: Octubre 10, 2024.

Manuscrito corregido: Diciembre 11, 2024.

Manuscrito aceptado: Diciembre 16, 2024.



<https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2025.14.1.388>

está presente la impresión, alargada y estrecha del dígito III, con una impresión distal acuminada y una proximal de contorno sub-circular; un montículo de sedimento se encuentra conservado detrás de la impresión del dígito III. La tercera huella conserva una impresión sub-oval, alargada, del dígito III; mientras que los dígitos II y IV conservan impresiones de su parte más distal, con un contorno sub-triangular. El segundo paso se vuelve más corto; esta característica, así como la morfología diferente de las tres huellas, pueden ser explicadas por un escenario en el que un dinosaurio ornitópodo pequeño se encontraba en locomoción subacuática, no obstante, la acción de las olas influyó en la locomoción del productor de las huellas. Este hallazgo representa una adición importante al registro icnológico de dinosaurios en Perú.

Palabras clave: Formación Arcurquina, locomoción subacuática, Ornithopoda, Perú, Yura.

1. Introduction

The vertebrate footprint record from the Mesozoic of Peru includes supposed dinosaur footprints from the Late Cretaceous sediments of the “Couches Rouges” Formation, in the Cusco Region (Gregory, 1916; Leonardi, 1994; Noblet *et al.*, 1987, 1995). However, Lockley *et al.* (1999) considered that the footprint-bearing layers were Paleogene in age; thus, the footprints were produced by notungulate and/or litoptern mammals (Lockley *et al.*, 1999). The other non-dinosaurian footprint record, known to date, from the Mesozoic of Peru, are footprints related to the ichnogenus *Brachychirotherium*; these footprints came from Upper Triassic sandstones of the Sarayaquillo Formation in central Peru (Salas-Gismondi and Chalcaltana, 2010).

In regard to dinosaur footprints, an early report includes theropod and sauropod footprints that were discovered in a point on the road between Huacamochal and Usquil, at La Libertad Region (Trotter, 1964). Jailard *et al.* (1993) reported Upper Cretaceous theropod and ornithopod footprints from the Vilquechico Group, Vilque Chico District, Huanané Province, Puno Region. In 2016, Jaimes *et al.* reported a short trackway of a purported theropod dinosaur, also from the Vilquechico Formation (Jaimes *et al.*, 2016). Large-sized dinosaur footprints were reported from the Lower Cretaceous Carhuaz Formation at the Conococha-Antamina road (Obata *et al.*, 2006); these footprints were also commented on by Arce (2002). One of the best known tracksites from Peru, is located close to the town of Querulpa Chico and 70 km in

the northwest of the city of Arequipa, southern Peru. This site preserves 11 trackways belonging to large and small-sized theropod dinosaurs in sediments interpreted as Lower Cretaceous beds of the Hualhuani Formation (Moreno *et al.*, 2004, 2012); however, assigned by local geologists to the Late Jurassic Gramadal Formation. This tracksite was discovered in 2002 and a thematic touristic park has been created around the site.

Recently, a short trackway of an ornithopod dinosaur was found in the Albian-Turonian strata of the Arcurquina Formation, at Yura District, in the Province and Region of Arequipa (Figure 1). The footprint morphology suggests a basal member of Iguanodontia in a subaqueous locomotion. It represents the first record of dinosaur footprints in the Arcurquina Formation, Yura District, southern Peru. To report this trackway and its paleoecological implications is the main purpose of this paper.

2. Material and methods

The trackway is preserved in a relatively small outcrop, 2.48 m by 1.40 m; the surface was cleaned manually with brushes. Measurements were taken from the trackway, with a measure tape and a protractor. Divarication angles were measured between the longitudinal axes of the digits. As an additional record of the trackway, footprints were drawn in a plastic sheet with permanent ink markers. Photographs were taken with a Flexacam C5-Leica camera and a Sony Cyber-shot, DSC-WX60 camera.

Ornithopod trackway from Peru

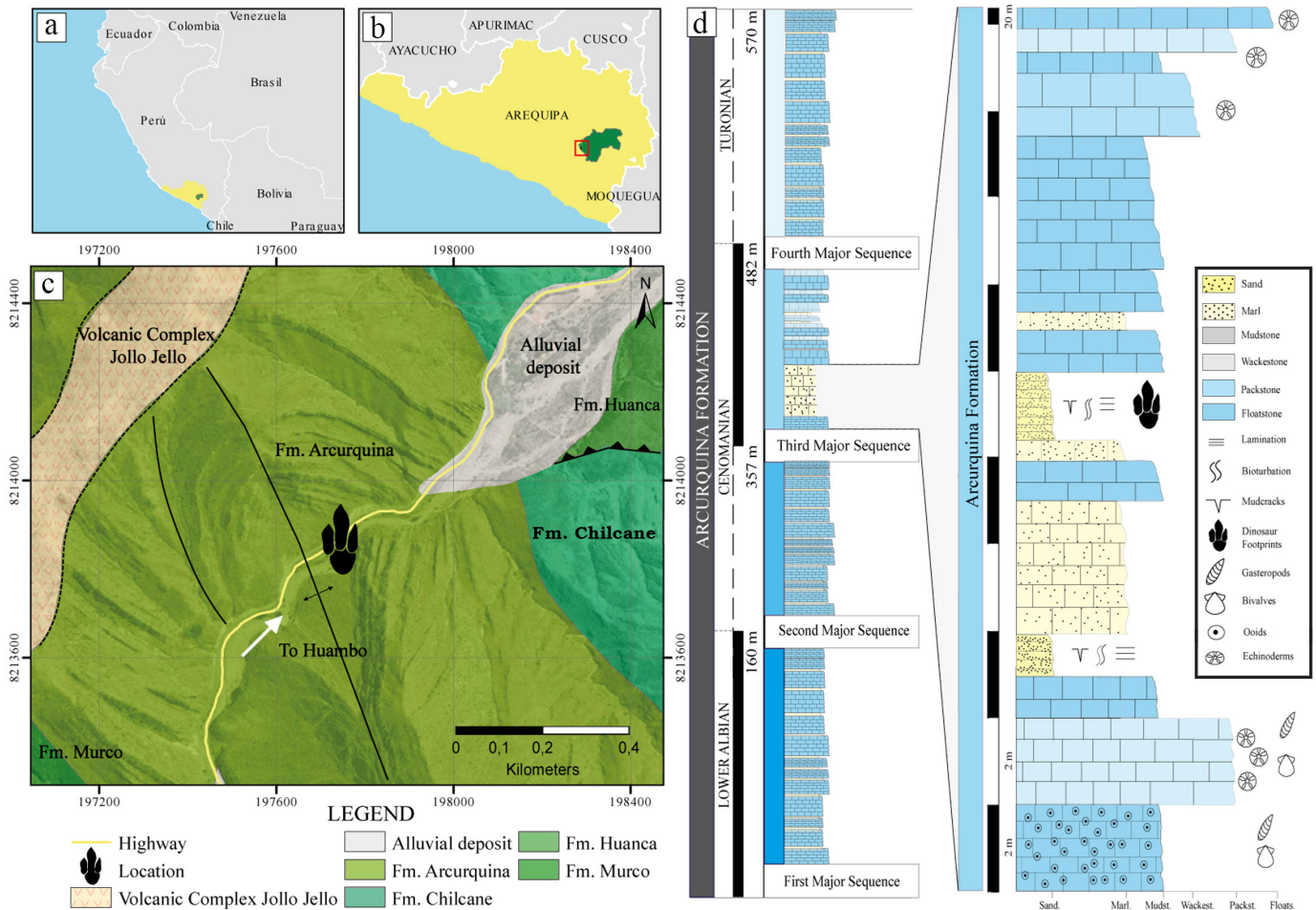


Figure 1. a-b, Location of the studied area, Yura-Arequipa district, southern Peru. c, Geological map and location of the outcrop. d, Stratigraphic section.

3. Geological setting

The Arcurquina Formation represents the Albian-Turonian sedimentation in southern Peru, in the regions of Arequipa and Moquegua (Figure 1). In the Yura Basin (Arequipa), it has a thickness of 600 m. Four third order sequences (in terms of sequence stratigraphy) can be recognized in the Arcurquina Formation (Jaillard, 1995). The outcrop consists of a carbonate succession with intermittent detrital and silt-clay episodes (Figure 1d). A stratigraphic correlation with the historical column of Jaillard (1995), suggests that the trackway-bearing outcrop corresponds to sandy beds at the beginning of the third sequence, which are Cenomanian age based on the invertebrate assemblage (Benavides, 1962). The sedimentary environments recorded indicate a shallow to outer carbonate platform, with

some lagoon beds and sandy bodies (Jaillard, 1995). The sedimentary facies interpretation corresponding to the third sequence indicates middle to outer ramp facies, interbedded with stratigraphic levels interpreted as tidal flats. The studied trackway is located on a tidal flat level. This layer is composed of coarse to medium-grained sand, with grey and reddish colors due to oxidized allochthonous clasts. It is located at the top of a 3 m small sequence interpreted as tidal flat beds. Mud-cracks sedimentary structures, gypsum crystals and horizontal laminations, are features of this fining upwards sandy sequence. Asymmetric and eroded ripples in the sediment surface (Figure 2a-b) suggests local wave reworking.

In thin section this layer has a lithic composition (quartz 30%, plagioclases 15%, lithic fragments 45%) with a matrix of similar composition (lithic, quartz and chert fragments)

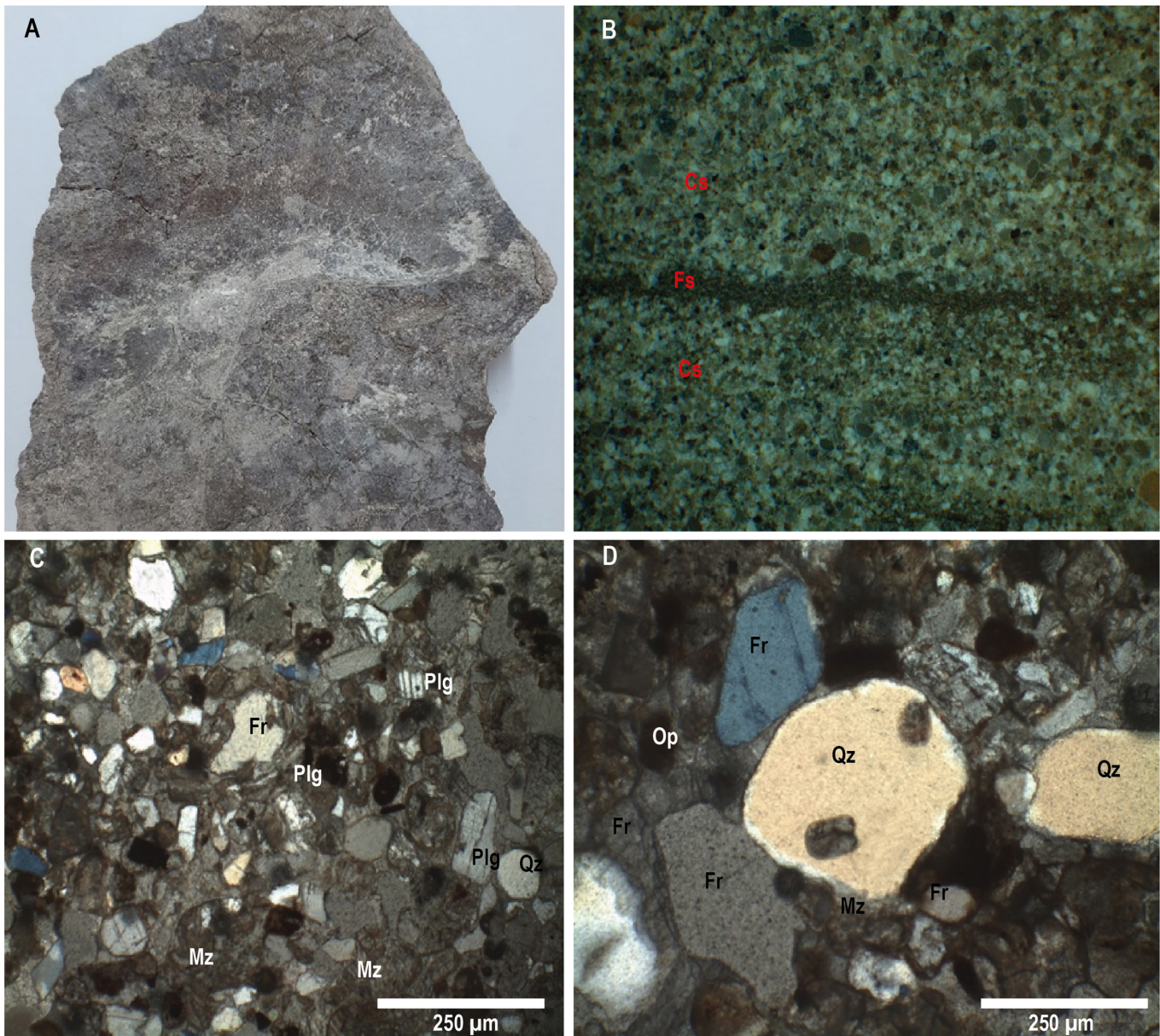


Figure 2. a, Hand sample of the track-bearing sandy bed with eroded surface. b, View under stereomicroscope (7.5 X) showing detrital interbedded layers, Cs (coarse sand) and Fs (fine sand). c, Thin section under crossed polars petrographic microscope showing detrital components in Fs layer. d, Thin section under crossed polars petrographic microscope showing detrital components in Cs layer. (Qz = Quartz, Fr = Lithic components, Plg = Plagioclase, Op = Opaque minerals, Mz = Matrix components).

and carbonate and siliceous cement (Figure 2c-d). A poorly sorting, low sphericity of grains and reworking ripples can be observed and indicate that these beds represent intertidal environments.

4. Description of the trackway

The reported trackway is conformed by three consecutive footprints preserved in a

relatively small outcrop (Figure 3a), two rights and one left; these are preserved as concave impressions, negative epichnia (Figure 3b). Footprints are tridactyl and mesaxonic; however, these show morphological differences, related to the mode of locomotion and the way that the autopodium interacted with the sediment (Figure 3c). The first footprint in the trackway is a right one (Figure 4a); it bears a relatively wide plantar area, with a subcircular heel contour. Its maximum length and

Ornithopod trackway from Peru

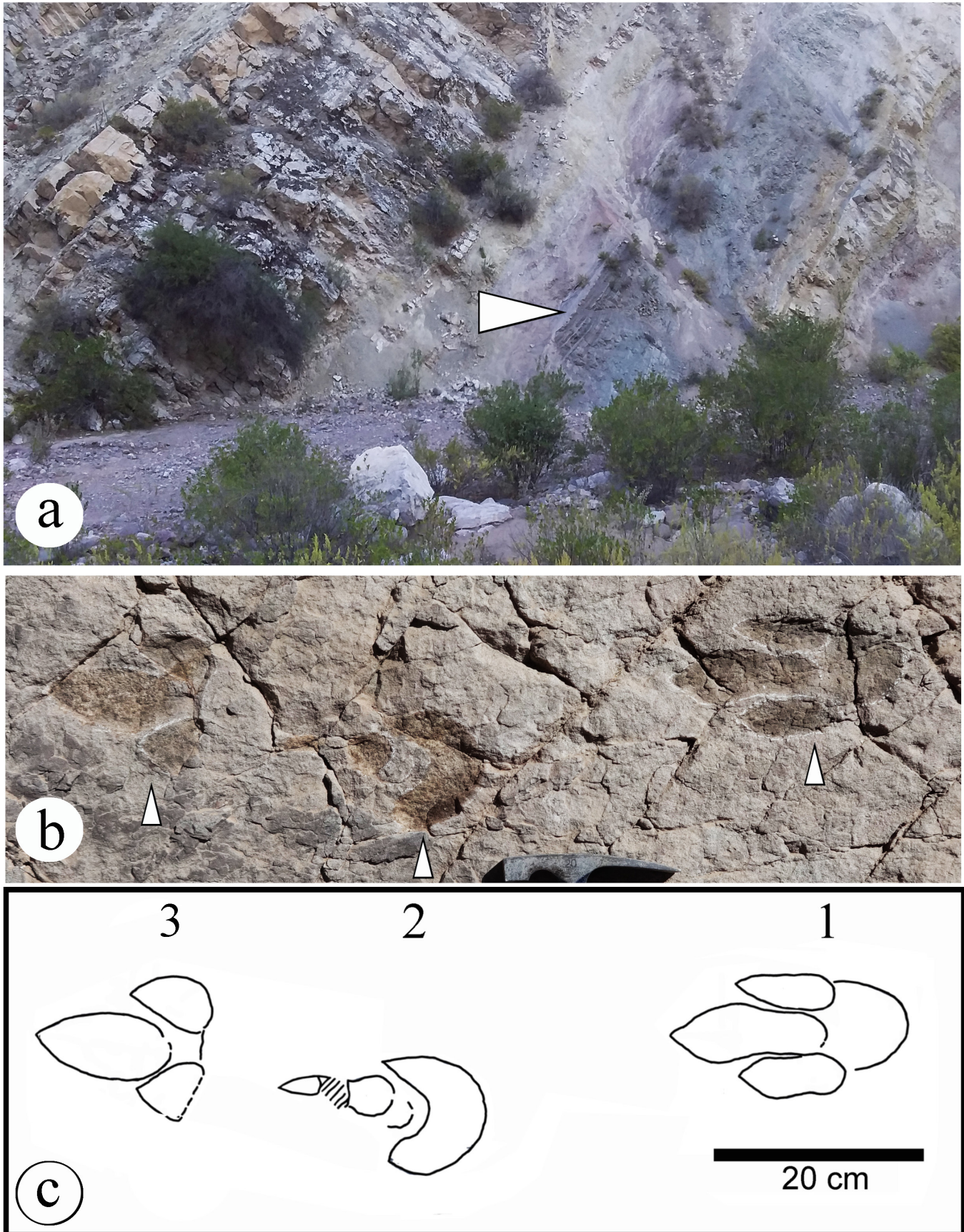


Figure 3. a, Partial panoramic view of the Albian–Cenomanian sediments of the Arcurquina Formation, at Yura District; the white arrowhead points to the stratigraphic level preserving the dinosaur trackway. b, Ornithopod trackway from the Arcurquina Formation; arrowheads point to each of the three footprints, the first footprint in the right of the photo represents a right one. c, Schematic drawing of the trackway.

width are 23.8 cm and 12.9 cm, respectively. The plantar area is 8.4 cm in length, measured from the posterior area of digit III to the most posterior border of the heel. Digit II has a sub-oval contour, with a rounded proximal end and an acuminate distal end, suggesting the presence of a subtriangular claw. It is 11.0 cm in length and 3.9 cm in maximum width. Digit III bears a conspicuous morphology, with a pyriform-elongate contour, being narrow proximally and wider distally (Figure 4a); it preserves a subcircular proximal border and, distally, a sub-triangular claw impression, 2.0 cm in width, at its base, and 1.4 cm in antero-posterior length. Digit III is 15.4 cm in total length, 4.2 cm in proximal width and 5.6 cm at its widest portion. Digit IV has morphological similarities with digit II; it is sub-oval and elongated, with a rounded proximal end and a distal acuminate end, suggesting the presence of a subtriangular claw. It is 10.2 cm in length and 3.5 cm in maximum width. The angles of divarication between digits, measured from their tips to the heel are 12.5° between digits II and III, and 13.5° between digits III and IV; in this way, the total angle of divarication is 26°. However, the total angle of divarication, measured between the longitudinal axes of digits II and IV, is only 7.5°; it is an important fact that will be discussed later.

The second footprint is a left one (Figure 4b); its morphology varies drastically from the previous right footprint. The plantar area is preserved as a half-moon shaped impression whose apexes represent the contact points with digits II and IV. The total length of this footprint is 21.3 cm and 11.9 cm in maximum width. The plantar area is 9.6 cm, measured from the anterior border (contact with digit III) to the posterior border of the heel. Impressions of digits II and IV are absent. Digit III is elongate, preserved as a “scratch impression”, with a rounded proximal impression, and a distal acuminate end; digit III preserves, as well, a sediment mound of displacement, between its posterior border and the anterior border of the plantar impression (Figure 4b, white arrowhead).

The third footprint, is a right one (Figure 4c), it is tridactyl and mesaxonic; it preserves the whole impression of digit III, and digits II and IV preserve just their distal parts; the wide plantar area observed in previous footprints is absent on this one. This footprint is 16.3 cm in length and 14.2 cm in width, as preserved. Digit III is elongate and suboval in outline, with a roughly acuminate distal end; it is 13.6 cm in length and 7.0 cm at its widest portion. The distal end of the digit II is subtriangular in outline; it is 6.0 cm in length and 6.0 cm at its widest portion. The distal end of the digit IV is pyriform in outline; it is 8.1 cm in length and 4.6 cm at its widest portion. The angle of divarication is 7° between digits II and III, and 10° between digits III and IV; thus, the total angle of divarication (II-IV) is 17°.

The preserved trackway parameters include steps (measured tip to tip of digit III), stride and pace angulation. The step between the first and the second footprint is 34.5 cm. The step between the second and the third footprint is 24.5 cm. The stride measures 63.8 cm (measured between the tips of digit III, of the first and last footprints). The pace angulation is 151°.

5. Discussion

The general morphological features of these footprints suggest that they were produced by the same type of dinosaur; digit III, in particular, is preserved in the first and third footprints, it is suboval and elongated, with a conspicuous robustness (Figure 4); thus, it is suggested that the footprints were produced by the same individual. The presence of a wide plantar area, as well as parallel sided to slightly tapered toes, suggests an ornithopod trackmaker (Thulborn, 1990; Lockley, 1991); according to the age and overall morphology of these footprints, a basal member of Iguanodontia is proposed as the potential trackmaker.

The general morphology of the second footprint (Figure 4b) recalls, somewhat, that of *Limayichnus major* (Calvo, 1991). In this

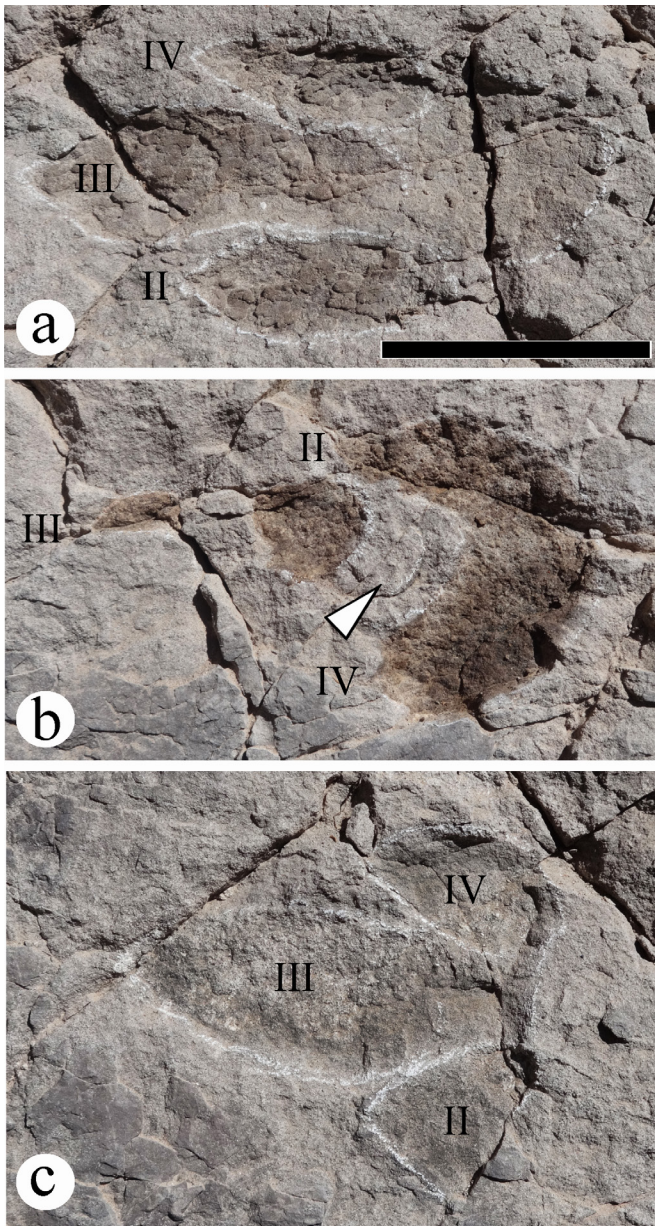


Figure 4. Close up of the footprints of the Yura ornithopod trackway. a, right footprint, the first in the trackway, note the wide plantar area, as well as the subtriangular claw impression of digit III, and acuminate ends of digits II and IV; b, left footprint, the second in the trackway, note that digit III is preserved as a “scratch mark” with a subcircular proximal impression and a sediment mound of displacement is preserved as well (white arrowhead); c, right footprint, the third in the trackway, note the complete impression of digit III and distal impressions of digits II and IV; Roman numerals indicate digit numbers. Scale in a represents 10 cm and also applies to b and c.

ichnotaxon, digits II and IV diverge slightly from digit III, at an angle of 25° or less; also, the impression of digit III is oval in shape and separated from the heel impression. As described by Calvo (1991), digits II and

IV fuse with the plantar impression, forming a U-shaped structure/impression (Calvo, 1991). A similar configuration is observed in the second footprint from the Yura trackway; however, it lacks the II and IV digit impressions, thus given the half-moon appearance above mentioned. Indeed, *Limayichnus major* has been related to Iguanodontidae, as well (Calvo, 1991; Calvo and Rivera, 2018). On the basis of the present evidence, no additional ichnotaxonomical assignation is purported for the Yura trackway.

Although each footprint, in the Yura trackway, preserves different morphological traits (Figure 4), the overall morphological features of the footprints are suggestive of an organism in a subaqueous locomotion, as it is explained below. To date, most of the reported non-avian dinosaur swimming traces preserve parallel digit impressions, or “scratch marks”; this is a common feature of dinosaur footprints indicating subaqueous locomotion (e.g., Coombs, 1980; Ezquerro *et al.*, 2007; Navarro-Lorbés *et al.*, 2023). As for example, parallel digit traces are a diagnostic feature in the ichnogenus *Characichnos*, an ichnogenus related to subaqueous locomotion (Whyte and Romano, 2001; Milner *et al.*, 2006; Xing *et al.*, 2013). According to Navarro-Lorbés *et al.* (2023), the parallel digit impressions are the result of the, minimal or almost minimal, biomechanical interaction between pes and sediment; this minimal interaction is related to the low influence that it has in the displacement of the animal, being the displacement highly performed by paddling or classical swimming.

As mentioned above, most of the track and trackways of swimming dinosaurs preserve elongate and subparallel digit impressions, ranging from one to, usually, three; also, no trace of the plantar area is preserved. It has been explained by the deepness of the water body crossed by the dinosaur; as the water body got deeper, the dinosaur scratched the bottom with its claws, leaving such subparallel impressions (e.g., Coombs, 1980; Whyte and Romano, 2001; Milner *et al.*, 2006; Ezquerro *et al.*, 2007; Xing *et al.*, 2013; Navarro-Lorbés

et al., 2023). An additional feature, observed in footprints indicating subaqueous locomotion, is that most of these parallel “scratch marks”, were left regularly spaced within a particular trackway, as the organism crossed a water body in calm (*e.g.*, Xing *et al.*, 2013). However, Ezquerro *et al.* (2007) reported an Early Cretaceous swimming dinosaur trackway, from lacustrine nearshore sediments in the Cameros Basin, Spain: the evidence suggests a theropod swimming and scratching the bottom; although the footprints are regularly spaced, amplified asymmetrical walking movements left the right sets of footprints with an inward rotated angle of 40°, in order to maintain direction into a leftward water current (Ezquerro *et al.*, 2007).

In the first footprint of the Yura trackway, the three digits were placed together, almost sub-parallel, with a very low angle of divarication between digits II and IV, just 7.5° (Figure 4a). Thus, it is here assumed that, the almost parallel digit impressions indicate swimming locomotion. In regard to the presence of the plantar impression in the first footprint of the Yura trackway; it is not possible to demonstrate that this footprint is the first one in a trackway of a dinosaur entering in a waterbody; however, it is possible to appreciate the preservation of different footprint morphologies within a single trackway. A similar situation is seen in a Lower Cretaceous tracksite known as “Icnitas-4 tracksite”, at La Rioja, Spain. In this case, the trackway known as EVP12 represents a swimming dinosaur (Perez-Lorente, 2015; Navarro-Lorbés *et al.*, 2023). Although this trackway is composed of five footprints, the morphology of the first one suggests it was made by terrestrial locomotion. However, the second and third footprints (EVP12.2 and EVP12.3; Perez-Lorente, 2015), have elongated and roughly parallel toe impressions, interpreted as the product of the foot slipping in the mud (Perez-Lorente, 2015; Navarro-Lorbés *et al.*, 2023); particularly, the third footprint preserves three elongated digit impressions not convergent in the proximal area (Perez-Lorente, 2015). The explanation of

the morphological differences among the footprints from Spain, is that the organism, in this case a dinosaur, entered a water body, from a shallow area to a deeper area (Pieńkowski and Gierliński, 1987; Perez-Lorente, 2015; Navarro-Lorbés *et al.*, 2023).

The second and third footprints of the Yura trackway preserve morphological traits that clearly indicate a swimming locomotion; as mentioned above, the plantar impression in the second footprint is observed as a half-moon structure (Figure 4b); it lacks the impressions of digits II and IV. However, digit III is observed as an elongate and narrow impression, bearing an acuminate distal end and a proximal subcircular impression; a sediment mound, between the impression of digit III and the anterior border of the plantar impression, is preserved as well (Figure 4b, white arrowhead). In this case, it is possible to appreciate that the plantar impression together with digit III participated in the propulsion of the organism.

Structures such as sediment mounds behind digit impressions indicating propulsion have been observed in swimming ornithopod footprints from the Lower Cretaceous Yanguoxia tracksite in China (Fujita *et al.*, 2012: fig. 7e) and from the Lower Cretaceous “Icnitas-4 tracksite”, in Spain; in this later case, the left footprint EVP12.5, from the EVP12 trackway, preserves a large rounded mound of sediment, just behind the toe impressions (Perez-Lorente, 2015: fig. 3.105; Navarro-Lorbés *et al.*, 2023).

The third footprint of the Yura trackway preserves subtriangular impressions, antero-posteriorly short, of the tips of digits II and IV, and a complete impression of digit III (Figure 4c). The overall morphology of this footprint suggests that propulsion was given by digit III and distal portions of digits II and IV. The morphology of this third footprint recalls the footprint morphology of small ornithopods from the famous Cretaceous (Albian-Cenomanian) Lark Quarry tracksite, in the Winton Formation, Queensland, Australia (Romilio *et al.*, 2013; Thulborn, 2016). Some of these

ornithopod footprints preserve a prominent digit III, while digits II and IV are observed as sub-triangular impressions; it has been suggested that these footprints were left by swimming ornithopods (Thulborn, 2016: fig. 3).

Among saurischian dinosaurs, swimming traces are well known for theropods (Milner *et al.*, 2006; Whyte and Romano, 2001; Milner and Lockley, 2016). Although questioned by some authors (e.g., Vila *et al.*, 2005; Ishigaki and Matsumoto, 2009; Falkingham *et al.*, 2011, 2012), manus-only and manus-dominated trackways have been associated with swimming sauropods (Bird, 1944; Ishigaki, 1989; Demathieu *et al.*, 2002; Farlow *et al.*, 2019). Tracks and trackways of swimming ornithopod dinosaurs are rather rare in the ichnological record; for example, manus-only trackways attributed to swimming thyreophorans have

been reported for ankylosaurids (Riguetti *et al.*, 2021) and suggested for stegosaurians (Romano and Whyte, 2015). In regard to large tracks and trackways of swimming ornithopods, these have been reported by Fujita *et al.* (2012) and Moklestad *et al.* (2018); and those of small swimming ornithopods have been reported by Lockley and Foster (2006) and Romilio *et al.* (2013).

The parameters of the trackway are a notable feature, the step between the first and second footprints is 34.5 cm, the next step between the second and third footprints is shorter, 24.5 cm. The shortening of the second step, as well as the different footprint morphologies in the Yura trackway, could be explained by the scenario of a small ornithopod dinosaur in subaqueous locomotion, however, at the mercy of the waves (Figure 5).



Figure 5. Reconstruction of locomotion behavior of track-maker producer based on the Yura trackway; it represents a small ornithopod, probably a basal member of Iguanodontia, in a subaqueous locomotion being influenced by the waves on the environment. Artwork by one of the authors (RARR), and is based on *Gasparinisaura cincosaltensis*, a basal iguanodontian from the Ceniacion-Santonian of Argentina (Coria and Salgado, 1996).

6. Conclusion

This paper reports the first record of dinosaur footprints in the Albian-Turonian Arcuquina Formation and, indeed, from the Yura District, southern Peru. Additionally, it represents a rare finding of a trackway of a small ornithopod, probably a basal member of Iguanodontia, in a subaqueous locomotion being influenced by the waves on the environment. This record is an important addition to the ichnological record of dinosaurs in Peru.

Acknowledgments

Authors acknowledge the support given by the Facultad de Geología, Geofísica y Minas of the Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. RARR and LMDQ thank for their kind support to Mr. Luis Gregorio García Miranda, also to Universidad Autónoma de Zacatecas and Unidad Académica de Ciencias Biológicas, to M.C. Rosa Gabriela Revelles Hernández, Dr. Hans Hiram Pacheco and Dr. Rubén Ibarra Reyes. LMDQ thanks to Professor Mario Adrián Reyes Santana and Diana Laura Sánchez Domínguez (Ayuntamiento 2021-2024 de Genaro Codina, Zacatecas) for their unvaluable support. There is an implicit “thank you” to the entire Mexico-Piura-Arequipa team. This research work was funded by the National Council of Science, Technology and Technological Innovation (CONCYTEC) and the National Program for Scientific Research and Advanced Studies (PROCIENCIA) within the framework of the contest “E041-2024-03 Basic Research Projects” [number of contract PE501087366-2024].

References

- Arce, S. (2002). Sobre unas ignitas de dinosaurios en la sierra norte del Perú. *Boletín de Lima*, 130, 7–10.
- Benavides, V. (1962). Estratigrafía pre-Terciaria de la región de Arequipa. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 38, 5–63.
- Bird, R. T. (1944). Did *Brontosaurus* ever walk on land?. *Natural History*, 53, 60–67.
- Calvo, J. O. (1991). Huellas fósiles de dinosaurios en la Formación Río Limay (Albiano-Cenomaniano), Picún Leufú, Provincia del Neuquén, Argentina (Ornithischia-Saurischia: Sauropoda-Theropoda). *Ameghiniana*, 28(3–4), 241–258.
- Calvo, J. O., & Rivera, C. (2018). Huellas de dinosaurios en la costa oeste del embalse Ezequiel Ramos Mexía y alrededores (Cretácico Superior, Provincia de Neuquén, República Argentina). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(2), 449–497. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2018v70n2a11>
- Coombs, W. P. (1980). Swimming ability of carnivorous dinosaurs. *Science*, New Series, 207(4436), 1198–1200.
- Coria, R. A., & Salgado, L. (1996). A basal iguanodontian (Ornithischia: Ornithopoda) from the Late Cretaceous of South America. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 16(3), 445–457.
- Demathieu, G., Gand, G., Sciau, J., Freytet, P., & Garric J. (2002). Les traces de pas de dinosaures et autres archosaures du Lias inférieur des Grands Causses, sud de la France. *Palaeovertebrata*, 31, 1–143. <https://doi.org/10.18563/pv.31.1-4.1-143>
- Ezquerro, R., Doublet, S., Costeur, L., Galton, P. M., & Pérez-Lorente, F. (2007). Were non-avian theropod dinosaurs able to swim? Supportive evidence from an Early Cretaceous trackway, Cameros Basin (La Rioja, Spain). *Geology*, 35(6), 507–510. <https://doi.org/10.1130/G23452A>.
- Falkingham, P. L., Bates, K. T., Margetts, L., & Manning, P. L. (2011). Simulating sauropod manus-only trackway formation using finite-element analysis. *Biology Letters*, 7, 142–145.
- Falkingham, P. L., Bates, K. T., & Manning, P. D. (2012). Temporal and palaeoenvironmental distribution of manus- and pes-dominated sauropod trackways. *Journal of the Geological Society, London*, 169(2012), 365–370. <https://doi.org/10.1144/0016-76492011-019>
- Farlow, J. O., Galton, P. M., & Hyatt, J. A. (1919). Dinosaur footprints from Dinosaur State Park (East Berlin Formation, Lower Jurassic, Rocky Hill, Connecticut, USA). *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften/Beiheft*, 46, 27–29.
- Fujita, M., Lee, Y.-N., Azuma, Y., & Li, D. (2012). Unusual tridactyl trackways with tail traces from the Lower Cretaceous Hekou Group, Gansu Province, China. *Palaios*, 27, 560–570. <https://doi.org/10.2110/palo.2012.p12-015r>
- Gregory, H. (1916). Geological reconnaissance of the Cuzco Valley, Peru. *American Journal of Science*, 4th Series, 2, p. 241.
- Ishigaki, S. (1989). Footprints of swimming sauropods from Morocco. In D. D. Gillette & M. G. Lockley (eds.), *Dinosaur tracks and traces* (pp. 83–86). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ishigaki, S., & Matsumoto, Y. (2009). Re-examination of manus-only and manus-dominated sauropod trackways from Morocco. *Geological Quarterly*, 53(4), 441–448.
- Jaillard, E. (1995). La sedimentación albiata-turoniana en el sur del Perú (Arequipa-Puno-Putina). *Sociedad Geológica del Perú*, Volumen Jubilar Alberto Benavides, 135–157.
- Jaillard, E., Cappetta, H., Ellenberger, P., Feist, M., Grambast-Fessard, N., Lefranc, J. P., & Sigé, B. (1993). Sedimentology, paleontology, biostratigraphy, and correlation of the Late Cretaceous Vilquechico Group of Southern Peru. *Cretaceous Research*, 14, 623–661.
- Jaimes, S. F., Salas-Gismondi, R., Chacaltana, C., & Augusto, C. (2016). Nuevas icnitas de un dinosaurio terópodo del Cretáceo superior en sedimentitas de la Formación Vilquechico, Perú. *XVIII Congreso Peruano de Geología*, 18, 16–19.
- Leonardi, G. (1994). *Annotated Atlas of South America tetrapod footprints (Devonian to Holocene)*. Publication of the Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- Lockley, M. G. (1991). *Tracking Dinosaurs, a new look at an ancient world*. Cambridge University Press.
- Lockley, M. G., Ritts, B. D., & Leonardi, G. (1999). Mammal track assemblages from the Early Tertiary of China, Peru, Europe and North America. *Palaios*, 14, 398–404.
- Lockley, M. G., & Foster, J. R. (2006). Dinosaur and turtle tracks from the Morrison Formation (Upper Jurassic) of Colorado National Monument, with observations on the taxonomy of vertebrate swim tracks. In J. R. Foster & S. G. Lucas (Eds.), *Paleontology and Geology of the Upper Jurassic Morrison Formation* (pp. 193–198). New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 36.

Ornithopod trackway from Peru

- Milner, A. R. C., Lockley, M. G., & Kirkland, J. I. (2006). A large collection of well-preserved theropod dinosaur swim tracks from the Lower Jurassic Moenave Formation, St. George, Utah. In J. D. Harris, S. G. Lucas, J. A. Spielmann, M. G. Lockley, A. R. C. Milner & J. I. Kirkland (Eds.), *The Triassic–Jurassic Terrestrial Transition* (pp. 315–328). New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 37.
- Milner, A. R. C., & Lockley, M. G. (2016). Dinosaur swim track assemblages: characteristics, contexts, and ichnofacies implications. In P. L. Falkingham, D. Marty & A. Richter (Eds.), *Dinosaur tracks: The next steps* (428 pp.). Indiana University Press.
- Moklestad, T., Caneer, T., & Lucas, S. G. (2018). The “lost tracks” at Dinosaur Ridge, Colorado, from the base of the Cretaceous (Late Albian–Early Cenomanian) Mowry Shale Member of the Benton Formation, show a swimming(?) ornithopod affected by a current. In S. G. Lucas & R. M. Sullivan (Eds.), *Fossil Record* (Number 6, pp. 503–511). New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 79.
- Moreno, K., Jacay, J., Chillitupa, L., De la Vera, P., Hone D., & Benton, M. J. (2004). New dinosaur tracksites from Peru: Evidence for a wide distribution of large theropods during the Late Jurassic–Early Cretaceous in South America. ICHNIA, *First International Congress on Ichnology*, Argentina, Museo Paleontológico Egidio Feruglio.
- Moreno, K., De Valais, S., Blanco, N., Tomlinson, A. J., Jacay, J., & Calvo J. O. (2012). Large theropod dinosaur footprint associations in western Gondwana: Behavioural and palaeogeographic implications. *Acta Palaeontologica Polonica*, 57(1), 73–83.
- Navarro-Lorbés, P., Díaz-Martínez, I., Valle-Melón, J. M., Rodríguez-Miranda, A., Moratalla, J. J., Ferrer-Ventura, M., San Juan-Palacios, R., & Torices, A. (2023). Dinosaur swim tracks from the Lower Cretaceous of La Rioja, Spain: An ichnological approach to non-common behaviours. *Cretaceous Research*, 147(2023), 105516. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2023.105516>
- Noblet, C., Marocco, R., & Delfaud, J. (1987). Analyse sédimentologique des “Couches Rouges” du Bassin Intramontagneux de Sicuani (Sud du Pérou). *Bulletin de l’Institut Français d’Études Andines*, 16(1–2), 55–78.
- Noblet, C., Leonardi, G., Taquet, P., Marocco, R., & Cordova, E. (1995). Nouvelle découverte d’empreintes laissées par des Dinosaures dans la Formation des Couches Rouges (bassin de Cuzco-Sicuani, Sud du Pérou): conséquences stratigraphiques et tectoniques. *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, Paris, 320(2), 785–791.
- Obata, I., Gomi, A., Collantes, J., Salas-Gismondi, R., Fujii, N., Kato, S., & Matsukawa, M. (2006). Early Cretaceous dinosaur tracksites newly found in Peru. *Annual Report of the Fukuda Geological Institute*, 7, 29–43.
- Perez-Lorente, F. (2015). *Dinosaur Footprints and Trackways of La Rioja*. Indiana University Press.
- Pieńkowski, G., & Gierliński, G. (1987). New finds of dinosaur footprints in Liassic of the Holy Cross Mountains and its palaeo-environmental background. *Przeegląd Geologiczny*, 4, 199–205.
- Riguetti, F. J., Citton, P., Apesteguía, S., Zacarias, G.G., & Pereda-Suberbiola, X. (2021). New ankylosaurian trackways (cf. *Tetrapodosaurus*) from an uppermost Cretaceous level of the El Molino Formation of Bolivia. *Cretaceous Research*, 124(8), 1–16.
- Romano, M., & Whyte, M. A. (2015). Could stegosaurs swim? Suggestive evidence from the Middle Jurassic tracksite of the Cleveland Basin, Yorkshire, UK. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 60, 227–233. <https://doi.org/10.1144/pygs2015-354>
- Romilio, A., Tucker, R. T., & Salisbury, S. W. (2013). Reevaluation of the Lark Quarry dinosaur tracksite (late Albian–Cenomanian Winton Formation, central-western Queensland, Australia): no longer a stampede?. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 33(1), 102–120.
- Salas-Gismondi, R., & Chacaltana, C. (2010). Huellas de un arcosaurio Triásico en la Formación Sarayaquillo (Cuenca Ene, Perú) y el icnregistro de vertebrados en el Mesozoico del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 104, 41–58.
- Thulborn, R. A. (1990). *Dinosaur tracks*. Chapman Hall.
- Thulborn, T. (2016). Behaviour of dinosaurian track-makers in the Winton Formation (Cretaceous, Albian–Cenomanian) at Lark Quarry, western Queensland, Australia: running or swimming?. *Ichnos: An International Journal for Plant and Animal Tracks*, 24(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/10420940.2015.1129326>
- Trottereau, G. (1964). *Contribution à l’étude des Andes Nord-péruviennes*. [Unpublished PhD thesis] Stratigraphie, Université de Grenoble.
- Vila, B., Oms, O., & Galobart, À. (2005). Manus-only titanosaurid trackway from Fumanya (Maastrichtian, Pyrenees): further evidence for an underprint origin. *Lethaia*, 38, 211–218. <https://doi.org/10.1080/00241160510013312>.
- Whyte, M. A., & Romano, M. (2001) A dinosaur ichnocoenosis from the Middle Jurassic of Yorkshire, UK. *Ichnos: An International Journal for Plant and Animal Tracks*, 8(3–4), 223–234. <https://doi.org/10.1080/10420940109380189>
- Xing, L. D., Lockley, M. G., Zhang, J. P., Milner, A. R. C., Klein, H., Li, D. Q., Persons IV, W. S., & Ebi, J. F., (2013). A new Early Cretaceous dinosaur track assemblage and the first definite non-avian theropod swim trackway from China. *Chinese Science Bulletin*, 58, 2370–2378. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5802-6>.

Ankylosaurians from Coahuila, Mexico

Anquilosaurios de Coahuila, México

Rivera-Sylva, Héctor E.^{1*}; Aguillón-Martínez, Martha C.¹;
Guzmán-Gutiérrez, José Rubén²; Flores-Ventura, José¹

¹Museo del Desierto, Carlos Avedrop Dávila 3745, 25022, Saltillo, Coahuila, Mexico.

²Universidad Humanista de las Américas, Martín de Zavala 510, 64000, Monterrey, Nuevo León, México.

*hrivera@museodeldesierto.org

Abstract

The fossil record of Ankylosauria is well-documented in several regions of the world yet remains relatively scarce in Mexico. Here we report new thyreophoran material from the Late Cretaceous in Coahuila, northeastern Mexico. The specimens, which include isolated osteoderms and partial skeletal elements, contribute to our understanding of the diversity, paleobiogeography, and paleoecology of this dinosaur clade in North America. Morphological comparisons suggest affinities with nodosaurid ankylosaurs, expanding their known range and ecological roles in the region. This discovery highlights the importance of Coahuila as a key locality for studying dinosaur faunas at the southern margin of the Western Interior Seaway.

Keywords: Ankylosauria, Ankylosauridae, Coahuila, diversity, Nodosauridae.

Resumen

El registro fósil de Ankylosauria está bien documentado en varias regiones del mundo, pero sigue siendo relativamente escaso en México. En este trabajo reportamos nuevo material de tireóforos del Cretácico Tardío en Coahuila, noreste de México. Los especímenes, que incluyen osteodermos aislados y elementos esqueléticos parciales, contribuyen a nuestra comprensión de la diversidad, paleobiogeografía y paleoecología de este clado de dinosaurios en América del Norte. Las comparaciones morfológicas sugieren afinidades con anquilosaurios nodosáuridos, ampliando su rango conocido y sus roles ecológicos en la región. Este descubrimiento resalta la importancia de Coahuila como una localidad clave para el estudio de faunas de dinosaurios en el margen sur del Mar Interior Occidental.

Palabras clave: Ankylosauria, Ankylosauridae, Coahuila, diversidad, Nodosauridae.

Cómo citar / How to cite: Rivera-Sylva, H. E., Aguillón-Martínez, M. C., Guzmán-Gutiérrez, J. R., & Flores-Ventura, J. (2025). Ankylosaurians from Coahuila, Mexico. *Paleontología Mexicana*, 14(1), 13–27.

1. Introduction

The monophyletic Ankylosauria (Osborn, 1923) is a clade within Thyreophora which includes Ankylosauridae and Nodosauridae and all taxa more closely related to these dinosaurs than to *Stegosaurus* (Carpenter, 1990), forming together the clade Thyreophora (Nopcsa, 1915), which includes ankylosaurs and stegosaurs and all taxa more closely related to them than to Cerapoda (Ornithopoda + Marginocephalia). They were a very diverse group of thyreophoran dinosaurs characterized by flat and wide skulls with leaf-like teeth, a heavily armored of the skull and body protected by a shield of densely packed osteoderms, a barrel-shaped body, and an obligatory quadrupedal stance (Vickaryous *et al.*, 2004; Carpenter, 2012).

There are two formally distinguished families: Ankylosauridae, and Nodosauridae (Coombs, 1978; Arbour and Currie, 2016). They differ by a number of diagnostic characters identified (*e.g.* in the skull, and teeth), but they are most easily distinguished by the presence (Ankylosauridae) or absence (Nodosauridae) of a distinctive tail club formed by the co-ossification of the caudal-most vertebrae combined with a series of plate-like osteoderms.

The earliest valid members of Ankylosauridae are known from the Middle Jurassic of England and China (Carpenter, 2012). Ankylosaurs have been found on every continent including Africa. The highest diversity of this group is observed during the Late Cretaceous in Asia, North America and Europe. Ankylosaurs are also reported, however to a much lesser degree of diversity from South America, and Antarctica (Arbour and Currie, 2016).

Ankylosaurs are characteristic and abundant components of dinosaur assemblages from the Late Cretaceous of western North America (Laramidia). Campanian strata yield numerous specimens of nodosaurids and ankylosaurids, mostly from the north of the continent. In contrast, the record from the southern part of Laramidia (*e.g.*, Mexico) is

surprisingly scarce (Loewen *et al.*, 2013; Rivera-Sylva and Carpenter, 2014).

Ankylosaur specimens are extremely rare in Upper Cretaceous deposits of Mexico, which contrasts with the rich hadrosaurian assemblages reported from the region (Rivera-Sylva and Carpenter, 2014). Nevertheless, ankylosaur remains have repeatedly been reported from Mexican strata, although most of these are undiagnostic consisting of a few teeth, osteoderms, vertebrae, and long bones (Rivera-Sylva *et al.*, 2011a; Figure 1). To date, *Acantholipan gonzalezi* is the only thyreophoran formally described for Mexico (Rivera-Sylva *et al.*, 2018). The material of ankylosaur remains documented so far, comes from the Zorrillo-Tabernas Indiferenciadas Formation (Bajocian) of Puebla, the Mojado Formation (latest Albian-earliest Cenomanian) of Chihuahua (which is the first report for Mexico of Ankylosaurian tracks), El Gallo Formation (Campanian) of Baja California, the San Carlos Formation (Campanian) of Chihuahua, the Cerro del Pueblo Formation (Campanian) and the Olmos Formation (Campanian-Maastrichtian) of Coahuila (Morris, 1967; Rivera-Sylva and Espinosa-Chávez, 2006; Kappus *et al.*, 2011; Martínez-Díaz and Montellano-Balletes, 2011; Rivera-Sylva *et al.*, 2011a; Rodríguez-de la Rosa *et al.*, 2018; Rivera-Sylva *et al.*, 2019; Rivera-Sylva *et al.*, 2021).

An ankylosaurid femur from the Olmos Formation near Sabinas, Coahuila, was mentioned by Meyer *et al.* (2005), but after a close examination of the specimen we conclude that it does not belong to Ankylosauria but rather represents an unidentified ornithopod.

This paper describes newly discovered material that sheds light on the diversity of ankylosaurs in Mexico, offering a fresh taxonomic perspective. These findings are particularly significant given the scarcity of ankylosaur remains in the region, which has historically limited our understanding of their distribution and diversity. The new material not only provides insights into their morphological variability but also underscores the importance of Mexico as a region for studying

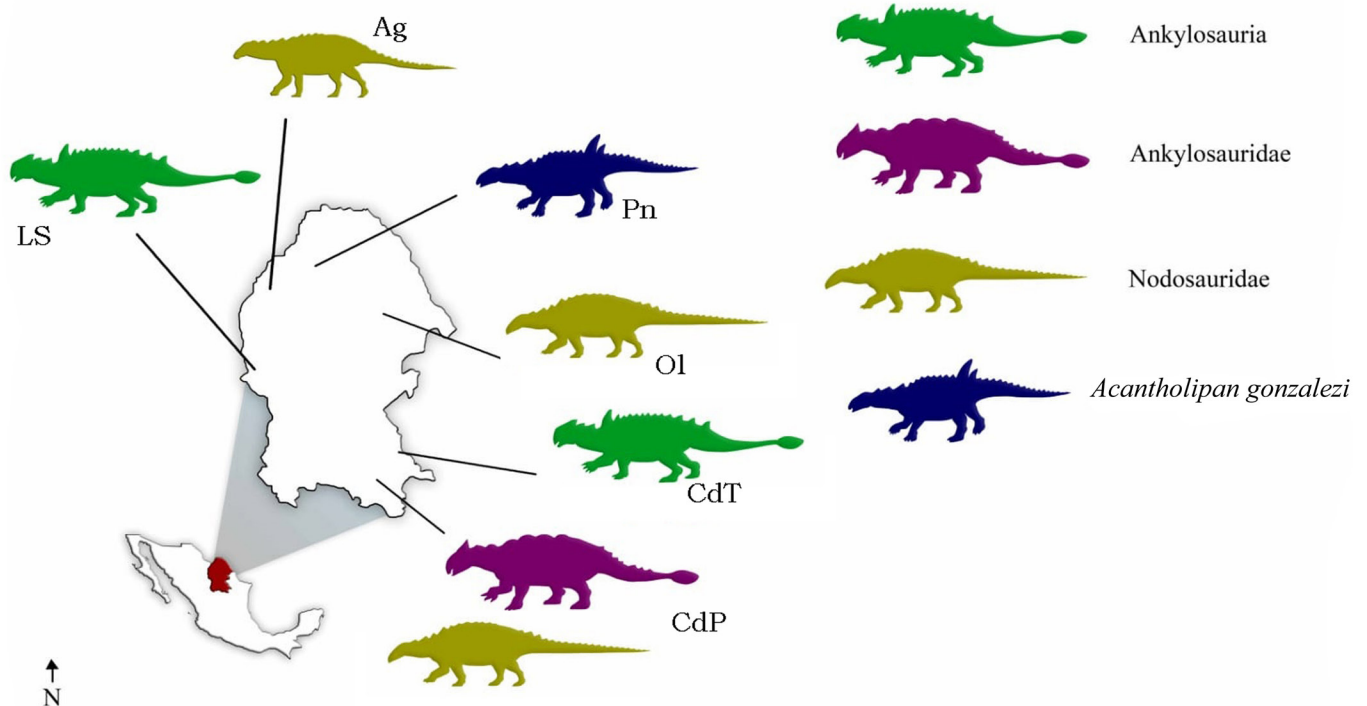


Figure 1. Geological formations of Coahuila that yielded ankylosaurids and nodosaurids remains. Ag) Aguja Formation (Campanian); CdT) Cañón del Tule Formation (Maastrichtian); Pn) Pen Formation (Santonian); LS) La Soledad Beds (Campanian); CdP) Cerro del Pueblo Formation (Campanian); Ol) Olmos Formation (Campanian-Maastrichtian).

ankylosaurs and their broader paleobiogeographic implications.

Abbreviations: CPC = Colección Paleontológica de Coahuila, Museo del Desierto, Mexico; MUDE = Museo del Desierto, Mexico.

2. Material and methods

The material described herein from the southeast of Coahuila was discovered during field seasons between 2000 and 2002. All the material is housed in the Colección Paleontológica de Coahuila at the Museo del Desierto in Saltillo, Coahuila. The exact locality information of each specimen is on file at the Museo del Desierto, Saltillo, Coahuila.

The specimens were measured using a digital caliper, and photographed using a Canon EOS Rebel T2i with a Canon Zoom Lens EF 35-80mm 1:4-5.6 III with filters close ups 1-3, and a Nikon COOLPIX P610 with a lens NIKKOR 60X Wide Optical Zoom ED VR (4.3–258 mm 1:3.3–6.5).

3. Systematic palaeontology

Dinosauria Owen, 1842
 Ornithischia Seeley, 1888
 Thyreophora Nopcsa, 1915
 Euryopoda Sereno, 1986
 Ankylosauria Osborn, 1923
 Ankylosauria indet.

Material. Caudal vertebra (CPC 3045; Figure 2 a–d).

Horizon and locality. Soledad Beds (Campanian-Maastrichtian, Late Cretaceous), 22 km southwest of the town La Esmeralda; municipality of Sierra Mojada, Coahuila, Mexico.

Description. CPC 3045 is a badly weathered centrum with a hexagonal cross-section, and pronounced transverse processes, the latter being completely fused with the mid part of the neurocentral junction. The neural canal is circular in cross-section. Measurements of CPC 3045 in millimetres: length = 70; maximum height = 60; maximum width = 98.

Discussion. The well-developed transverse process suggest that the specimen represents

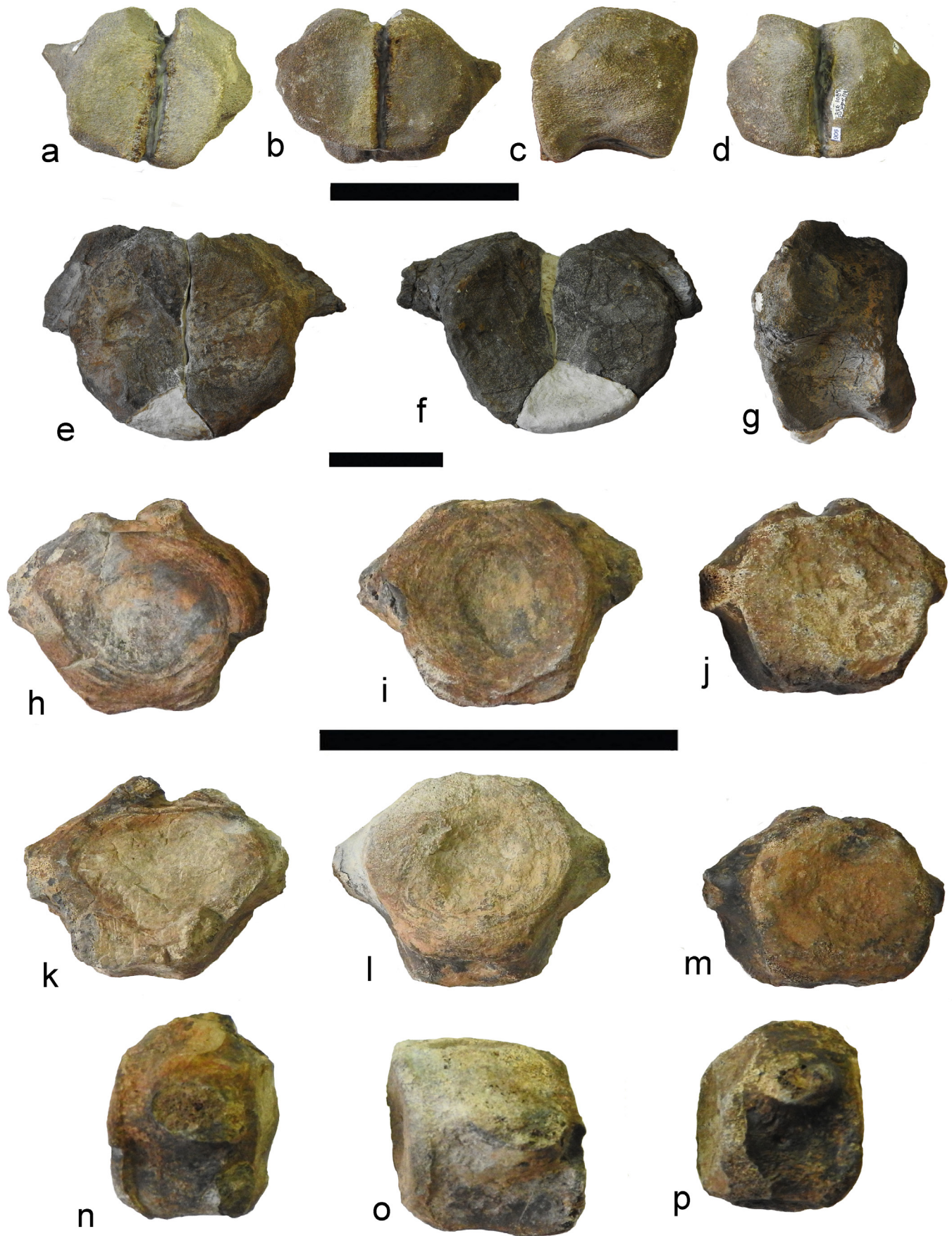


Figure 2. CPC 3045: caudal vertebra in: a) cranial, b) caudal, c) lateral, and d) dorsal views. CPC 3046: caudal vertebra in: e) cranial, f) caudal, and g) lateral views. CPC 3047a: h) cranial, k) caudal, and n) lateral views. CPC 3047b: i) cranial, l) caudal, and o) lateral views. CPC 3047c: j) cranial, m) caudal, and p) lateral views. Scale = 10 cm.

an anterior caudal vertebra of an ankylosaurian (Vickaryous *et al.*, 2004; Arbour, 2009). The specimen was mentioned as an hadrosaur caudal by Rivera-Sylva and Carpenter (2014).

Material. Caudal vertebra (CPC 3046; Figure 2 e–g).

Horizon and locality. Aguja Formation (Campanian, Late Cretaceous), La Salada locality; municipality of Ocampo, Coahuila, Mexico.

Description. CPC 3046 is a badly weathered amphicoelus centrum of a proximal caudal vertebra, with a rounded cross-section, and pronounced transverse processes, the latter being completely fused with the mid part of the neurocentral junction. The neural canal is circular in cross-section. Measurements of CPC 3046 in millimetres: length = 88; maximum height = 178; maximum width = 240.

Discussion. The well-developed transverse process and the rounded outline suggest that the specimen represents an anteriormost caudal vertebra of an ankylosaurian (Vickaryous *et al.*, 2004; Arbour, 2009). The specimen's size aligns with that of a significantly large ankylosaurid, estimated at approximately 7 meters in length, as determined through comparisons with the caudal vertebrae of other ankylosaurians (*e.g.*, *Peloroplites cedrimontanus*) (Carpenter, pers. comm., 2018; Molina-Pérez, pers. comm., 2023; Figure 3).

In 2017, Shiller described a right tibia discovered in the Aguja Formation of northern Coahuila, which is part of a private collection. Consequently, the precision of the measurement could not be verified. Nevertheless, if the measurement is accurate, it may pertain to a significantly large specimen (Molina-Pérez, pers. comm., 2023), consistent with the attributes of CPC 3046.

Material. Caudal vertebrae (CPC 3047, a, b, c; Figure 2 h–p).

Horizon and locality. Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian), Rincón Colorado locality, General Cepeda, Coahuila, Mexico.

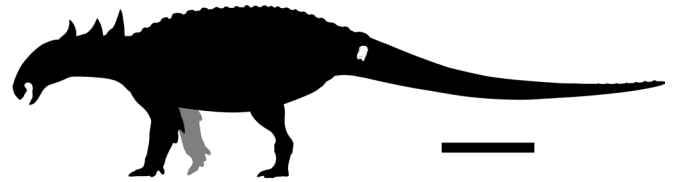


Figure 3. Silhouette of a thyreophoran showing CPC 3046. Scale bar = 1m.

Description. These are three amphicoelus centra of caudal vertebrae. CPC 3047 had a centrum with circular cross-section being as long as is tall, while CPC 3047b and c had centra with a hexagonal cross-section, with its length been half of its height. All three vertebrae had broad bases of transverse processes with oval cross-section, the latter being fused with the mid part of the neurocentral junction. Measurements of CPC 3047a in millimetres: length = 46.1; maximum height = 58.6; maximum width = 72. CPC 3047b: length = 36.9; maximum height = 58.6; maximum width = 65.9. CPC 3047c: length = 37.8; maximum height = 54.4; maximum width = 64.7.

Discussion. The well-developed transverse process and the rounded centrum of CPC 3047a suggest that the specimen represents an anterior caudal vertebra of an ankylosaurian; while CPC 3047 b and c are mid-caudals (Vickaryous *et al.*, 2004; Arbour *et al.*, 2009).

Material. Right metatarsal II (CPC 2975; Figure 4).

Horizon and locality. The specimen come from the Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian), Porvenir de Jalpa locality, General Cepeda, Coahuila, Mexico.

Description. The proximal articulation of the metatarsal is rugose and bulbous, subrectangular, dorsally inclined at an angle of approximately 10°, obliquely oriented relative to the long axis of the shaft, being in consequence the ventral edge longer than the dorsal, and is dorsally smooth, although some parts are weathered. The rugose texture extends distally on the medial side in a ridge to the mid-length of the shaft. The distal condyle extends proximally onto the plantar surface on the medial

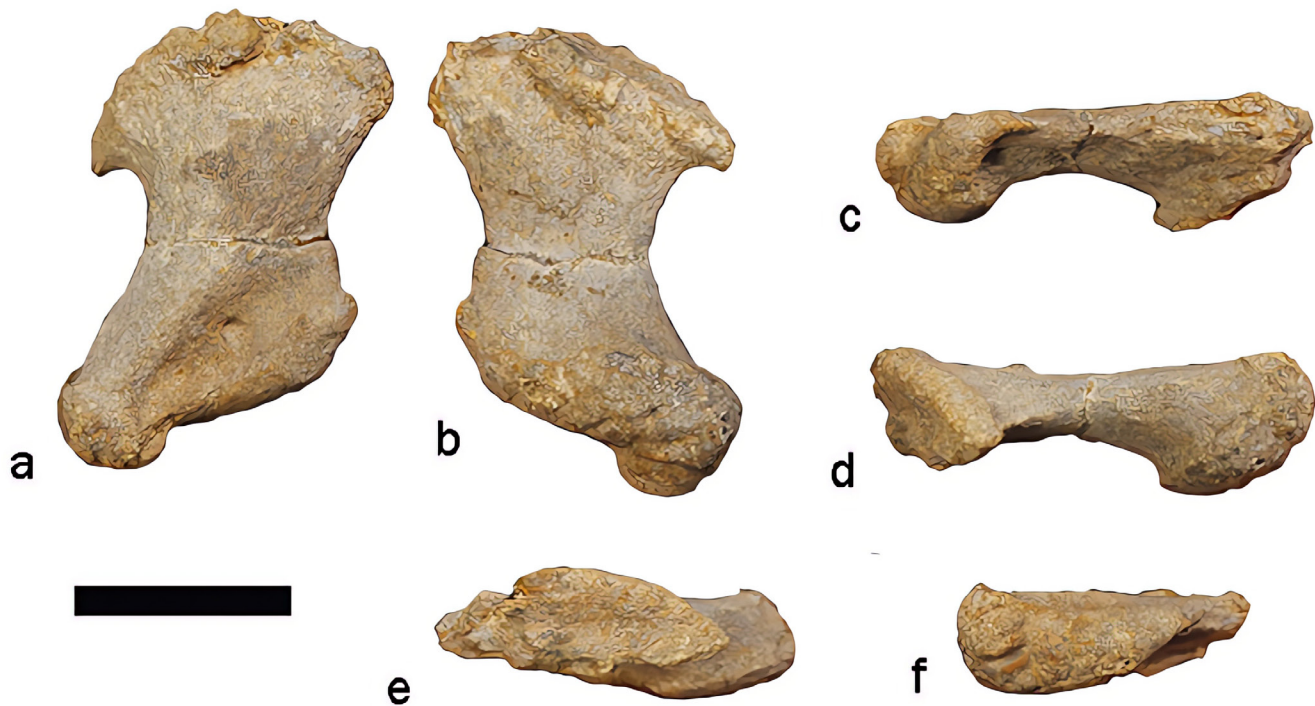


Figure 4. Metatarsal II. CPC 2975, a) dorsal, b) ventral, c) lateral, d) right lateral, e) cranial, and f) caudal views.; scale bar = 5 cm.

and lateral sides. Measurements of CPC 2975 in millimetres: length = 103.5; maximum height = 41.1; maximum width = 68.7.

Discussion. The right metatarsal II CPC 2975 is as described and figure of those of *Niobrarsaurus coleii*, *Europelta carbonensis*, and for the ankylosaur AMNH 5266 (Carpenter *et al.*, 1995; Coombs, 1986; Kirtkland *et al.*, 2013), therefore is unequivocal ankylosaurian.

Material. Phalanges (CPC 3048a, b; Figure 5 p–u).

Horizon and locality. Cañón del Tule Formation (Upper Cretaceous, Maastrichtian), Carolinas locality, Ramos Arizpe, Coahuila, Mexico.

Description. They are anteroposteriorly short. With a shallow articular surface and poorly developed distal condyles. Measurements of CPC 3048a in millimetres: length = 32.4; width = 43.7; maximum height = 21.5. CPC 3048b in millimetres: length = 25; width = 35.8; maximum height = 16.2.

Discussion. The phalanges are similar of those described for *Peloroplites cedrimontanus* (Carpenter *et al.*, 2008).

Material. Unguals (CPC 3049; CPC 3050; CPC 3051; Figure 5 a–l).

Horizon and Locality. Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian), Rincón Colorado locality, General Cepeda, Coahuila, Mexico.

Description. The three unguals are widest at their proximal articulation and taper distally to a blunt tip. CPC 3049 and CPC 3050 are as long as there are wide; CPC 3051 is incomplete but is longer than wide. They are rugose both dorsally and ventrally, and on the ventral surface the neck is tucked, and bounded on either side by a proximally extending horn. Measurements of CPC 3049 in millimetres: length = 64.7; width = 52.5; maximum height = 22.5. CPC 3050 in millimetres: length = 61.7; width = 53.8; maximum height = 69.7. CPC 3051 in millimetres: length = 52.5; width = 39; maximum height = 18.

Discussion. These unguals are blunt as seen in other ankylosaurians (Carpenter, 1990; Carpenter *et al.*, 1995; Arbour *et al.*, 2009; Currie *et al.*, 2011) rather than hoofed like as seen in ceratopsians.

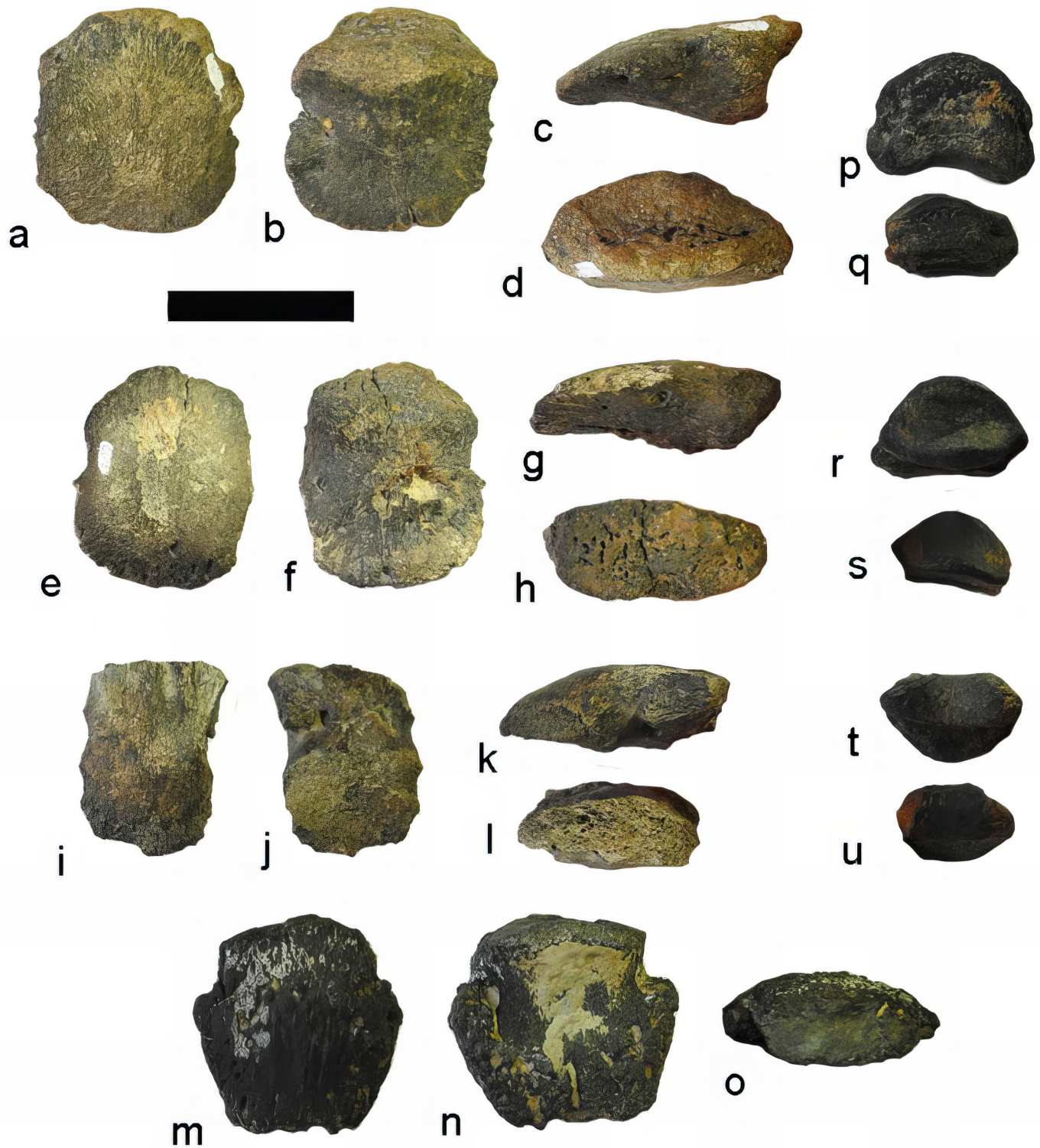


Figure 5. CPC 3049 ungual in: a) dorsal, b) ventral, c) lateral, d) caudal views. CPC 3050 ungual in: e) dorsal, f) ventral, g) lateral, h) caudal views. CPC 3051 ungual in: i) dorsal, j) ventral, k) lateral, l) caudal views. CPC 3052 ungual in: m) dorsal, n) ventral, o) caudal views. CPC 3048a-b phalanges in: p, q) dorsal, r, s) caudal, and t, u) cranial views. Scale bar = 5 cm.

Material. Ungual (CPC 3052; Figure 5 m–o).

Horizon and Locality. Cañón del Tule Formation (Upper Cretaceous, Maastrichtian), Carolinas locality, Ramos Arizpe, Coahuila, Mexico.

Description. The unguis is widest at their proximal articulation and tapers distally to a blunt tip, being as long as it is wide; with a rugose texture dorsally and ventrally. Measurements of CPC 3052 in millimetres: length = 60.6; width = 57.7; maximum height = 22.6.

Discussion. The unguis is blunt as seen in other ankylosaurians (Carpenter, 1990; Carpenter et al., 1995; Arbour et al., 2009; Currie et al., 2011).

Ankylosauridae Brown, 1908
Ankylosauridae indet.

Material. CPC 3053a, unguis; CPC 3053b, osteoderm; (Figure 6 e–g).

Horizon and locality. Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian), La Parrita locality, General Cepeda, Coahuila, Mexico.

Description. The unguis (CPC 3053a) is broken and badly weathered, the tip is preserved and the left side. In the right side can be seen the proximal end of the vascular groove, the dorsal surface is rugose while the ventral is smoother with some foramina present. The osteoderm (CPC 3053b) is with only right side preserved, with a dorsal surface with a rise keel orientated obliquely, with a fine pitting in its dorsal surface, with a convex ventral surface. Measurements in millimetres of CPC 3053a: length = 66.1; maximum height = 26.2; maximum width = 54.9. CPC 3053b: length = 47.6; maximum height = 24.1; maximum width = 48.1.

Discussion. The unguis is as seen in other ankylosaurians (Carpenter, 1990; Carpenter et al., 1995; Arbour et al., 2009; Currie et al., 2011). The basally-excavated osteoderm is ankylosaurian-type as seen in other Ankylosauridae as *Ahshislepelta minor* (Burns and Sullivan, 2011).

Material. CPC 3054, osteoderm; (Fig. 6 a–d).

Horizon and Locality. Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian), Rancho Ammonite locality, General Cepeda, Coahuila, Mexico.

Description. The osteoderm (CPC 3054) has a dorsal surface with a rise blunt keel orientated caudally, and with convex ventral surface. It has a smooth surface with vascular channels over its surface. Is thick-walled and thicker along the keel. The base is oval, longer than wide, although only its left side is the only preserved edge. Measurements in millimetres of CPC 3054: length = 33.9; maximum height = 14; maximum width = 24.9.

Discussion. The concave ventral surface indicates ankylosauridae affinity (Coombs & Maryńska, 1990), although its small size cannot be determined if belong to an immature individual or was a small ossicle in a large individual.

Nodosauridae Marsh, 1890

Acantholipan gonzalezi Rivera-Sylva et al.,
2018

The only thyreophoran formally described for Mexico is the nodosaurid *Acantholipan gonzalezi* (Rivera-Sylva et al., 2018). It is a nodosaur that inhabited on the northwest coast of Coahuila, which today is a semi-desert around the township of Ocampo. The sediments in this region correspond to the Pen Formation, with an age of about 85 million years. According to the remains preserved, the individual was a juvenile with a length of about 4.5 meters and a mass close to 500 kg. Its remains were extracted from a bedrock that was deposited in shallow coastal seawaters. The carcass floated down a river prior to deposition, a taphonomical scenario frequently observed among nodosaurs (e.g., *Ale-topelta*, *Borealopelta*, *Nodosaurus*, *Stegopelta*, *Pawpawsaurus*, and *Niobrarasaurus*; Carpenter et al., 1995; Carpenter and Kirkland, 1998; Ford and Kirkland, 2001; Arbour et al., 2016;

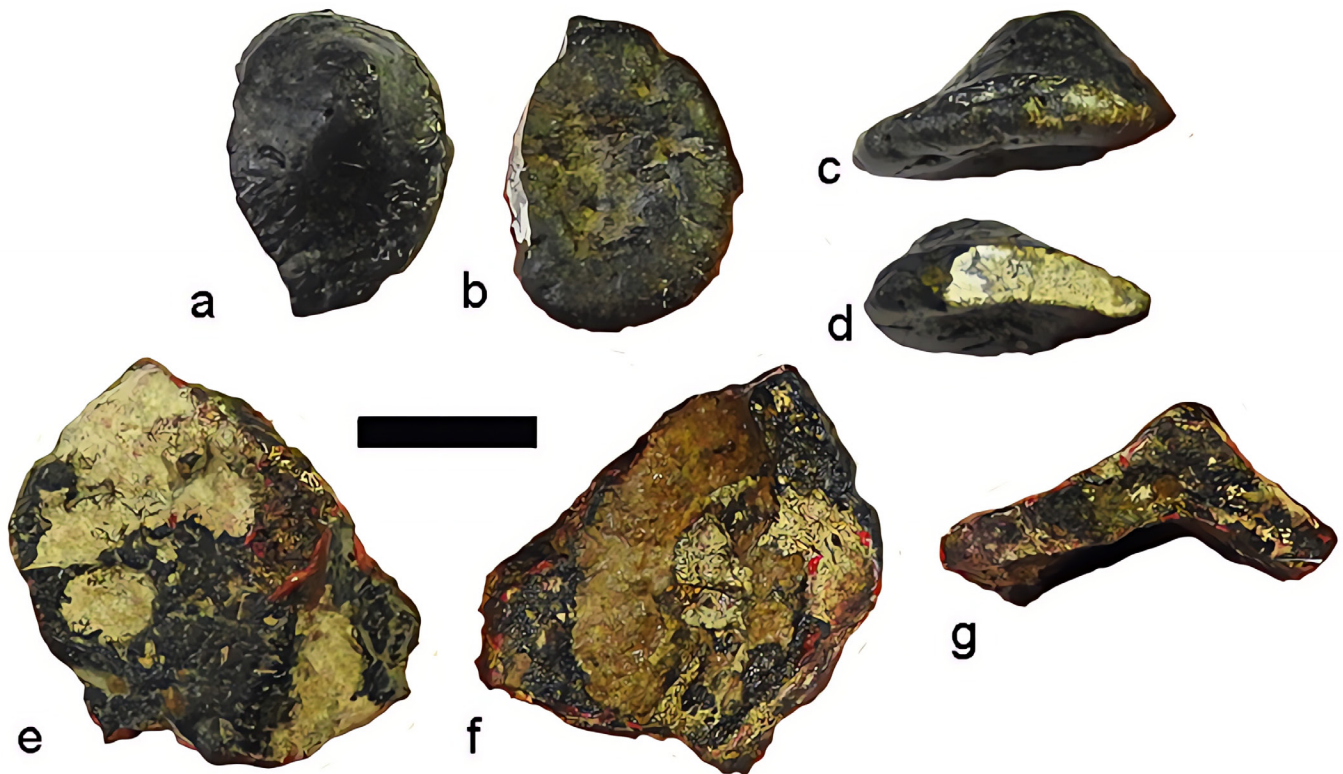


Figure 6. Osteoderms. CPC 3054, a) dorsal, b) ventral, c) lateral, and d) frontal views. CPC 3053, e) dorsal, f) ventral, g) caudal views. Scale bar = 2 cm.

Brown *et al.*, 2017), unquestionable evidence that the group occupied the ecological niche of nowadays hippopotamus.

The holotype of *Acantholipan gonzalezi* (CPC 272) consist of a thoracic and a caudal vertebra, the fragment of a rib, the distal end of left humerus, the distal end of the left femur, and a thoracic osteodermal spine. It is distinguished from the other species of nodosaurids due to the following combination of characteristics: ulna with a prominent anterolateral process, tapered and proximally truncated, triangular in lateral view, conical and slightly curved caudally thoracic osteoderm with an oval longitudinal cross-section and vascular grooves on the lateral view.

The spine belongs to the thoracic area based on its circular base and cross section as observed in other nodosaurids (Ford, 2000; Carpenter, 2012; Ósi and Pereda-Suberbiola, 2017), while the spines from the cervical region have a triangular base, the bodies are compressed with a y-shaped cross-section with the dorsal

side keeled for most of its length (Ford, 2000; Kirkland *et al.*, 2013; Penkalski, 2014).

The spine rows in *Acantholipan* and other nodosaurids (e.g., *Europelta*, *Struthiosaurus*) might have extended down through the tail, as in extant crocodiles. The spines working with the other body osteoderms may have functioned as an efficient distribution of absorbed radiant heat during basking (both in and out of the water) as in crocodiles (Seidel, 1979; Clarac and Quilhac, 2019). The argument favoring protection is weakened (but not dismissed) when considering the vascularity of osteoderms suggesting an important physiological role in calcium remobilization as suggest by Brum *et al.* (2023). Therefore, in large semiaquatic reptiles, basking is related to the presence of dermal armor, where the sculpted armor is present only on surfaces that would be available for absorption of solar radiation. These surfaces are exposed to sunlight during basking on land and while the animal is partly submerged (Seidel, 1979).

Nodosauridae indet.

Material. Caudal vertebra; phalanges; osteoderms (CPC 3055; Figure 7).

Horizon and locality. Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian), La

Parrita locality, General Cepeda, Coahuila, Mexico.

Description. The vertebra is slightly amphicoelus. With rounded centra in anterior and posterior view. Is as long as it is tall. The base of the neural canal is rounded. It has a broad base of the transverse process, being on

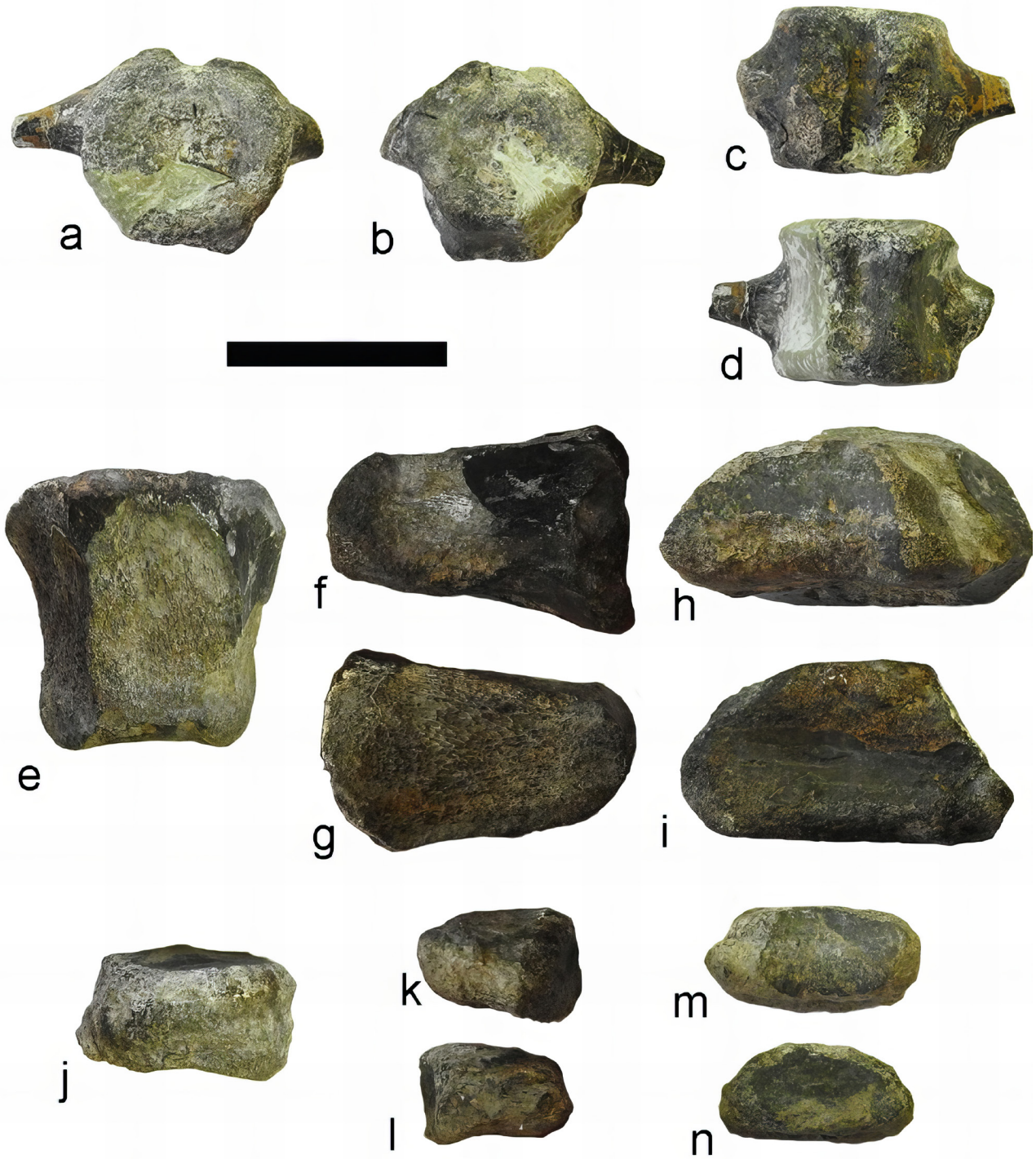


Figure 7. CPC 3055, caudal vertebra in: a) cranial, b) caudal, c) dorsal, d) ventral; proximal pedal phalanx in: e) dorsal, f-g) lateral, h) cranial, i) caudal; distal pedal phalanx in: j) dorsal, k-l) lateral, m) cranial, and n) caudal views. Scale bar = 5 cm.

straight angle with the centrum. The phalanges are anteroposteriorly short. With a shallow articular surface and poorly developed distal condyles. CPC 3055b is longer than it is wide, while CPC 3055c is wider than it is long. Measurements of CPC 3055a in millimetres: length = 36.2; maximum height = 39.7; maximum width = 62.9; CPC 3055b in millimetres: length = 55.1; maximum height = 36.5; maximum width = 59.7; CPC 3055c in millimetres: length = 25.7; maximum height = 21.4; maximum width = 43.5. CPC 3055d in millimetres: length = 30; maximum height = 29; maximum width = 22; CPC 3055e in millimetres: length = 25.6; maximum height = 20.3; maximum width = 29.8.

Discussion. The well-developed transverse process and the rounded centrum of CPC 3055a suggest that the specimen represents an anterior caudal vertebra (Vickaryous *et al.*, 2004; Arbour *et al.*, 2009). The phalanges are as those figured by Carpenter (1990). While the fragments of the osteoderm looks flat in their ventral surface, it suggests the nodosaurid affinity of the specimen (Coombs & Maryańska, 1990).

Material. CPC 3092 a–c, osteoderms; (Figure 8 a–l).

Horizon and locality. Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian), Rincón Colorado locality, General Cepeda, Coahuila, Mexico.

Description. The osteoderms (CPC 3092 a–c) had a dorsal surface with a rise blunt keel orientated caudally, and with and almost flat ventral surface. It has a smooth surface with vascular foramina over their surface. The base is oval in CPC 3092c, except in CPC 3092a and CPC 3092b where the base is slightly broken and only one side is the only preserved edge. Measurements in millimetres of CPC 3092a: length = 31.8; maximum height = 17.5; maximum width = 26.8. CPC 3092b: length = 34.4; maximum height = 21.1; maximum width = 26.9. CPC 3092c: length = 22; maximum height = 14.9; maximum width = 28.5.

Discussion. The three elements were found in close association, that is why were considered as belonging to one individual. The almost flat ventral surface indicates nodosaurian affinity (Coombs & Maryańska, 1990), although its small size cannot be determined if belong to an immature individual or was a small ossicle in a large individual.

4. Discussion

Previous studies indicate the presence of Upper Cretaceous marine deposits at Sierra Mojada (Palomino-Sánchez, pers. comm., 2006). However, the presence of terrestrial fossil vertebrates cast doubts on this interpretation or at least suggests the close proximity of coastal or fluvial environments. The vertebrate fossils described above come from a sequence of sandstones, conglomerates and claystones, which overlie marl beds. The strata above the marls appear to represent fluvial environments, which is supported by the presence of dinosaur bones and fossil tree stumps found *in situ* (Haarmann, 1913; Janensch, 1926). The palaeoenvironment of the Soledad Beds may have been a coastal plain with marine estuaries that allowed colonization by oysters and sharks (Rivera-Sylva and López-Espinosa, 2006).

Ankylosaur occurrences throughout North America are common in deposits from coastal plains, deltas and in marine shales. So is suggested a preference by ankylosaurs, mainly nodosaurs for coastal habitats bordering the sea. The Soledad Beds may provide additional evidence for latitudinal faunal diversity at that time.

The presence in northern Mexico of *Acantholipan gonzalezi*, provides evidence for an isolated local endemism, as is also reported for other coeval dinosaurs of Laramidia (Lehman, 1987; 1997; 2001; Sankey, 2008; Rivera-Sylva *et al.*, 2011b; 2017; 2018; Lehman *et al.*, 2019). Late Cretaceous dinosaur assemblages of northern Mexico are taxonomically distinct

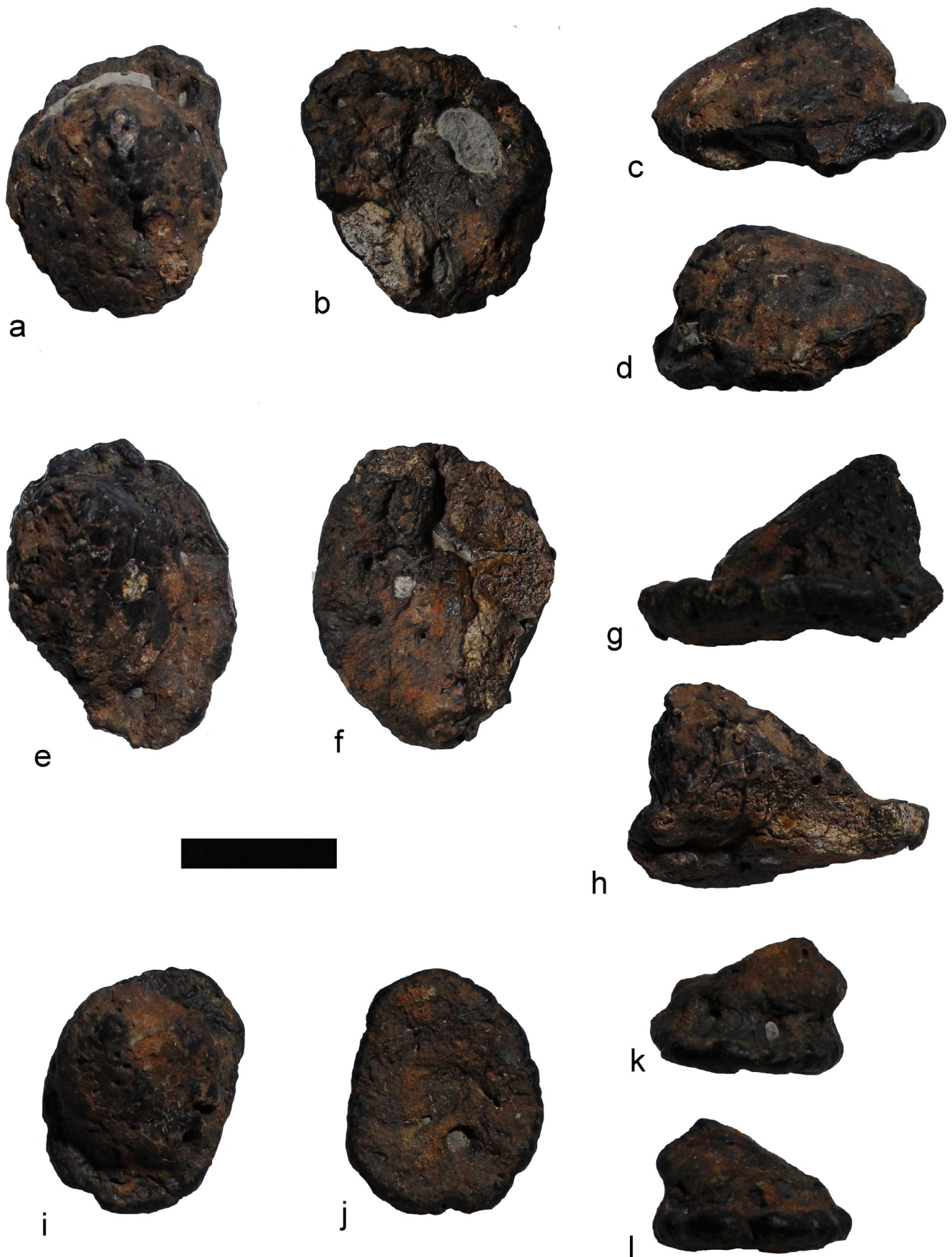


Figure 8. Osteoderms. CPC 3092a, a) dorsal, b) ventral, c) left lateral, and d) right lateral views. CPC 3092b, e) dorsal, f) ventral, g) left lateral, and h) right lateral views. CPC 3092c, i) dorsal, j) ventral, k) left lateral, and l) right lateral views. Scale bar = 2 cm.

from coeval assemblages of northern Laramidia. Among ankylosaurs, differentiation around the world is frequently considered to be related to the different types of vegetation consumed by these dinosaurs (Ősi *et al.*, 2016). The diversification of vegetation likely resulted from a north-south climate gradient, with periodic dry to arid intervals that occurred earlier and lasted longer in the south than in the north of Laramidia (Loewen *et al.*, 2013).

Endemism has been suggested for Mexican ankylosaurids, although *Euplocephalus* sp. has been reported from the southern Aguja Formation (West, 2020), which could be a southern Laramidian species. Endemisms are known from other groups of Campanian dinosaurs (*e.g.*, tyrannosaurids, hadrosaurids, and ceratopsians; Sampson *et al.*, 2004; 2010). The scenario of endemic Mexican ankylosaurs also supports an unknown Late Cretaceous geographical barrier that separated northeastern Mexico from the rest of Laramidia running along the southern shoreline of the continent. This barrier apparently prevented terrestrial faunal interchange (Rivera-Sylva *et al.*, 2011b).

The recent focus on the fossil record of thyreophorans from Mexico has added substantial data for the reconstruction of the biogeography, diversity, and evolutionary patterns of this group of herbivorous dinosaurs. They inhabited a variety of habitats and were opportunistic herbivores. The evolution of ankylosaurs is marked by a progressive widening of the posterior part of the digestive tract, as seen by the increasing aperture of the pelvis (Carpenter, 2012). This change may have been the result of changing diet and the need for a longer fermentation and digestion time.

Ankylosaurids and nodosaurids are known to coexisted in coastal environments, but the dominance of nodosaurids in nearshore deposits in Mexico may indicate a preferred environments along river systems where their carcasses could be more easily transported to the nearby ocean. In contrast, ankylosaurids preferred more inland environments.

CPC 3048 and CPC 3052 were collected from the Cañon del Tule Formation (Upper Maastriachitan), making them the youngest thyreophoran fossil remains recorded in Mexico to date.

5. Conclusions

The diversity of late Cretaceous Mexican ankylosaurs represents a significant episode in the evolution of terrestrial macrovertebrate faunas in Laramidia. The low diversity is probably the result of a bias of the fossil record rather than a real reduction in biological diversity. Although diagnostic material is presently limited, the knowledge on Mexican ankylosaurs will likely improve by the discovery of more complete specimens in the future, as well as by biogeographic comparisons between taxa inhabiting northern and southern Laramidia during the Campanian.

The potential of new discoveries of ankylosaurs from Mexico is very high, and it is likely that many more finds will become available as researches concentrate on the already known localities.

Acknowledgments

We would like to acknowledge Lucia Alfaró-Ortiz (LLF) for taking the photographs and Julio Robledo (MUDE) for their useful skill cleaning the material. Jorge Ortiz-Mendieta (Museo de Historia Natural de Amecameca) is thank for producing figure 1. We also thank Ruben Molina-Pérez for providing the allometric total length scaling of CPC 3046. Additionally, we express our sincere gratitude to Omar Lagarda González and Adolfo Rangel Morelos for their invaluable assistance in creating and contributing to the skeletal reconstruction. We would like to specially thank J. Ignacio Vallejo-González for his invaluable help in the field. We are deeply thankful to Julio

Carranza, owner of Rancho Los Ammonites, for allowing access to his property for prospecting. We are especially grateful to Ken Carpenter for reviewing a previous version of the manuscript and providing valuable feedback. We also extend our gratitude to the two anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions, which greatly improved this manuscript.

References





- Arbour, V. M., Burns, M. E., & Sissons, R. L. (2009). A redescription of the ankylosaurid dinosaur *Dyoplosaurus acutosquameus* Parks, 1924 (Ornithischia: Ankylosauria) and a revision of the genus. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 29 (4), 1117–1135. <https://doi.org/10.1671/039.029.0405>
- Arbour, V. M., & Currie, P. J. (2016). Systematics, phylogeny and palaeobiogeography of the ankylosaurid dinosaurs. *Journal of Systematic Palaeontology*, 14(5), 385–444. DOI: 10.1080/14772019.2015.1059985
- Arbour, V. M., Zanno, L. E., & Gates, T. (2016). Ankylosaurian dinosaur palaeoenvironmental associations were influenced by extirpation, sea-level fluctuations, and geodispersal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 449, 289–299.
- Brown, B. (1908). The Ankylosauridae, a new family of armored dinosaurs from the Upper Cretaceous. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 24, 187–201.
- Brown, C. M., Henderson, D. M., Vinther, J., Fletcher, I., Sistiaga, A., Herrera, J., & Summons, R. E. (2017). An Exceptionally Preserved Three-Dimensional Armored Dinosaur Reveals Insights into Coloration and Cretaceous Predator-Prey Dynamics. *Current Biology*, 27, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.06.071>
- Brum, A. S., Eleutério, L. H. S., Simões, T. R., Whitney, M. R., Souza, G. A., Sayão, J. M., & Kellner, A. W. A. (2023). Ankylosaurian body armor function and evolution with insights from osteohistology and morphometrics of new specimens from the Late Cretaceous of Antarctica. *Paleobiology*, 49(4), 1–22. <https://doi.org/10.1017/pab.2023.4>
- Burns, M. E., & Sullivan, R. M. (2011). A new ankylosaurid from the Upper Cretaceous Kirtland Formation, San Juan Basin, with comments on the diversity of ankylosaurids in New Mexico. Fossil Record 3. *New Mexico Museum of Natural History and Science, Bulletin*, 53, 169–178.
- Carpenter, K. (1990). Ankylosaur systematics: Example using *Panoplosaurus* and *Edmontonia*. In K. Carpenter, & P. J. Currie (eds.), *Dinosaur Systematics: Approaches and Perspectives* (pp. 281–298). Cambridge University Press.
- Carpenter, K. (2012). Ankylosaurs. In M. Brett-Surman, T. R. Holtz, & J. Farlow (Eds.), *The Complete Dinosaur* (2nd Ed., pp. 505–525). Indiana University Press.
- Carpenter, K., Dilkes, D., & Weishampel, D. B. (1995). The dinosaurs of the Niobrara Chalk Formation (Upper Cretaceous, Kansas). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 15, 275–297.
- Carpenter, K., & Kirkland, J. I. (1998). Review of Lower and Middle Cretaceous Ankylosaurs from North America. In S. G. Lucas, J. I. Kirkland, & J. W. Estep (Eds.), *Lower and Middle Cretaceous Terrestrial Ecosystems* (pp. 249–270). New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 14.
- Carpenter, K., Bartlett, J., Bird, J., & Barrick, R. (2008). Ankylosaurs from the Price River Quarries, Cedar Mountain Formation (Lower Cretaceous), east-central Utah. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 28(4), 1089–1101.
- Clarac, F., & Quilhac, A. (2019). The crocodylian skull and osteoderms: A functional exaptation to ectothermy?. *Zoology*, 132, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2018.12.001>
- Coombs, W. P. (1978). The families of the ornithischian dinosaur order Ankylosauria. *Palaeontology*, 21(1), 143–170.
- Coombs, W. P. (1986). A juvenile ankylosaur referable to the genus *Euplocephalus* (Reptilia, Ornithischia). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 6(2), 162–173.
- Coombs, W. P., & Maryanska, T. (1990). Ankylosauria. In D. B. Weishampel, P. Dodson, & H. Osmólska (Eds.), *The Dinosauria* (pp. 456–483) University of California Press.
- Currie, P. J., Badamgarav, D., Koppelhus, E. B., Sissons, R., & Vickaryous, M. K. (2011). Hands, feet, and behavior in *Pinacosaurus* (Dinosauria: Ankylosauridae). *Acta Palaeontologica Polonica*, 56(3), 489–504.
- Ford, T. (2000). A review of ankylosaur osteoderms from New Mexico and a preliminary review of ankylosaur armour. In S. G. Lucas, & A. B. Heckert (Eds.), *Dinosaurs of New Mexico* (pp. 157–176). New Mexico Museum of Natural History and Science, Bulletin 17.
- Ford, T., & Kirkland, J. I. (2001). Carlsbad ankylosaur (Ornithischia, Ankylosauria): An ankylosaurid and not a nodosaurid. In K. Carpenter (Ed.), *The Armored Dinosaurs* (pp. 239–260). Indiana University Press.
- Haarmann, E. (1913). Geologische Streifzüge in Coahuila. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 65(1), 18–47.
- Janensch, V. W. (1926). Dinosaurier-Reste aus Mexiko. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 1926B, 192–197.
- Kappus, E. J., Lucas, S. G., & Langford, R. (2011). The Cerro de Cristo Rey Cretaceous Dinosaur tracksites, Sunland Park, New Mexico, USA, and Chihuahua, Mexico. In R. M. Sullivan, S. G. Lucas, & Justin A. Spielmann (Eds.), *Fossil Record 3* (pp. 272–288). New Mexico Museum of Natural History and Science, Bulletin 53.
- Kirkland J., Alcalá, L., Loewen, M. A., Espílez, E., Mampel, L., & Wiersma, J. P. (2013). The basal nodosaurid ankylosaur *Europelta carbonensis* n. gen., n. sp. from the Lower Cretaceous (Lower Albian) Escucha Formation of Northeastern Spain. *PLoS ONE*, 8(12), e80405. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080405>
- Lehman, T. M. (1987). Late Maastrichtian paleoenvironments and dinosaur biogeography in the Western Interior of North America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 60, 189–217.
- Lehman, T. M. (1997). Late Campanian dinosaur biogeography in the Western Interior of North America. In D. A. Wolberg, & E. Stump, E. (Eds.), *Dinofest International Proceedings* (pp. 223–240). Academy of Natural Sciences, Philadelphia.
- Lehman, T. M. (2001). Late Cretaceous Dinosaur Provinciality. In D. H. Tanke, & K. Carpenter (Eds.), *Mesozoic Vertebrate Life* (pp. 310–328). Indiana University Press.
- Lehman, T. M., Wick, S., Brink, A., Shiller, T. (2019). Stratigraphy and vertebrate fauna of the lower shale member of the Aguja Formation (lower Campanian) in West Texas. *Cretaceous Research*, 99, 291–314. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2019.02.0282>
- Loewen, M. A., Burns, M. E., Getty, M. A., Kirkland, J. I., & Vickaryous, M. K. (2013). Review of Late Cretaceous Ankylosaurian Dinosaurs from the Grand Staircase Region, Southern Utah. In A. L. Titus, & M. A. Loewen (Eds.), *At the top of the Grand Staircase: The Late Cretaceous of Southern Utah* (pp. 445–462). Indiana University Press.
- Marsh, O. C. (1890). Additional characters of the Ceratopsidae, with notice of new Cretaceous dinosaurs. *American Journal of Science series*, 3, 39, 81–86.
- Martínez-Díaz, J. L., Montellano-Ballesteros, M. (2011). Anquilosaurios (Thyreophora-Ankylosauria) del Cretácico Superior de México. *Libro del Resúmenes del XII Congreso Nacional de Paleontología*, Puebla, pp. 93.
- Meyer, C., Frey, E. D., Thüring, B., Etter, W., Stinnesbeck, W. (2005). Dinosaur tracks from the Late Cretaceous Sabinas Basin (Mexico). *Kaupia*, 14, 41–45.

Ankylosaurians from Coahuila, Mexico

- Morris, W. J. (1967). Baja California: Late Cretaceous dinosaurs. *Science*, 155(3769), 1539–1541.
- Nopcsa, F. (1915). Die Dinosaurier der siebenbürgischen Landesteile Ungarns. *Mitteilungen Jarbuch der Königlich ungarischen geologischen Reichsanstalt*, 23, 1–26.
- Osborn, H. F. (1923). Two Lower Cretaceous dinosaurs of Mongolia. *American Museum Novitates*, 95, 1–10.
- Ósi, A., & Pereda-Suberbiola, X. (2017). Notes on the pelvic armor of European ankylosaurs (Dinosauria: Ornithischia). *Cretaceous Research*, 75, 11–22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2017.03.007>
- Ósi, A., Prondvai, E., Mallon, J., & Reka Bodor, E. (2016). Diversity and convergences in the evolution of feeding adaptations in ankylosaurs (Dinosauria: Ornithischia). *Historical Biology*, 29(4), 539–570.
- Owen, R. (1842). *Report on British Fossils Reptiles, Part II. Report of the Eleventh Meeting of the British Association for the Advancement of Science* (pp. 60–204). John Murray publisher.
- Penkalski, P. (2014). A new ankylosaurid from the Late Cretaceous Two Medicine Formation of Montana, USA. *Acta Palaeontologica Polonica*, 59(3), 617–634.
- Rivera-Sylva, H. E., & Espinosa-Chávez, B. (2006). Ankylosaurid (Dinosauria: Thyreophora) osteoderms from the Upper Cretaceous Cerro del Pueblo of Coahuila, Mexico. *Carnets de Géologie*, 6, 1–5. <https://doi.org/10.4267/2042/4741>
- Rivera-Sylva, H. E., & López-Espinoza, J. (2006). Informe de una nueva localidad del Cretácico Tardío en Coahuila, México. *Libro de resúmenes del X Congreso Nacional de Paleontología, Ciudad de México, México* (p. 130). Sociedad Mexicana de Paleontología 10.
- Rivera-Sylva, H. E., Carpenter, K., & Aranda-Manteca, F. J. (2011a). Late Cretaceous Nodosaurids (Ankylosauria: Ornithischia) from Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 271–278.
- Rivera-Sylva, H. E., Frey, E., Guzmán-Gutiérrez, R., Palomino-Sánchez, F., & Stinnesbeck, W. A. (2011b). *Deinosuchus riograndensis* (Eusuchia: Alligatoroidea) from Coahuila, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(2), 267–274.
- Rivera Sylva, H. E., & Carpenter, K. (2014). Ornithischian dinosaurs from Mexico. In H. E. Rivera Sylva, K. Carpenter, & E. Frey (Eds), *Dinosaurs and other reptiles from the Mesozoic from Mexico* (pp. 156–180). Indiana University Press.
- Rivera-Sylva, H. E., Frey, E., Stinnesbeck, W. A., Guzmán-Gutiérrez, R., & González-González, A. H. (2017). Mexican ceratopsids: Considerations on their Diversity and Biogeography. *Journal of South American Earth Sciences*, 75, 66–73.
- Rivera-Sylva, H. E., Frey, E., Stinnesbeck, W., Carbot-Chanona, G., Sánchez-Urbe, I. E., Guzmán-Gutiérrez, J. R. (2018). Paleodiversity of Late Cretaceous Ankylosauria from Mexico and their phylogenetic significance. *Swiss Journal of Palaeontology*, 137, 83–93. <https://doi.org/10.1007/s13358-018-0153-1>
- Rivera-Sylva, H. E., Guzmán-Gutiérrez, J. R., Porrás-Músquiz, H., Zapata Jaime, R., García de la Garza, J. P., Guajardo Guajardo, R. D., & Galicia Chávez, M. (2019). Paleobiodiversidad de dinosaurios de la Formación Olmos (Campaniano-Maastrichtiano) en Coahuila, México. *Memorias del 3er Congreso de Diversidad Biológica*. Durango, México, 171–176.
- Rivera-Sylva, H. E., Nava-Rodríguez, R. L., & Sánchez-Urbe, I. E. (2021). Dinosaurs from the Late Cretaceous of the Ojinaga Basin in Northeastern Chihuahua, Mexico. *Paleontología Mexicana*, 10(2), 105–111.
- Rodríguez-de la Rosa, R. A., Velasco-de León, M. P., Arellano-Gil, J., & Lozano-Carmona, D. E. (2018). Middle Jurassic ankylosaur tracks from Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(2), 379–395.
- Sampson, S. D., Loewen, M. A., Roberts, E. T., Smith, J. A., Zanno, L. E., & Gates, T. (2004). Provincialism in Late Cretaceous terrestrial faunas: New evidence from the Campanian Kaiparowits Formation of Utah. *Journal of Vertebrate Paleontology, supplement 24*, 108A.
- Sampson, S. D., & Loewen, M. A. (2010). Unraveling a radiation: A review of the diversity, stratigraphic distribution, biogeography, and evolution of horned dinosaurs (Ornithischia: Ceratopsidae). In M. J. Ryan, B. Chinnery Allgeier, & D. A. Eberth (Eds.), *New perspectives on horned dinosaurs* (pp. 405–427). Indiana University Press.
- Sankey, J. T. (2008). Vertebrate Paleobiology from Microsites, Talley Mountain, Upper Aguja Formation (Late Cretaceous), Big Bend National Park, Texas, USA. In J. T. Sankey, & S. Baszio (Eds.), *Vertebrate Microfossils Assemblages* (pp. 61–77). Indiana University Press.
- Seeley, H. G. (1888). On the Classification of the Fossil Animals Commonly Named Dinosauria. *Proceedings of the Royal Society of London*, 43, 165–171.
- Seidel, M. R. (1979). The osteoderms of the American alligator and their functional significance. *Herpetologica*, 35(4), 375–380.
- Sereno, P. (1986). Phylogeny of the bird-hipped dinosaurs (Order Ornithischia). *National Geographic Research*, 2, 234–256.
- Shiller, T. A. (2017). *Stratigraphy and paleontology of Upper Cretaceous-Paleogene strata in northern Coahuila, Mexico* [PhD Thesis]. Faculty of Texas Tech University.
- Vickaryous, M. K., Maryńska, T., Weishampel, D. B. (2004). Ankylosauria. In: Weishampel, D.B., Dodson, P., Osmólska, H. (Eds.), *The Dinosauria* (2nd Ed., pp. 363–392). University of California Press.
- West, B. N. (2020). *Campanian-Maastrichtian ankylosaurs of West Texas* [Master Thesis]. Texas Christian University.

Major element analysis in sedimentary rocks from the Middle Mississippian–Middle Pennsylvanian La Joya section in Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico

Análisis de elementos mayores en rocas sedimentarias de la sección La Joya del Misisípico Medio-Pensilvánico Medio en Sierra Agua Verde, Sonora, México

Villanueva-Olea, Rafael¹; Sánchez-Beristain, Francisco^{2,*}; Palafox-Reyes, Juan José³; Buitrón-Sánchez, Blanca Estela⁴

¹Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, UNAM (Edificio Tlahuizcalpan). Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria. Coyoacán, 04510, CDMX, México.

²Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, Campus Juriquilla–UNAM. Campus UNAM, 3001, Juriquilla 76230, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

³División de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Geología, Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, 83000, Sonora, México.

⁴Departamento de Paleontología, Instituto de Geología, UNAM. Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria. Coyoacán, 04510, CDMX, México.

*sanchez@ciencias.unam.mx

Abstract

The Sierra Agua Verde is a significant paleontological site in northwestern Mexico. While numerous stratigraphic and paleontological studies have been conducted in this area, a lack of geochemical research has hindered a complete understanding of its paleoenvironmental context. Our study primarily focused on examining the fossiliferous limestone from the Middle Mississippian to Middle Pennsylvanian periods in the region. By utilizing X-ray fluorescence (XRF), we measured major element oxide concentrations in bulk rock limestone samples. This analysis helped us infer the paleoenvironmental conditions through elemental ratios and correlation coefficients. The samples displayed calcium enrichment, with some also exhibiting high magnesium/calcium (Mg/Ca) ratios. The silicon/aluminum (Si/Al) ratio, akin to Si/Ca, was interpreted as indicative of productivity, potentially attributed to the presence of siliceous sponges. Nevertheless, elevated silicon values could also result from continental weathering processes. Peaks in elemental values apart from calcium may indicate episodes of riverine influx onto the carbonate platform where these sediments settled. We related the curve of major elements to previous stable isotope studies to determine if detrital element input aligned with global or regional climate conditions. Our hypotheses were corroborated by statistical analysis, yielding dendrograms that highlighted associations between elements such as Al and K, as well as Fe and Ti (Morisita Index). This could suggest the precipitation of minerals like orthoclase/illite and ilmenite. Moreover, the increasing divergence between Mg and Mn in comparison to the Al-K phenon, along with Si, might explain the strong Fe-Ti connection, reflecting the tendency of both Mn and Ti to form oxides. The co-precipitation of Si and P might also be linked to productivity episodes. However, the Si content could indicate either quartz input or biogenic silica contribution.

Keywords: Carboniferous, Mexico, paleoenvironment, Si/Al, Si/Ca, Sonora, X-ray fluorescence.

Resumen

La Sierra Agua Verde es un importante sitio paleontológico en el noroeste de México. Si bien se han realizado numerosos estudios estratigráficos y paleontológicos en esta área, la falta de investigación geoquímica ha dificultado una comprensión completa de su contexto pa-

Cómo citar / How to cite: Villanueva-Olea, R., Sánchez-Beristain, F., Palafox-Reyes, J. J., Buitrón-Sánchez, B. E. (2025). Major element analysis in sedimentary rocks from the Middle Mississippian–Middle Pennsylvanian La Joya section in Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico. *Paleontología Mexicana*, 14(1), 29–44.

Manuscript received: February 18, 2024.

Manuscript corrected: May 29, 2024.

Manuscript accepted: June 4, 2024.



<https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2025.14.1.391>

leoambiental. Nuestro estudio se centró principalmente en examinar calizas fosilíferas del Misisípico Medio-Pensilvánico Medio en la región. Utilizando fluorescencia de rayos X (FRX), medimos las concentraciones de óxidos de elementos mayores en muestras de caliza en roca total. Este análisis nos ayudó a inferir las condiciones paleoambientales a través de proporciones elementales y coeficientes de correlación. Las muestras presentan un enriquecimiento de calcio, y algunas también mostraron altas proporciones de magnesio/calcio (Mg/Ca). La relación silicio/aluminio (Si/Al), similar a Si/Ca, se interpretó como indicativa de productividad, potencialmente atribuida a la presencia de esponjas silíceas. Sin embargo, los elevados valores de silicio también podrían deberse a procesos de intemperismo continental. Los picos en los valores elementales distintos del calcio pueden indicar episodios de aporte fluvial hacia la plataforma carbonatada donde se asentaron estos sedimentos. Relacionamos la curva de elementos mayores con estudios previos de isótopos estables para determinar si la entrada de elementos detríticos se alineaba con las condiciones climáticas globales o regionales. Nuestras hipótesis fueron corroboradas mediante análisis estadístico, arrojando dendrogramas que resaltaron asociaciones entre elementos como Al y K, así como Fe y Ti (Índice de Morisita). Esto podría sugerir la precipitación de minerales como ortoclasa/illita e ilmenita. Además, la creciente divergencia entre Mg y Mn en comparación con el clado Al-K, junto con el Si, podría explicar la fuerte conexión Fe-Ti, reflejando la tendencia de Mn y Ti a formar óxidos. La coprecipitación de Si y P también podría estar relacionada con episodios de productividad. Sin embargo, el contenido de Si podría indicar entrada de cuarzo o una contribución de sílice biogénica.

Palabras clave: Carbonífero, México, paleoambiente, Si/Al, Si/Ca, Sonora, fluorescencia de rayos-X.

1. Introducción

The Late Paleozoic was a time of great climatic change that started in the Late Devonian and ended in the early Permian. These changes represent the development of a series of glaciations in the Gondwana supercontinent, which ultimately led to the formation of the northern hemisphere cyclothems (Isbell *et al.*, 2003). It was also a time of extended continental collisions, mountain building, and fluctuating sea levels (Wicander and Moore, 2010). The Paleozoic stratigraphic record extends through the world since it constitutes the base over which younger strata of Mesozoic and Cenozoic ages lie. Particularly, the Paleozoic has been long studied in North America, with a paleoclimatic and paleoenvironmental perspective, which has allowed the correlation of these patterns found in the region with those present in other parts of the world like the Paleotethys (Mii *et al.*, 2001). In the same way, the Late Paleozoic shows lower eustatic levels compared with those of the Early Paleozoic, a phenomenon that can be attributed to the so-called Late Paleozoic Ice Age (LPIA) (Haq and Schutter, 2008). Paleozoic exploration geology in search of hydrocarbon reservoirs has broadened in recent years (*e.g.* Xiangzheng *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2019). Regarding geochemistry, there is a scarcity of studies comprising Paleozoic materials; most geochemical studies are focused on several stages in the Mesozoic and Cenozoic.

In the state of Sonora, the Sierra Agua Verde has the most complete sequence of the Paleozoic in northwestern Mexico and has deposits from the Neoproterozoic (?) to the Pennsylvanian period in two different groups. Stewart *et al.* (1984, 1988, 1999) were among the first to recognize the presence of Paleozoic rocks. The deposits of San Jose Group represent only the Cambrian period, whereas the Agua Verde Group represents lithologies from the Ordovician to Lower Permian systems (Ochoa-Graniello and Sosa-León, 1993). Many of the strata of the Agua Verde Group are highly fossiliferous. Previous studies have focused on the identification of crinoids and taphonomic patterns of encrinites (Buitrón-Sánchez *et al.*, 2007); the discovery of Pennsylvanian fusulinid foraminifera and calcareous algae (Gómez-Espinosa *et al.*, 2008); the identification of a varied Carboniferous biota of phylloid algae and invertebrates like coralline chaetetid sponges, brachiopods, bryozoans, tabulate and solitary corals, fusulinid foraminifera and several paragera of crinoids (Buitrón-Sánchez *et al.*, 2015); and the description of mid-Carboniferous conodont associations (Navas-Parejo *et al.*, 2017). These conodont associations are typical of shallow-water carbonate platforms found in other parts of the North American craton.

The Sierra Agua Verde range has not been studied from a geochemical approach. Recently, Villanueva-Olea *et al.* (2019) expanded the study of this group by generating more data

on microfacies and by involving new geochemical analysis of a section representing the Middle Mississippian–Middle Pennsylvanian interval. Geochemical characteristics were obtained through the excursions of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of limestones of the La Joya section and were interpreted in terms of paleo-depositional environments that varied from the margin-platform reefs to a restricted-circulation lagoon. A paleo-bathymetric curve reconstructed from the microfacies analysis and distinctive patterns of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ infers that the changes observed were due to regional as well as local factors, such as varying inputs of ^{12}C -enriched continental fresh water, regional upwelling and residence times of the seawater in the shallow restricted platform. Nevertheless, the global climatic patterns also forced the isotopic behavior as well (Villanueva-Olea *et al.*, 2019). Geochemical characteristics go beyond the characterization of stable isotope compositions and involve differentiation among lithologies through the major element analysis (Craigie, 2018). For example, Herron (1988) introduced a parameter (*i.e.* log Fe/K ratio) for the classification of arkoses, which is one of the most commonly used geochemistry-based classification schemes for sandstone. Similarly, many other geochemical studies have focused on paleoenvironmental interpretations using major oxides as biomarkers (*e.g.* Ross and Bustin, 2009; Hakimi *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2017), showing the viability of using these proxies for interpreting depositional environments. For example, Hakimi *et al.* (2015) interpreted the high Ca and moderate Si and Al contents in their samples from Late Jurassic–Early Cretaceous sediments of Iraq as indicators of a deposit in Ca-rich waters but with clear inputs of quartz and clay minerals. The finding of low- to moderate levels of P concentrations was interpreted as input of mixed organic matter, which led to the formation of a reducing depositional environment favorable for preservation of organic matter.

In this work, we further discern aspects regarding geochemistry of the Middle Mississippian–Middle Pennsylvanian limestones

exposed at Sierra Agua Verde of northwestern Mexico (state of Sonora) by determining the concentrations of the major element oxides through the X-Ray Fluorescence technique (XRF) to identify the lithologies as well as to complement the previously reported paleoclimatic and paleoenvironmental interpretations for this area.

2. Study area and stratigraphy

The Sierra Agua Verde is a mountain range in the state of Sonora in northwestern Mexico. The works of Stewart *et al.* (1984, 1988, 1999) were among the first to recognize the presence of Paleozoic rocks in this area. Other studies have also contributed to the understanding of the regional stratigraphy (Repetsky *et al.*, 1985; Poole *et al.*, 1995). Ochoa-Granillo and Sosa-León (1993) disserted on Ordovician, Devonian, Carboniferous, and Permian strata. The area (Figure 1) is distinguished for its richness in Paleozoic biota (Minjárez-Sosa *et al.*, 1993; Ochoa-Granillo and Sosa-León, 1993). The lithological group with the same name includes the informal Santiago formation of the Mississippian age and it is composed of limestone, dolomitized limestone, and sandstone in a platform with calcareous banks of colonial organisms (Ochoa-Granillo and Sosa-León, 1993). Overlying it and in a transitional contact, the informal La Joya formation, of the Pennsylvanian age, can be found. It consists of limestone intercalated with calcareous lodolites and sandy lenses, and was deposited in a shallow platform, with development of calcareous banks with terrigenous input (Ochoa-Granillo and Sosa-León, 1993, p. 35–38). The paleontological study of Gómez-Espinosa *et al.* (2008) reported the presence of fusulinids and calcareous algae. Recently, Buitrón-Sánchez *et al.* (2007, 2015) mentioned the presence of numerous other species such as phylloid algae, fusulinids, chaetetids, tabulate and solitary corals, gastropods, fenestellid bryozoans, productid and spiriferid brachiopods, crinoids, and conodonts in the La Joya formation. Navas-Parejo *et al.* (2017) conducted

a biostratigraphic study based on conodonts, in which they reported the presence of some index fossils that allowed the location of the mid-Carboniferous boundary within the mid-sequence of the La Joya section, being composed in the lower part of Meramecian and Chesterian (Middle–Upper Mississippian: Visean–Serpukhovian) strata, and in the upper part of a Morrowan (Bashkirian, Lower Pennsylvanian) sedimentary sequence. Traditionally, this section had been considered part of the Pennsylvanian system (Atokan: Upper Bashkirian–Lower Moscovian) (Buitrón-Sánchez *et al.*, 2007, 2015; Gómez-Espinosa *et al.*, 2008).

We studied the lithologies of a sequence of deposits of *ca.* 270 m thick of Meramecian–Atokan (Middle Mississippian–Middle Pennsylvanian) age within the section (Figure 2). The base of this section (about 50 m thick) corresponds to sandy limestones and poorly fossiliferous grayish limestones. It is overlain by light to dark gray limestones between 50–180 m (from the base) and intercalations of pale volcanic tuff, and a coquina layer composed of brachiopods at 80 m (Navas-Parejo *et al.*, 2017). The Pennsylvanian La Joya formation starts at 131 meters over the base, which means the previously described Mississippian lithology

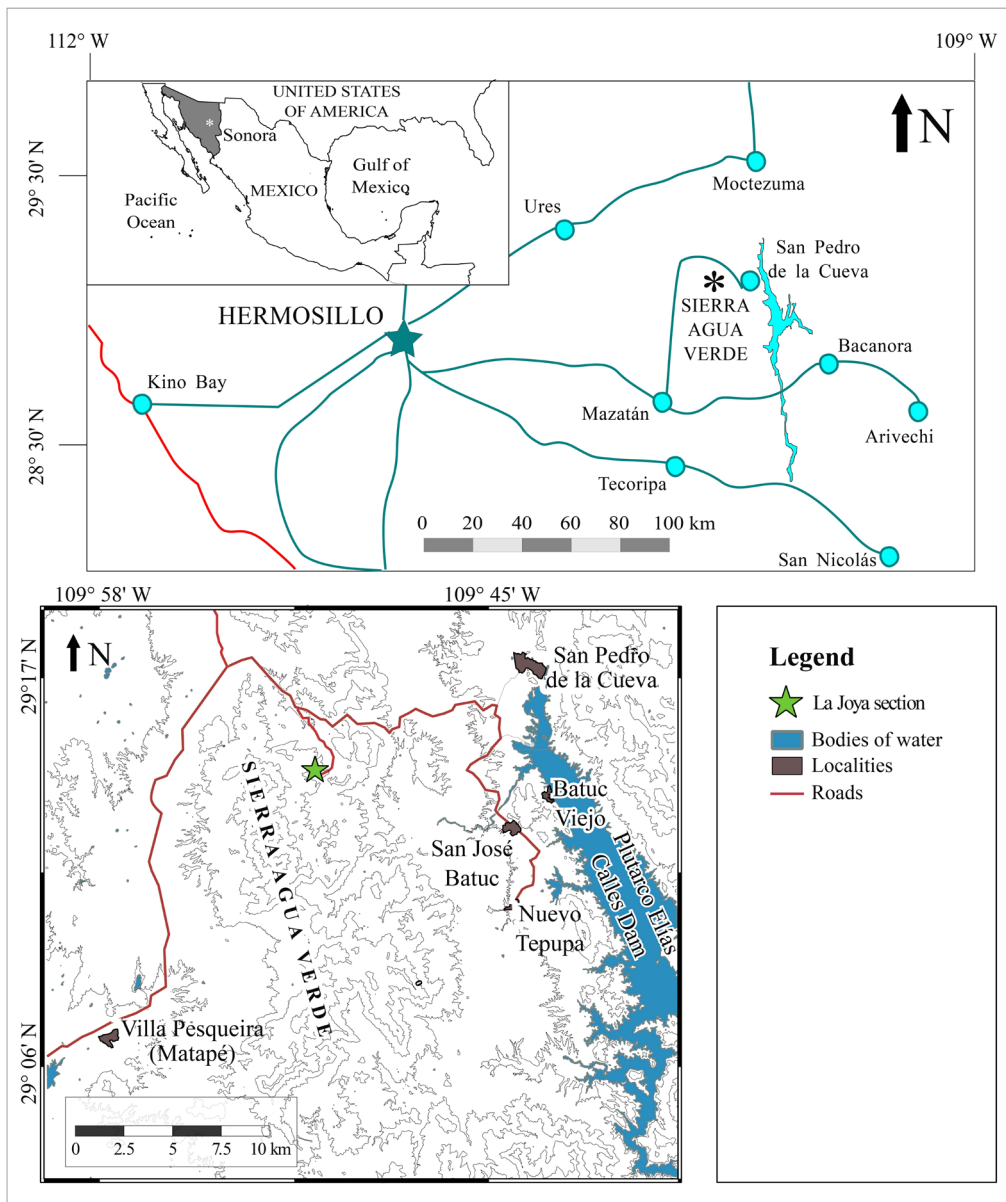


Figure 1. Study area, in the state of Sonora, northwestern Mexico.

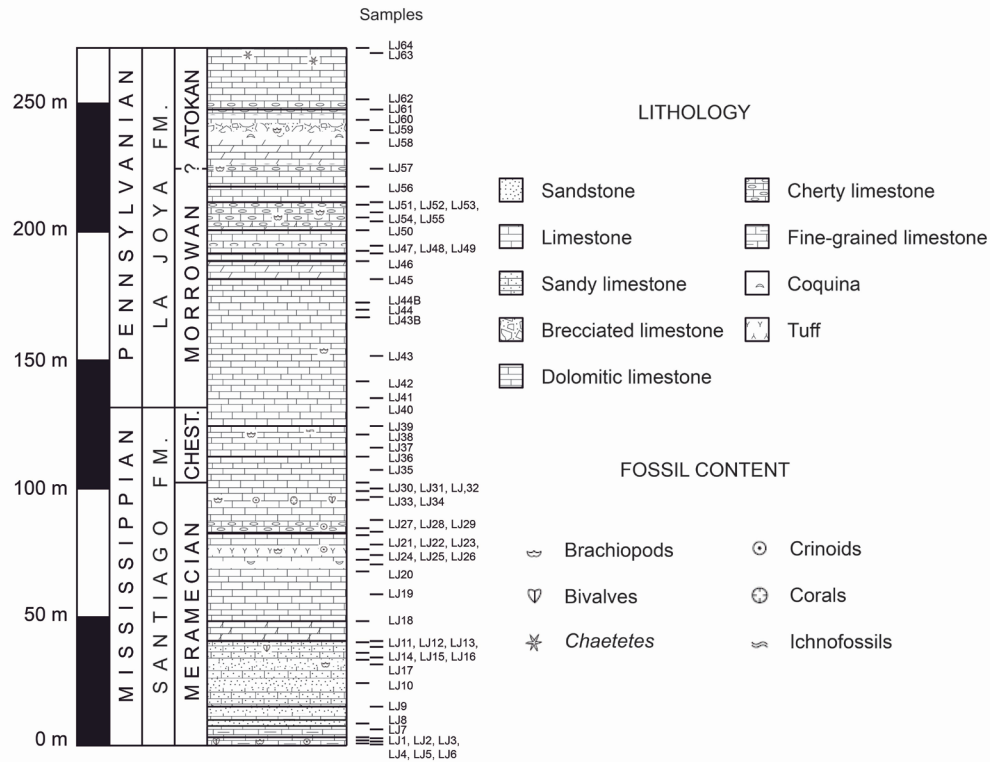


Figure 2. Stratigraphic column of the La Joya section in the Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico (Modified from Navas-Parejo *et al.*, 2017).

continues over the Pennsylvanian. The upper part of the section (180–270 m from the base) has pink limestone with intercalations of white and dark chert nodules. This interval is highly fossiliferous with a biota consisting of green algae, coralline sponges (*Chaetetes*), foraminifers, brachiopods, bryozoans, and crinoids (Buitrón-Sánchez *et al.*, 2007, 2015; Gómez-Espinosa *et al.*, 2008).

3. Material and methods

A total of 67 samples from this section were evaluated through petrographic microscopy in thin sections looking for those with minimal diagenesis (*i.e.* dolomitization, silicification, stylolitization, and presence of iron oxides). Finally, we selected 31 samples for this study. All of them were ground to <72 μm particles in a Spex SamplePrep 8000 M mill in tungsten carbide vials. The powdered samples were further dried in an oven up to 110°C for 24 hours and about 0.8 g of the dried samples were mixed with a flux containing

lithium metaborate (LiBO_2), lithium tetraborate ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), and lithium iodide (LiI), maintaining a sample/flux ratio of 1:9 for estimation of major element oxides in an X-ray fluorescence (XRF) spectrometer (*e.g.* Lozano-Santa Cruz *et al.*, 1995; Lozano and Bernal, 2005). Loss on ignition (LOI) was determined by heating 1 g of sample at 950°C for 1 hour, and this data was added to the elemental concentrations obtained in the spectrometer to obtain the total mass of the sample.

Subsequently, the sample and flux mixing was fused in Pt/Au (ratio of 95:5) melting pots using a Claisse Fluxy-10 fluxer and the disc-shaped glass pearls generated were placed into a ZSX Primus II Rigaku wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometer (WD-FRX), housed at the Laboratorio de FRX (Instituto de Geología, UNAM), which detected different wavelengths typical of each element and estimated the concentrations of SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , and P_2O_5 , by using the inhouse and external reference materials (USGS). The threshold of detection was 0.002% or 20 ppm.

4. Results

Due to the ease to work with elements, we decided to convert the values of elemental oxides to elements by eliminating the corresponding percentage of oxygen on each value. Hence, Table 1 shows the concentrations once converted to percentage elements in the calcareous samples. In general, calcium with 15.4% – 40.1% is the most abundant, and is followed by silicon with 0.1% – 28.5%, magnesium with 0.08% – 6.9%, iron with 0.03% – 0.5%, titanium with 0.01% – 0.15%, and phosphorus with 0.003% – 0.12%. Most of the concentrations of some elements remained below the detection limit. For example, aluminium had a range

between <0.002% – 0.6%; potassium showed values between <0.002% – 0.28%, whereas manganese between <0.002% – 0.01%. Sodium could not even be detected by the equipment.

The Santiago formation represents the limestones of the Mississippian epoch and has a total of 17 samples, which range from LJ 2 to LJ 38 (Table 1). The ranges (in percentage) for each element are: calcium with 15.38 – 40.11, silicon with 0.23 – 28.52, magnesium with 0.08 – 2.13, aluminum with <0.002 – 0.59, iron with 0.03 – 0.35, potassium with 0.01 – 0.28, titanium with 0.01 – 0.15, phosphorus with 0.003 – 0.117, and manganese with <0.002 – 0.01.

For the La Joya formation, which is defined by the Pennsylvanian part of the section, a

Table 1. Contents of major elements in samples of the La Joya section in w/w units.

	Si	Ca	Al	Ti	Fe	Mn	Mg	K	P	LOI
Samples	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
LJ 2	1.29	36.03	0.06	0.02	0.07	0	2.13	0.02	0.007	42.18
LJ 4	0.36	38.55	0	0.02	0.06	0	1	0.01	0.008	42.77
LJ 6	0.34	39.75	0	0.01	0.05	0	0.22	0.01	0.003	42.48
LJ 7	0.27	40.11	0.01	0.03	0.06	0	0.2	0.02	0.003	42.02
LJ 11	0.31	39.07	0.01	0.02	0.19	0.01	0.2	0.01	0.016	42.98
LJ 12	0.23	39.76	0.02	0.03	0.07	0.01	0.17	0.01	0.006	42.61
LJ 14	0.71	39.2	0.05	0.02	0.18	0.01	0.19	0.03	0.007	41.85
LJ 16	1.04	39.11	0.07	0.03	0.12	0.01	0.16	0.05	0.01	41.36
LJ 21	28.52	15.38	0	0.02	0.03	0	0.08	0.01	0.117	16.04
LJ 24	7.23	31.78	0.59	0.15	0.35	0.01	0.34	0.28	0.054	34.49
LJ 27	2.95	37.22	0	0.01	0.05	0	0.4	0.01	0.028	40.02
LJ 29	1.43	38.81	0	0.03	0.05	0	0.22	0.01	0.081	41.06
LJ 30	8.76	31.27	0.25	0.04	0.16	0.01	0.34	0.13	0.01	34.51
LJ 32	6.31	34.09	0.15	0.08	0.06	0.01	0.21	0.09	0.013	36.7
LJ 34	3.56	36.74	0.1	0.07	0.05	0.01	0.18	0.06	0.038	39.09
LJ 36	0.66	39.56	0.01	0.02	0.05	0.01	0.18	0.02	0.037	41.91
LJ 38	0.49	39.65	0	0.03	0.07	0.01	0.15	0.01	0.027	42.2
LJ 40	3.66	36.97	0.06	0.04	0.07	0	0.16	0.04	0.014	38.92
LJ 41	0.74	39.19	0	0.02	0.08	0	0.22	0.01	0.008	42.28
LJ 42	0.29	40.01	0.03	0.02	0.06	0	0.15	0	0.007	42.19
LJ 44	0.83	39.17	0.02	0.02	0.05	0	0.23	0.02	0.007	42.11
LJ 45	0.78	38.62	0.01	0.02	0.07	0	0.63	0	0.009	42.34
LJ 48	0.6	33.36	0.01	0.03	0.1	0	4.34	0.01	0.043	43.65
LJ 50	2.22	37.98	0	0.02	0.04	0	0.22	0	0.033	40.82
LJ 52	1.13	38.87	0.01	0.01	0.05	0	0.21	0	0.028	41.92
LJ 54	2.57	37.58	0.01	0.02	0.06	0	0.23	0.01	0.012	40.63
LJ 55	6.92	28.82	0.19	0.05	0.48	0.01	3.1	0.11	0.041	36.52
LJ 57	6.94	31.53	0.14	0.06	0.17	0.01	1.46	0.07	0.035	36.55
LJ 60	14.06	16.1	0.63	0.12	0.51	0.01	6.93	0.28	0.12	30.02
LJ 63bis	1.01	39.75	0	0.02	0.05	0	0.23	0	0.004	41.02
LJ 64	0.11	40.1	0	0.02	0.04	0	0.26	0	0.003	42.47

total of 14 samples were analyzed. The ranges (in percentage) for this formation are: calcium with 16.1 – 40.1, silicon with 0.11 – 14.06, magnesium with 0.15 – 6.93, aluminium with <0.002 – 0.63, iron with 0.04 – 0.51, potassium with <0.0002 – 0.28, titanium with 0.01 – 0.12, phosphorus with 0.003 – 0.12, and manganese with <0.002 – 0.01.

When we plot the abundance of Si and Ca as oxides (Figure 3), it is evident that there is a reverse relationship between them. Major element analyzes suffer from the closure limitation (e.g. Johansson *et al.*, 1984; Pingitore and Engle, 2022). Since calcium is the most represented element in limestones, it suffers a concentration decrease as the concentrations of the other elements increase. Complementarily, the nature of our samples is reflected in the LOI fraction (comp. Török *et al.*, 2010), as revealed by similar LOI and CaO plots (Figure 3).

As a method to elucidate the paleoenvironmental signal, we pursued the analysis of

elemental ratios. The main ratios utilized were Si/Ca, Si/Al, Al/Ca, Fe/Ca, Ti/Ca, K/Ca, and Mg/Ca (Table 2).

For the Si/Ca ratio, all values except LJ 21, are found below 1, meaning that Si concentrations are lower in relation to Ca. In contrast, for the Si/Al ratio, Si is enriched in relation to Al. For the remaining ratios (Al/Ca, Fe/Ca, Ti/Ca, K/Ca, and Mg/Ca) values are less than 1 and, in several samples, equal 0.

These data were then plotted (Figure 4). These ratios compared against calcium show a similar

Table 2. Relations between different major elements with calcium and silicon, coming from samples of Sierra Agua Verde, Sonora. Values in asterisk were calculated based on the lower threshold of the equipment detection (0.002%), therefore, the value shown here is underestimated for the Si/Al ratios.

Sample	Si/Ca	Si/Al	Al/Ca	Fe/Ca	Ti/Ca	K/Ca	Mg/Ca
LJ 2	0.036	21.55	0.002	0.002	0.001	0.001	0.059
LJ 4	0.009	*675.69	0	0.002	0.001	0	0.026
LJ 6	0.009	*649.20	0	0.001	0	0	0.006
LJ 7	0.007	18.88	0	0.002	0.001	0.001	0.005
LJ 11	0.008	21.17	0	0.005	0.001	0	0.005
LJ 12	0.006	12.7	0	0.002	0.001	0	0.004
LJ 14	0.018	14.28	0.001	0.005	0.001	0.001	0.005
LJ 16	0.027	14.2	0.002	0.003	0.001	0.001	0.004
LJ 21	1.854	5988.99	0	0.002	0.001	0	0.005
LJ 24	0.228	12.31	0.018	0.011	0.005	0.009	0.011
LJ 27	0.079	*5573.37	0	0.001	0	0	0.011
LJ 29	0.037	337.07	0	0.001	0.001	0	0.006
LJ 30	0.28	35.17	0.008	0.005	0.001	0.004	0.011
LJ 32	0.185	43.23	0.004	0.002	0.002	0.003	0.006
LJ 34	0.097	36.01	0.003	0.001	0.002	0.002	0.005
LJ 36	0.017	56.61	0	0.001	0	0	0.004
LJ 38	0.012	*933.61	0	0.002	0.001	0	0.004
LJ 40	0.099	60.86	0.002	0.002	0.001	0.001	0.004
LJ 41	0.019	*1407.03	0	0.002	0	0	0.006
LJ 42	0.007	8.98	0.001	0.002	0	0	0.004
LJ 44	0.021	54.03	0	0.001	0.001	0	0.006
LJ 45	0.02	105.04	0	0.002	0	0	0.016
LJ 48	0.018	62.76	0	0.003	0.001	0	0.13
LJ 50	0.058	*4191.07	0	0.001	0.001	0	0.006
LJ 52	0.029	141.91	0	0.001	0	0	0.005
LJ 54	0.068	421.97	0	0.002	0	0	0.006
LJ 55	0.24	36	0.007	0.017	0.002	0.004	0.107
LJ 57	0.22	48.42	0.005	0.005	0.002	0.002	0.046
LJ 60	0.873	22.32	0.039	0.032	0.007	0.018	0.43
LJ 63bis	0.025	*1913.14	0	0.001	0.001	0	0.006
LJ 64	0.003	*199.62	0	0.001	0	0	0.007

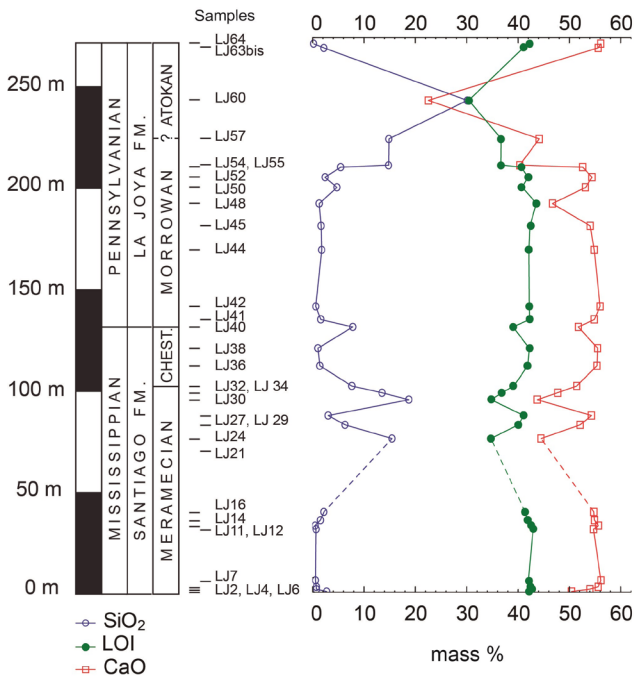


Figure 3. SiO₂ (blue) vs CaO (red) variation plots of strata from the La Joya formation. The dotted line interval is characterized by the occurrence of diagenetic events, such as silicification. LOI plot (green) displays similarities with CaO, as expected, due to the original calcitic mineralogy. See text for further information.

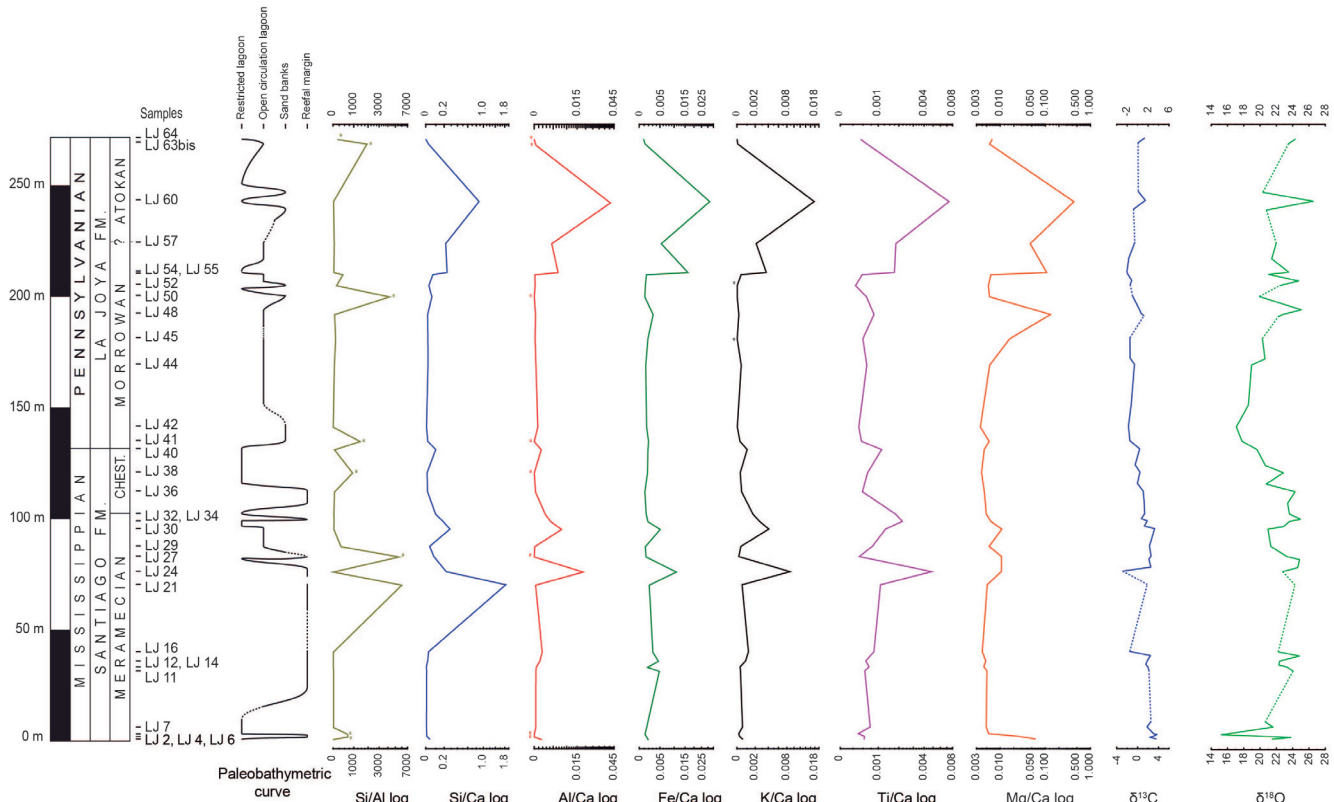


Figure 4. Logarithmic relationships between different elemental ratios of the La Joya section compared with the paleobathymetric curve and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values previously published in Villanueva-Olea *et al.* (2019). Asterisks indicate some of the elements in the ratio yielded a value below detection equipment limit ($<0.002\%$), which implies the corresponding peak is more accentuated than that shown in the plot. The values of $\delta^{13}\text{C}$ follow the standard of VPDB, whereas those for $\delta^{18}\text{O}$ are in VSMOW.

pattern. Only the first curve (Si/Al) does not exactly match the others in some parts, having several peaks scattered through the entire column, which could be attributable to low Al concentrations at the corresponding points.

For the Mg/Ca ratio curve (Figure 4), the lower half of the section (the Santiago fm. and the base of the La Joya fm.) presents comparatively lower values than the upper half and until LJ 45, where an increase starts until LJ 60, which has the higher value. After this rise, a fall in the last two samples was recorded, with values like those of the lower half of the section.

To recognize the source of the main elements analyzed, we used the Pearson correlation coefficient (r ; Pearson, 1895) between any major element (*i.e.* K, Mg, Fe, etc.) and Ti or Al (Table 3). High correlations (close to 1) between any major element and Ti-Al (low solubility elements) are considered proxies of continental erosion, because the elements were transported in the detrital fraction together with the Ti-Al from the continent. Hence, r values close

to 0, might indicate *in situ* precipitation at the sea bottom. To complement these analyses, dendrograms were additionally designed with the aid of the MVSP software (licensed to FSB), in order to strengthen the inferences obtained through the Pearson Correlation coefficient (Figure 5). Four experiments were carried out, using two algorithms and two coefficients. The

Table 3. Correlation coefficients of various elements from the La Joya section. p-values are indicated above the diagonal, whereas the coefficients are below it. Values highlighted in bold overpass the confidence level of 0.05.

	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	K	P
Si		0.04	0.02	0.08	0.43	0.16	0	0.02	0
Ti	0.37		0	0	0	0.02	0	0	0.01
Al	0.42	0.92		0	0	0	0	0	0.01
Fe	0.32	0.68	0.81		0	0	0	0	0.02
Mn	0.15	0.55	0.51	0.55		0.44	0.23	0	0.44
Mg	0.26	0.41	0.55	0.68	0.14		0	0	0
Ca	-0.92	-0.51	-0.6	-0.57	-0.22	-0.6		0	0
K	0.43	0.93	0.99	0.82	0.55	0.52	-0.6		0.01
P	0.75	0.45	0.48	0.43	0.14	0.5	-0.82	0.47	

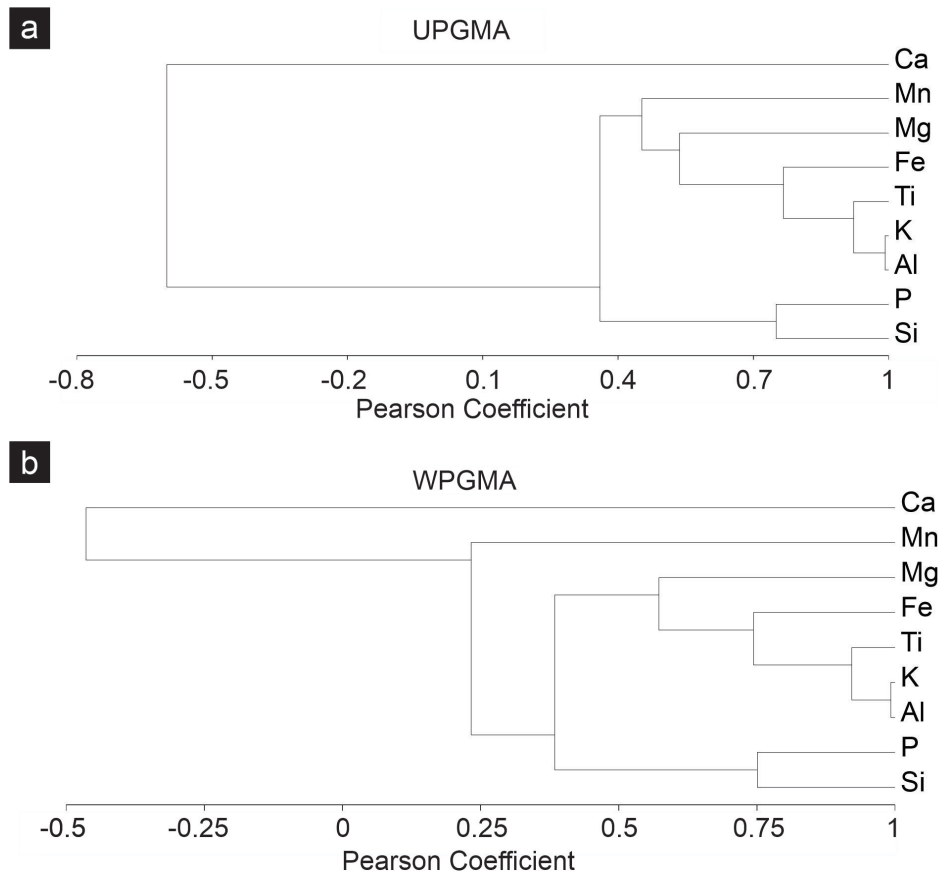


Figure 5. Dendrogram using both UPGMA and WPGMA clustering methods coupled with the Pearson Coefficient. Ca is independent of other elements, pointing to a calcitic mineralogy. The strong Al-K phenon depicted here (with values close to 1) can provide evidence the presence of illite/orthoclase. In addition, the progression from Ti towards Mn (encompassing Fe and Mg) can be related to silicates. Finally, the phenon Si-P could point to some sort of biogenic precipitation. See text for further details.

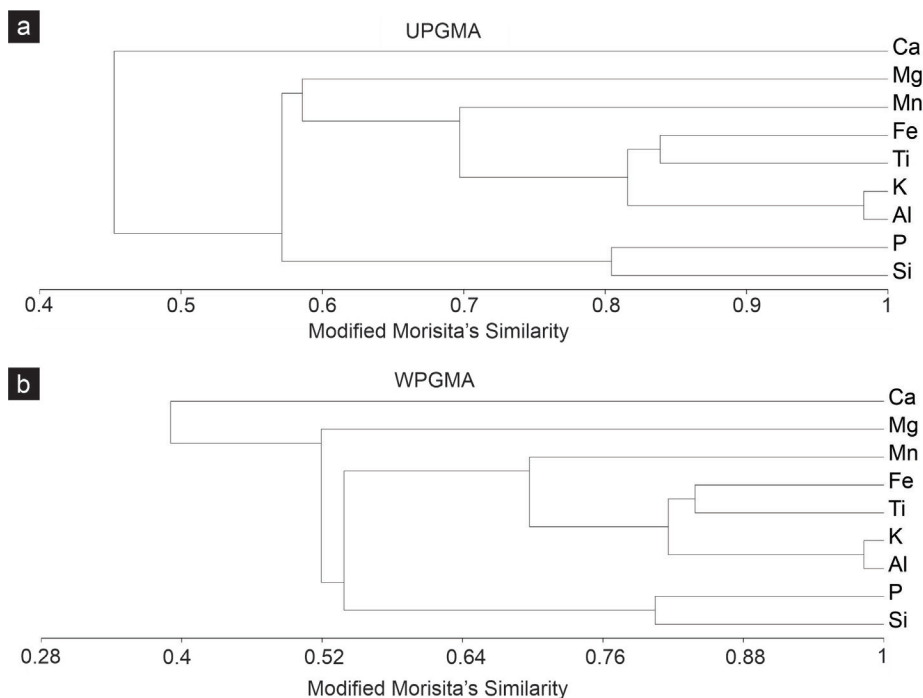


Figure 6. Dendrogram using both UPGMA and WPGMA clustering methods coupled with the Morisita Similarity Index. Note the similar topology compared with Figure 5, except for the phenon Fe-Ti (with values close to 0.85), which could indicate the precipitation of minerals such as ilmenite. See text for further explanation.

algorithms used were WPGMA (Weighted Pair Group Method with Arithmetic Mean) and UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean), both of them developed by Sokal and Michener (1958). These algorithms were coupled with both the Morisita Similarity Index (Morisita, 1959; Figure 6) and with the aforementioned Pearson Correlation Coefficient. Results were very similar, showing only slight topological variations in the obtained dendrograms (Figures 5 and 6).

5. Discussion

5.1. General interpretations of r values and elemental ratios

The most abundant element in rocks of the La Joya section was Ca, which was expected, since most of the rocks in the area are limestones. Si was the second most abundant element, which might have different sources. Dendrograms confirm that Ca concentrations are independent of those of other elements (Figures 5 and 6). This makes sense, because in limestone, the most abundant element is Ca (Flügel, 2010). On the other hand, silicon is essential to form silicates and feldspars, and it can thus carry other elements such as Al, K, Mg, Fe and Mn. The partial decoupling of Si regarding these elements is possibly linked to the fact that its source might be either quartz or biogenic silica (White, 2013), which may also account for its abundance, second to Ca. Furthermore, it must also be stressed that the coupling between silicon and P (Figures 5 and 6), despite the low concentrations of the latter, could be related to organic precipitation events, since the silicon concentration can be related to productivity episodes (Kristiansen and Hoell, 2002). Likewise, the interaction of silicon with phosphorus has been successfully studied in aquatic environments, to assess bioproductivity (Conley and Malone, 1992; Tallberg *et al.*, 2008). Nevertheless, more studies involving more elements, such as Ba (Liguori *et al.*, 2016) and its

relation to Mn (Carter *et al.*, 2020), would be required to sustain this assertion.

When we plot the r coefficients of the different elements, a negative correlation ($r = -0.6$) is observed between Al and Ca, which is attributed to the association of aluminum with clay and other clastic minerals. Conversely, positive correlations are found between Al, Fe, K, and Ti, which means all these elements constitute the clastic fraction of the samples. Complementarily, dendrograms with clustering algorithms between UPGMA/WPGMA and the Morisita Similarity Index (C_λ) indicate an association between Fe and Ti (Figure 6). This could mean a coprecipitation of these elements in minerals like ilmenite (Anthony *et al.*, 2005). However, this is not reflected in UPGMA/WPGMA-Pearson dendrograms (Figure 5). Therefore, to confirm this association, more studies would be necessary.

In all dendrograms (Figures 5 and 6), Mg and Mn are progressively more distant from the Al-K phenon, and from Si. This can serve as a complement to the explanation that Fe and Ti could be associated with each other, in addition to the fact that Mn can, like Ti, form oxides (White, 2013).

The strong positive correlation between Al and Ti implies that these elements have the same continental source and were transported as particles through continental runoff. The low positive correlation between Si-Al, Si-K, and Si-Fe (<0.43) indicates that not all the silicon in the platform results from chemical weathering of continental rocks, supporting the idea of a partly biogenic origin for Si. The same is true for Mg, when it is compared with Ti and Al: not all the Mg was carried in the insoluble fraction of weathering products, it could also be the product of precipitation at the sea bottom in Mg-enriched waters (*e.g.* Warren, 2000).

In any case, it must be stressed that Si concentrations are considerably high ($\bar{x} = 3.54$), when compared to other sources. This would imply that silicon must have another origin additional to silicates/feldspars (*e.g.* Tucker and Wright, 1990) which would include a biogenic source (*comp.* Reitner, 1992).

The concentrations of Na below the detection limit of the XRF equipment suggests a lack of deposition of Na-bearing plagioclase in the platform or chemical weathering of most of the plagioclase during the transportation from the continent into the platform. On the other hand, K-bearing minerals (potassium feldspars) are present in the platform and are more resistant to chemical weathering compared to plagioclases (Pye, 1986). K might also have been present in clay minerals deposited in the platform and it is similar to the abundance of Al. Furthermore, all dendrograms suggest a strong association between K and Al, forming a strong phenon ($C_\lambda = 0.983$; Figures 5 and 6), which reinforces the theory that supports orthoclase as a possible source of origin of these elements. However, another possibility could be that the cause of this association, as indicated by the dendrogram, could be the presence of illite, as this would explain the more or less strong correlation that exists between the K-Al phenon and elements such as Mg and Fe. Nevertheless, its rather low C_λ value (ca. 0.57 using UPGMA and 0.52 using WPGMA; Figure 6) in comparison with the K-Al value, in addition to the presence of other elements like Ti and Mn, which are not typical of illite, leads us favor orthoclase as the most likely option for the coprecipitation of K-Al.

Different proxies were used to evaluate the fluctuations of some variables in the platform, like biogenic productivity, using the Si/Al ratio; and erosion using Al/Ca, Fe/Ca, Mg/Ca, Ti/Ca, and K/Ca ratio and total carbonate content of the samples. Mg/Ca is a proxy that enables the abundance of magnesium in calcite to be seen, or the abundance of low magnesium calcite compared to high magnesium calcite or dolomite (Warren, 2000; Sánchez-Beristain *et al.*, 2016). It might also be used as a proxy of salinity of the water (Hönisch *et al.*, 2013). The r for Mg and Al has a value of 0.55, whereas this value for Mg and Ca is -0.60. Both r coefficients are interpreted as Mg found mostly in the clastic fraction rather than being part of high magnesium calcite or dolomite. Therefore, the Mg/Ca

ratio can be regarded as a proxy of continental erosion, as are all previously mentioned ratios.

The K/Ca, Fe/Ca, and Al/Ca ratios with minimum values close to 0 (Table 2) mean a depletion of these elements in the carbonates. Low Fe/Ca ratios can be explained because of the absence of ferromagnesian minerals (Creamean *et al.*, 2014), whereas low Al/Ca values mean a reduced input of Al-rich clays (Kraft *et al.*, 2013).

5.2. Geochemical interpretations for the Santiago formation

The Al/Ca, Fe/Ca, K/Ca, and Ti/Ca ratios show a similar pattern with low values through much of the Meramecian (Table 2). The low Fe/Ca ratios are interpreted here as indicating no entrance of Fe-rich minerals, whereas the low Al/Ca values mean a reduced input of Al-rich clays. At the end of this stage, in the sample LJ 24, there is a conspicuous peak which is indicative of riverine influx with detrital input into the marine platform environment. That assumption is supported by the correlation of a negative excursion observed in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for the same sample.

The pattern of low continental inputs into the external marine platform environments is similar to the paleobathymetric curve which shows deeper sea levels for this time and, hence, a major distance from the coast, indicating a reduced river input. The paleobathymetric curve shifts from deeper to shallower conditions approximately when the elemental ratio curves peak in the final part of the Meramecian. The return to deeper conditions agrees with the return of low levels at the base of the Chesterian, even if the shallowing at the end of the Chesterian does not seem to cause another peak in the elemental ratios. This is interpreted as indicating no entrance of detrital sediments into the platform at that time. The behavior of the Mg/Ca ratio in the Mississippian part of the section is like that of the other erosion proxies, which proves the magnesium is part of the clastic fraction.

The Si/Ca curve (Figure 4) shows a slightly different pattern in relation to the other erosion curves already mentioned, but it is quite similar to the Si/Al curve, with a peak in LJ 21, a little before the peaks of the other elemental ratios. Since the Si/Al ratio indicates the abundance of continental quartz, biogenic silica or both, the peak in Si/Al, also present in Si/Ca but not displayed in the other elemental curves means that Si does have a biogenic source rather than continental and is considered a proxy of productivity. For the peak in LJ 30, the possible source of this biogenic silica could be attributed to the presence of sponge spicules seen in the microfacies analysis of the section (Villanueva-Olea *et al.*, 2019).

A previous study on $\delta^{18}\text{O}$ (Villanueva-Olea *et al.*, 2019) shows that this proxy varied greatly throughout all the Meramecian, but, on average, the curve tends to higher values. This was interpreted as a period with cool temperatures (even if it was not glacial as such), with some warming periods. During this time, the values of elemental erosion ratios remained low and uniform, except for the peaks in the samples already mentioned, which does not seem to agree with the unstable pattern of the $\delta^{18}\text{O}$ curve.

A decrease in sea level causes the continental surface to be easily exposed to weathering and erosion. However, for this mechanism to happen, wet conditions must be present. This encourages the removal of chemically weathered sediment. Therefore, wetter and colder conditions are necessary to produce an increase in the riverine influx of major continental elements. Since we only have cold conditions for this time, no substantial increase in detrital input is seen in the platform.

By this time, the $\delta^{13}\text{C}$ isotopic signature has a slight and uniform tendency to higher levels (1–4‰) that begin at the base of the section (Meramecian) to the end of the Chesterian, except for two negative peaks in LJ 16 and in LJ 24 (Figure 4). This uniformity fits well with the patterns in elemental ratios with scarce input by this time. The interpretation here is a platform with nearly similar conditions, except for some environmental

shifts (from margin platform reef to more restricted, shallower lagoon) in a context of a cool climate, with low inputs of organic matter and detrital minerals from the continent. This is corroborated by other studies (*e.g.* Fielding *et al.*, 2008) that bring evidence of short glaciation pulses during the Mississippian of Gondwana. Caputo *et al.* (2008) reported the occurrence of short-lived glacial events, one of them during the Visean (Meramecian) of South America and during the earliest Serpukhovian (Upper Mississippian: latest part of the Meramecian) of South America and Africa. These events had an impact on the water chemistry globally with higher $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values during some part of the Mississippian (*i.e.* latest Tournaisian–latest Visean boundary sensu Frank *et al.*, 2008).

5.3. Geochemical interpretation for the Mississippian–Pennsylvanian boundary

For the Mississippian–Pennsylvanian boundary (found in sample LJ 40), the Ti/Ca, K/Ca, Al/Ca, and Si/Ca ratios show a slight upturn towards higher values, whereas the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ remain in low values related with those of the Mississippian (Figure 4). The slight increases of Ti, K, Al, and Si together with ^{18}O impoverishment could indicate a major contribution of freshwater to the platform (Kulacki and Cardinale, 2012), which is ^{16}O enriched. This means the establishment of warmer and more humid conditions in a regional scale, which promoted higher erosion rates of major elements and organic matter coming from land. Facies belts data from LJ 40 to LJ 42 (Morrowan) indicate a switch from lagoon to margin-platform close to the slope environments, as well as a decrease in $\delta^{18}\text{O}$ which are thought to respond to wetter and warmer conditions that enabled a rise in sea level.

This contrasts with a major event of glaciation, recorded at the Mississippian–Pennsylvanian boundary (Holz *et al.*, 2008) based on stratigraphical and paleontological evidence in Gondwana (Fielding *et al.*, 2008 and references therein) and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ positive excursions

recorded throughout the world (Mii *et al.*, 1999; Frank *et al.*, 2008). Only $\delta^{18}\text{O}$ shows a positive excursion that initiates slightly later than the M–P boundary, but the same positive tendency in $\delta^{13}\text{C}$ values is not recorded. This might be related to the closeness to the coastline because of sea-level changes which locally change the water chemistry in more restricted waters, not reflecting the immediate changes in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values.

5.4. Geochemical interpretations for the La Joya formation

After LJ 42, an upturn in $\delta^{18}\text{O}$ values is observed, which can be correlated with the previously mentioned glacial event occurring during the late Mississippian–early Pennsylvanian (Veevers and Powell, 1987; Crowell, 1999; Isbell *et al.*, 2003; Fielding *et al.*, 2008, among others). The element ratio curves support this pattern for much of the Morrowan (LJ 42 - LJ 54) for the occurrence of low levels of continental elements brought to the platform (Figure 4).

For the Mg/Ca ratio curve, a conspicuous peak is observed only in the sample LJ 48 (Figure 4) and does not follow the pattern seen in the other curves, including the Si/Al ratio curve, meaning the magnesium for this sample, is a product of precipitation as high magnesium calcite or dolomite, and might represent more saline conditions. However, it would be necessary to carry out an analysis of sample LJ 48 by means of EDS to determine the original composition of the sample and the magnesium content in it.

Regarding LJ 50, Si/Al strongly rises (Figure 4), without a corresponding increase in the other elemental ratios, perhaps as a result of biogenic precipitation of Si, even if there is no evidence of a biogenic source for this sample (Villanueva-Olea *et al.*, 2019). Another possible explanation is a shift in provenance of the terrigenous material that comes to the platform in the form of volcanic glass, which might be correlated with active volcanic activity. Such activity can be associated with the orogenic event

Ouachita-Marathon-Sonora, when Gondwana collided with Laurentia to form Pangea (Poole *et al.*, 2005) or to the submarine volcanic activity due to the closeness to the mid-ocean ridge located in the Rheic Ocean by that time (Palafox-Reyes, 2011). However, aside from this possible shift in the source of silica, we did not find any other evidence of such correlation with this orogenic activity, except for the thin layer of tuff in LJ 23 from the Santiago fm. Alternatively, a simpler explanation could involve a major quartz input into the carbonates.

For the last part of the Morrowan some peaks are present which correlate with paleobathymetric changes (from LJ 50 to LJ 64). They could be assigned to wetter and warmer conditions; however, the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ curves do not support this assumption, as $\delta^{13}\text{C}$ is maintained at relatively constant values and $\delta^{18}\text{O}$ has a positive tendency (Figure 4), which is evidence of a cooling climate. For this reason, we believe the rise in the deposit of detrital elements by freshwater streams must be on a local/regional rather than global scale.

However, in the case of the LJ 60 level, it appears with the most conspicuous peaks in detrital elemental ratios (except Si/Al). This behavior correlates to a shift to shallower conditions as evidenced by the paleobathymetric curve. This shallowing may be due to a regression in a context of glaciation, which is supported by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic data, with positive peaks for this level (Figure 4).

6. Conclusion

The study of major element ratios in sediments from the La Joya section in the Sierra Agua Verde, Sonora, agrees with the previous work on the area about microfacies and stable isotope analyses. Some conclusions can be drawn:

1. Some of the higher Mg/Ca values are interpreted as high evaporation rates, but most of them are the result of Mg coming from the continent in the detrital fraction of the samples analyzed.

2. The ratio Si/Al, when similar in behavior to Si/Ca, has been interpreted as a proxy of productivity for the presence of siliceous organisms (*i.e.* sponges).
3. The use of correlation coefficients has shown that not all Si deposited in the platform was removed together with the Al, Fe, or K by chemical weathering of continental rocks, but one part of it must be of autochthonous biogenic source, which can be confirmed by means of the presence of siliceous sponges spicules.
4. Plotting dendrograms aided us in discerning the relationships between elements in a much clearer way, thus leading us to the conclusion that element pairs such as Al-K might be related to minerals like orthoclase. In addition, this method led to a possible association between Ti and Fe, linked to ilmenite, and to a Si-P phenon, possibly related to bioproductivity episodes. Si, however, might also in addition be related to quartz input.
5. Most of the Mississippian corresponds to low values of elemental ratio inputs, with some remarkable peaks that indicate weathering and erosion through riverine influx into the carbonate platform. This tendency is accompanied by high $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values, which were decreasing until the end of the Mississippian, and are indicative of cooling conditions, but with some warming and wetter periods correlating with these elemental positive peaks, when weathering and erosion are enhanced.
6. Unlike the overwhelming evidence of the establishment of glacial conditions in the Mississippian–Pennsylvanian boundary of the La Joya section, slight increases of some continental elements are shown, together with lower $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values, which are interpreted as a major influx of freshwater into the platform, perhaps because of warmer and more humid conditions regionally.
7. The isotopic evidence of a glaciation appears after LJ 42 (posterior to the M-P

boundary), where the $\delta^{18}\text{O}$ curve starts to change to more positive values, supported by the relatively low values in the detrital elemental ratios through much of the Morrowan. Some peaks could be attributed to a change in the source of Si derived from volcanic activity in a context of orogenic events, when Gondwana collided with Laurasia. Yet, more studies are necessary in order to fully ascertain the extent of such volcanic activity.

8. For the last part of the section corresponding to the end of the Morrowan and Atokan, an increased input of detrital elements is assigned to local or regional conditions, as this pattern is not replicated for $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotope values, which indicate cooler temperatures.

Acknowledgements

The authors wish to thank Rufino Lozano and Patricia Girón for the technical support at the X-ray fluorescence Laboratory, Instituto de Geología, UNAM. Funding was provided by CONACYT (Grant No. 165826) and ECOS Francia-México (Grant No. M13-U01 “Evolución de los Ecosistemas del Paleozoico de México”). Additionally, we would like to acknowledge Matthew Lovegrove and Andrea Caballero-Ochoa for reading and making comments on an early version of this manuscript, as well as for revising the English. Finally, we wish to express our gratitude to the two anonymous reviewers for their comments and suggestions, which significantly improved the quality of our manuscript. We also extend our thanks to Dr. Josep A. Moreno-Bedmar (Mexico City) for his assistance during the editorial process and to Sandra Ramos, M. Sc., for the technical editing of our manuscript.

References

- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., & Nichols, M. C. (Eds.). (2005). Ilmenite. In *Handbook of Mineralogy*, Mineralogical Society of America. Retrieved May 3, 2023, from <https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/ilmenite.pdf>

- Buitrón-Sánchez, B. E., Gómez-Espinosa, C., Almazán-Vázquez, E. & Vachard, D. (2007). A late Atokan regional encrinite (early late Moscovian, Middle Pennsylvanian) in the Sierra Agua Verde, Sonora state, NW Mexico. *In* J. J. Álvaro, M. Aretz, A. Munnecke, D. Vachard & E. Vennin (Eds.), *Palaeozoic Reefs and Bioaccumulations: Climatic and Evolutionary Controls* (vol. 275, pp. 201–209), Geological Society of London Special Publications.
- Buitrón-Sánchez, B. E., Chacón-Wences, O., Vachard, D., Palafox-Reyes, J. J., Jiménez-López, J. C., & Sour-Tovar, F. (2015). Pennsylvanian biota of the Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico: biostratigraphic and paleogeographic considerations. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86, 521–527. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.006>
- Caputo, M. V., Melo, J. H. G., Streef, M., & Isbell, J. L. (2008). Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America. *In* C. R. Fielding, T. D. Frank, & J. L. Isbell (Eds.), *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space* (Geological Society of America Special Papers, 441, pp. 161–173), The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2008.2441\(11\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(11))
- Carter, S. C., Paytan, A., & Griffith, E. M. (2020). Toward an improved understanding of the marine barium cycle and the application of marine barite as a paleoproductivity proxy. *Minerals*, 10(5), 421. <https://doi.org/10.3390/min10050421>
- Conley, D. J. & Malone, T. C. (1992). Annual cycle of dissolved silicate in Chesapeake Bay: implications for the production and fate of phytoplankton biomass. *Marine Ecology Progress Series*, 81, 121–128. DOI: 10.3354/meps081121
- Craigie, N. (2018). *Principles of elemental chemostratigraphy. A practical user guide*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71216-1>
- Creamean, J. M., Spackman, J. R., Davis, S. M., & White, A. B. (2014). Climatology of long-range transported Asian dust along the west coast of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(12), 171–185. <https://doi.org/10.1002/2014JD021694>
- Crowell, J. C. (1999). *Pre-Mesozoic ice ages: their bearing on understanding the climate system*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/MEM192>
- Fielding, C. R., Frank, T. D., & Isbell, J. L. (2008). The late Paleozoic ice age—A review of current understanding and synthesis of global climate patterns. *In* C. R. Fielding, T. D. Frank, & J. J. Isbell (Eds.), *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space* (Geological Society of America Special Papers, 441, pp. 343–354), The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2008.2441\(24\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(24))
- Flügel, E. (2010). *Microfacies of carbonate rocks. Analysis, interpretation, and application*. Springer.
- Frank, T. D., Birgenheier, L. P., Montañez, I. P., & Fielding, C. R. (2008). Late Paleozoic climate dynamics revealed by comparison of ice-proximal stratigraphic and ice-distal isotopic records. *In* C. R. Fielding, T. D. Frank, & J. L. Isbell (Eds.), *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space*. (Geological Society of America Special Papers, 441, pp. 1–12), The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2008.2441\(23\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(23))
- Gómez-Espinosa, C., Vachard, D., Buitrón-Sánchez, B. E., Almazán-Vázquez, E. & Mendoza-Madera, C. (2008). Pennsylvanian fusulinids and calcareous algae from Sonora (northwestern Mexico), and their biostratigraphic and palaeobiogeographic implications. *Comptes Rendus Palevol*, 7, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2008.04.001>
- Hakimi, M. H., Mohialdeen, I. M. J., Abdullah, W. H., Wimbledon, W., Makeen, Y. M. & Mustapha, K. A. (2015). Biomarkers and inorganic geochemical elements of Late Jurassic–Early Cretaceous limestone sediments from Banik Village in the Kurdistan Region, Northern Iraq: implications for origin of organic matter and depositional environment conditions. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9407–9421. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1863-y>
- Haq, B. U. & Schutter, S. R. (2008). A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322(5898), 64–68. <https://doi.org/10.1126/science.1161648>
- Herron, M. M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5), 820–829. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Holz, M., Souza, P. A. & Iannuzzi, R. (2008). Sequence stratigraphy and biostratigraphy of the Late Carboniferous to Early Permian glacial succession (Itararé subgroup) at the eastern-southeastern margin of the Paraná Basin, Brazil. *In* C. R. Fielding, T. D. Frank, & J. J. Isbell (Eds.), *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space* (Geological Society of America Special Papers, 441, pp. 115–129), The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2008.2441\(08\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(08))
- Hönisch, B., Allen, K. A., Lea, D. W., Spero, H. J., Eggins, S. M., Arbuszweski, J., De Menocal, P., Rosenthal, Y., Russell, A. D. & Elderfield, H. (2013). The influence of salinity on Mg/Ca in planktic foraminifers – Evidence from cultures, core-top sediments and complementary $\delta^{18}\text{O}$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 121(15), 196–213. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.07.028>
- Hu, J., Li, Q., Song, C., Wang, S. & Shen, B. (2017). Geochemical characteristics of the Permian sedimentary rocks from Qiangtang Basin: Constraints for paleoenvironment and paleoclimate. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(3), 271–282. <https://doi.org/10.3319/TAO.2016.08.08.01>
- Isbell, J. L., Miller, M. F., Wolfe, K. L., & Lenaker, P. A. (2003). Timing of late Paleozoic glaciation in Gondwana: Was glaciation responsible for the development of northern hemisphere cyclothem? *In* M. A. CHAN & A. W. Archer (Eds.), *Extreme depositional environments: mega end members in geologic time*, (Geological Society of America Special Papers, 370, pp. 5–24), The Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2370-1.5>
- Johansson, E., Wold, S. & Sjödin, K. (1984). Minimizing effects of closure on analytical data. *Analytical Chemistry*, 56(9), 1685–1688. <https://doi.org/10.1021/ac00273a034>
- Kraft, S., Frank, M., Hathorne, E. C., & Weldeab, S. (2013). Assessment of seawater Nd isotope signatures extracted from foraminiferal shells and authigenic phases of Gulf of Guinea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 121, 414–435. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.07.029>
- Kristiansen, S. & Hoell, E. E. (2002). The importance of silicon for marine production. *Hydrobiologia*, 484, 21–31. <https://doi.org/10.1023/A:1021392618824>
- Kulacki, K. J. & Cardinale, B. J. (2012). Effects of nano-titanium dioxide on freshwater algal population dynamics. *PLoS ONE*, 7(10), e47130. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047130>
- Liguori, B. T. P., De Almeida, M. G. & De Rezende, C. E. (2016). Barium and its importance as an indicator of (paleo)productivity. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(4), 2093–2103. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620140592>
- Lozano, R. & Bernal, J. P. (2005). Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 329–344.
- Lozano-Santa Cruz, R., Verma, S. P., Girón, P., Velasco, F., Morán-Zenteno, D., Viera, F., & Chávez, G. (1995). Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas. *Actas INAGEQ I*, 203–208.
- Mii, H., Grossman, E. L., & Yancey, T. E. (1999). Carboniferous isotope stratigraphies of North America: Implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation. *Geological Society America Bulletin*, 111(7), 960–973. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111%3C0960:CISONA%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111%3C0960:CISONA%3E2.3.CO;2)
- Mii, H., Grossmann, E. L., Yancey, T. E., Chuvashov, B. & Egorov, A. (2001). Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform—evidence for the onset of mid-Carboniferous glaciation. *Chemical Geology*, 175(1–2), 133–147. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00366-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00366-1)
- Minjárez-Sosa, I., Ochoa-Granillo, J. A., & Sosa-León, P. (1993). Geología de la Sierra Agua Verde, NE de Villa Pesqueira (Matape)

- (abstract). In C. González-León. & E. L. Vega-Granillo (Eds.), *Tercer Simposio de la Geología de Sonora y Áreas Adyacentes, Hermosillo, Sonora, México*, 83–85.
- Morisita, M. (1959). Measuring of interspecific association and similarity between communities. *Memoirs of the Faculty of Science Kyushu University, Series E*, 3(1), 65–80.
- Navas-Parejo, P., Palafox, J. J., Villanueva, R., Buitrón-Sánchez, B. E., & Valencia-Moreno, M. (2017). Mid-Carboniferous shallow-water conodonts from northwest Mexico. *Micropaleontology*, 63(6), 383–402.
- Ochoa-Granillo, J. A., & Sosa-León, J. P. (1993). *Geología y estratigrafía de la Sierra Agua Verde con énfasis en el Paleozoico* (Bachelor dissertation, Universidad de Sonora). Hermosillo, Sonora, México.
- Palafox-Reyes, J. J. (2011). *Du Craton au Rheique: Le nord et le centre de l'état du Sonora (Mexique) au Paleozoïque supérieur (Devonien-Pennsylvanien), lithostratigraphie, biostratigraphie, approche géochimique et implications géologiques* (PhD dissertation, Université de Lille 1).
- Pearson, K. (1895). Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(1), 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- Pingitore, N. E. Jr. & Engle, M. A. (2022). Compositional closure—its origin lies not in mathematics but rather in nature itself. *Minerals*, 12(1), 74. <https://doi.org/10.3390/min12010074>
- Poole, F. G., Stewart, L. H., Repetski, J. E., Harris, A. G., Ross, R. J. Jr., Ketner, K. B., Amaya-Martínez, R., & Morales-Ramírez, J. M. (1995). Ordovician carbonate-shelf rocks of Sonora, Mexico. In J. D. Cooper, M. L. Droser & S. C. Finney (Eds.), *Ordovician Odyssey: Short Papers for the Seventh International Symposium on the Ordovician System*, (Pacific Section, 77, pp. 267–275), Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.
- Poole, F. G., Perry, W. J. Jr, Madrid, R. J., & Amaya-Martínez, R. (2005). Tectonic synthesis of the Ouachita-Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia: Stratigraphic and structural implications for timing of deformational events and plate-tectonic model. In T. H. Anderson, J. A. Nourse, J. W. McKee, & M. B. Steiner (Eds.), *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives*, (Geological Society of America Special Papers, 393, pp. 543–596), The Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2393-0.543>
- Pye, K. (1986). Mineralogical and textural controls on the weathering of granitoid rocks. *Catena*, 13(1–2), 47–57. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(86\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(86)80004-2)
- Reitner, J. (1992). Coralline spongien: Der Versuch einer phylogenetisch-taxonomischen Analyse. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen Reihe E, 1*, 1–352. Berlin.
- Repetski, J. E., Harris, A. G., Stewart, J. H., Poole, F. G. & Morales-Ramírez, J. M. (1985). Early Ordovician conodonts from central Sonora, Mexico (abstract). In *Fourth European Conodont Symposium (Ecos IV)*, *Nothingham, U.K.*, 25–26.
- Ross, D. J. K., & Bustin, R. M. (2009). Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: Examples from the Devonian–Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin. *Chemical Geology*, 260(1–2), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.027>
- Sánchez-Beristain, F., García-Barrera, P. & Calvillo-Canadell, L. (2016). Mares calcíticos y aragoníticos: efectos en formadores de arrecifes a través del tiempo. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 19(1), 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2016.02.005>
- Sokal, R. R. & Michener, C. D. (1958). A statistical method for evaluating systematic relationships. *University of Kansas Science Bulletin*, 38, 1409–1438.
- Stewart, J. H., McMenamin, M. A. S. & Morales-Ramírez, J. M. (1984). Upper Proterozoic and Cambrian rocks in the Caborca region, Sonora, Mexico; physical stratigraphy, biostratigraphy, paleocurrent studies, and regional relations. *U.S. Geological Survey Professional Papers*, 1309, 1–36. <https://doi.org/10.3133/pp1309>
- Stewart, J. H., Madrid, R. J., Poole, F. G., & Ketner, K. B. (1988). Studies of Late Proterozoic, Paleozoic, and Triassic rocks in Sonora, Mexico (abstract). In *Segundo Simposio sobre Geología y Minería de Sonora Hermosillo, Sonora, México*, Eds. E. Almazán-Vázquez & M. A. Fernández-Aguirre, pp. 60–62.
- Stewart, J. H., Poole, F. G., Harris, A. G., Repetski, J. E., Wardlaw, B. R., Mamet, B. L. & Morales-Ramírez, J. M. (1999). Neoproterozoic(?) to Pennsylvanian inner-shelf, miogeoclinal strata in Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 16, 35–62.
- Tallberg, P., Tréguer, P., Beucher, C. & Corvaisier, R. (2008). Potentially mobile pools of phosphorus and silicon in sediment from the Bay of Brest: Interactions and implications for phosphorus dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.06.003>
- Török, Á., Licha, T., Simon, K. E. A., & Siegesmund, S. (2010). Urban and rural limestone weathering; the contribution of dust to black crust formation. *Environmental Earth Sciences*, 63(4), 675–693. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0737-6>
- Tucker, M. E. & Wright, V. P. (1990). *Carbonate Sedimentology*. Blackwell, Oxford. <http://dx.doi.org/10.1002/9781444314175>
- Veevers, J. J. & Powell, C. M. (1987). Late Paleozoic glacial episodes in Gondwanaland reflected in transgressive-regressive depositional sequences in Euramerica. *Geological Society of America Bulletin*, 98, 475–487.
- Villanueva-Olea, R., Barragán, R., Palafox-Reyes, J. J., Jiménez-López, J. C. & Buitrón-Sánchez, B. E. (2019). Microfacies and stable isotope analyses from the Carboniferous of the La Joya section in Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(3), 585–607. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2019v71n3a1>
- Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1–3), 1–81. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- White, W. M. (2013). *Geochemistry*. Wiley-Blackwell.
- Wicander, R. & Monroe, J. S. (2010). *Historical geology: evolution of Earth and life through time*. Brooks/Cole Cengage Learning.
- Xianzheng, Z., Xiugang, P., Wemya, J., Lihong, Z., Fengming, J., Dunqing, X., Lixin, F. & Hongjun, L. (2019). An exploration breakthrough in Paleozoic petroleum system of Huanghua Depression in Dagang Oilfield and its significance, North China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(4), 651–663. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60224-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60224-7)
- Yuan, Y., Chen, J., Liang, J., Xu, M., Lei, B., Zhang, Y., Cheng, Q. & Wang, J. (2019). Hydrocarbon geological conditions and exploration potential of Mesozoic–Paleozoic marine strata in the South Yellow Sea Basin. *Journal of Ocean University of China*, 18, 1329–1343. <https://doi.org/10.1007/s11802-019-3853-2>

Sistematización de la Colección Paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur

Systematization of the Regional Museum of Anthropology and History of the Baja California Sur Paleontological Collection

Morales Ortega, Priscila¹; Hernández Cisneros, Atzcalli Ehécatl^{2,*}

¹ Posgrado en Ciencias Marinas y Costeras (CIMACO), Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), Carretera al sur km 5.5, A. P. 19-B, C.P. 23080, La Paz, Baja California Sur, México.

² Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, C. P. 83250, Hermosillo, Sonora.

* atz_nemesis@hotmail.com

Resumen

El estado de Baja California Sur se caracteriza por su riqueza paleontológica, la cual ha sido de gran interés científico, económico y social. Sin embargo, varios factores limitan la investigación paleontológica en la región; uno de ellos es el exiguo desarrollo de las colecciones de carácter científico con registro fósil, a pesar de que existe gran interés en la comunidad científica nacional y extranjera sobre el tema. En el presente trabajo se realizó una sistematización de la creciente colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur. Se documentaron y catalogaron un total de 371 ejemplares fósiles, y se clasificaron 41 taxones a nivel género. El 68.4% del catálogo se constituyó por invertebrados, el 26.2% por vertebrados, el 4.1% por maderas fósiles, y el 1.4% por icnofósiles y réplicas. Finalmente, el ordenamiento de esta colección permitió reconocer parte de las condiciones y estado actual en las que se encuentran las colecciones fósiles del estado. La presente colección constituye el primer registro fósil documentado y catalogado en el estado. Además, cabe resaltar que visibilizar las colecciones, no solo implica la perspectiva científica, sino también realzar una relevante entidad social, la cual trae beneficios de desarrollo en términos económicos, conocimiento, salud, identidad, conservación y protección del patrimonio biocultural estatal y del país.

Palabras clave: Baja California Sur, colección paleontológica, fósiles, INAH.

Abstract

Baja California Sur state is characterized by its paleontological richness, which has been of great scientific, economic and social interest. However, several factors limit paleontological research in the region; one of them is the meagre development of scientific collections with fossil records, even though there is great interest in the national and foreign scientific community on the topic. In the present work, a systematization of the growing paleontological collection of the Regional Museum of Anthropology and History of Baja California Sur was carried out. From the collection, 371 fossil specimens were documented and catalogued, and 41 taxa were classified at the genera level. 68.4% of the catalogue comprises invertebrates, 26.2% are vertebrates, 4.1% are fossil woods, and 1.4% are ichnofossils and casts. Last, the organization of this collection allowed us to recognize part of the current conditions and state of the fossil collections in the state. The present collection constitutes the state's first documented and catalogued fossil record. Furthermore, it should be noted that making collections visible not only implies a scientific perspective but also highlights a relevant social entity, which brings development benefits in terms of economic, knowledge, health, identity, conservation, and protection of biocultural heritage in the state and at the national level.

Keywords: Baja California Sur, fossils, INAH, paleontological collection.

Cómo citar / How to cite: Morales Ortega, P., & Hernández Cisneros, A. E. (2025). Sistematización de la Colección Paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur. *Paleontología Mexicana*, 14(1), ###-###.

Manuscrito recibido: Abril 27, 2024.

Manuscrito corregido: Octubre 16, 2024.

Manuscrito aceptado: Octubre 18, 2024.



<https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2025.14.1.390>

1. Introducción

Las colecciones paleontológicas forman parte de las Colecciones Biológicas o Naturales, cuya utilidad incrementa al asociarse con otras colecciones dentro de los museos de historia natural, universidades o institutos de investigación (Allmon, 1994; Thomson *et al.*, 2008; NASEM, 2020). En México, la institución encargada de la “investigación, conservación, restauración, recuperación o utilización revistan interés paleontológico”, ya sean bienes inmuebles o muebles, es el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), bajo la jurisdicción de la Secretaría de Cultura (DOF, 2018). Los bienes muebles como las colecciones paleontológicas están protegidas por la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas –LFM-ZAAH–, Art. 36; fracción IV; la Ley General de Bienes Nacionales –LGBN–, Art. 3, fracción III y IV; y Art. 6, XVIII; y la Ley Orgánica del INAH –LO-INAH–, Art. 2, fracción XII (Cristín y Perrilliat, 2011; Morales-Ortega, 2020).

Por otra parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) tiene registradas 23 colecciones paleontológicas (Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; CONABIO, 2023). No obstante, no es claro cuantas de ellas son científicas, de docencia, exhibición o de otro tipo. De acuerdo con los datos publicados de la CONABIO, 19 se encuentran en la Ciudad de México, 16 son de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México –UNAM (estas “16 colecciones” en realidad conforman una sola colección con subsecciones; véase Buitrón-Sánchez *et al.*, 2020; CONABIO, 2023). Otra colección identificada es la Colección Micropaleontológica Sección Ostracoda del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. A esta última, se suma la colección paleontológica del Museo de Geología de la UNAM, que es distinta de la Colección Nacional de Paleontología (CNP) del Instituto de Geología (IGL) de la UNAM y que no está registrada por la CONABIO. Por último, la CONABIO reconoce la Colección Paleontológica

de Zoología del INAH, también localizada en la Ciudad de México. Los otros registros de colecciones paleontológicas de la CONABIO pertenecen a los estados de Baja California Sur (Colección de Referencia para Zoología, Arqueozoología y Paleontología, Universidad Autónoma de Baja California Sur); Zacatecas (Colección Científica del Museo de Historia Natural, Universidad Autónoma de Zacatecas), Jalisco (Colección Particular de Federico Solórzano, Museo de Paleontología de Guadalajara Federico A. Solórzano Barreto; Partida de la Cruz, 2020) y Chiapas (Colección Paleontológica, Museo de Paleontología Eliseo Palacios Aguilera; Carbot-Chanona, 2015). En contraste, Morales-Ortega *et al.* (2021) mencionan que al menos 142 museos con material paleontológico se registraron en el Sistema de Información Cultural Nacional durante el 2018. Debe recalarse que históricamente las universidades y centros de investigación son los principales entes que han desarrollado la investigación sobre los fósiles mexicanos, a su vez han jugado un rol importante en salvaguardar y promover el patrimonio paleontológico nacional (Gío-Argáez y Rodríguez-Arévalo, 2003; Carreño y Montellano-Ballesteros, 2005; Morales-Ortega *et al.*, 2021).

En Baja California Sur existen seis espacios con acervo paleontológico: el Museo Comunitario de Mulegé (fundado en 1993); el Museo Comunitario Sal, Arena y Mar (MUSAM; fundado en 2023); el Museo de Historia Natural de Cabo San Lucas (fundado en 2006); el Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur (fundado en 1981); la bodega del Centro INAH de La Paz; y el Museo de Historia Natural de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (MHN-UABCS, fundado en 1994). Cabe destacar que solamente las colecciones paleontológicas del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur y de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), son las únicas entidades locales que han generado investigaciones paleontológicas del estado. Por ejemplo, estudios sobre los equinoideos del Eoceno (Morales-Ortega *et al.*, 2015), o el registro de *Mammuthus*

columbi (Rochín-Bañaga *et al.*, 2017). En general, los museos mencionados son espacios de exposición museográfica, mientras que el Centro INAH-La Paz (bodega) y el depósito Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur resguardan materiales fósiles con un registro parcial ante el INAH. Por otro lado, la colección de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (MHN-UABCS) es la única colección de referencia científica hasta ahora.

El Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur, fue fundado en 1981, y cuenta con 44 años de existencia (ISC, 2024). Es uno de los principales centros culturales del estado de Baja California Sur (BCS) que ha influido en la construcción de la comunidad sudcaliforniana y su identidad. Resguarda una parte importante de la historia humana y natural del estado, ya que ha adquirido a través del tiempo diversos objetos de naturaleza arqueológica, antropológica, histórica y paleontológica. Generando una importante colección de elementos históricos y naturales. Actualmente, se está realizando un gran esfuerzo por sistematizar y ordenar sus diversas colecciones entre ellas la de restos fósiles. En este trabajo se realizó la sistematización (clasificación, catalogación y ordenamiento) de la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur. Con el objetivo de contribuir a los esfuerzos por proteger y preservar el patrimonio paleontológico nacional presente en el estado.

2. Materiales y metodos

El trabajo de sistematización y revisión de la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur se realizó bajo el proyecto “Análisis y Catalogación de las Colecciones Arqueológicas y Paleontológicas del Centro INAH BCS”, con autorización de los consejos de Paleontología y Arqueología del INAH, oficios No. 401.1S.3-2022/1151 y No. 401.1S.3-2022/392. Las dos actividades principales realizadas dentro de la

bodega del museo fueron: (1) la revisión exhaustiva del material fósil con el objetivo de identificar, clasificar y catalogar; y (2) aplicar ‘medidas de conservación preventiva’ que implican el agrupamiento de material fósil disperso, la limpieza manual y remoción de polvo o sedimento, el embalaje de piezas pequeñas y frágiles con papel china blanco dentro de bolsas plásticas con cierre hermético, y su etiquetados temporal (clave de identificación).

Es importante mencionar que la clave de identificación, MRAHBCS Pal/, dentro del catálogo de la colección paleontológica está constituida por las siglas del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur (MRAHBCS); y seguida por la contracción “Pal/” que se refiere a la colección de Paleontología. Las siglas sucesivas que pueden ser “V”, “I”, “B”, “Ic” describen el tipo de material, es decir, si se trata de un vertebrado o invertebrado, material botánico o icnofósil, respectivamente (por ejemplo, “MRAHBCS Pal/ I 345”). Al final de la clave, se indica el número consecutivo del material fósil identificado; el hecho de colocar el número consecutivo permitirá agregar nuevo material al listado, sin importar el tipo de material (“V, I, B o Ic”).

3. Resultados

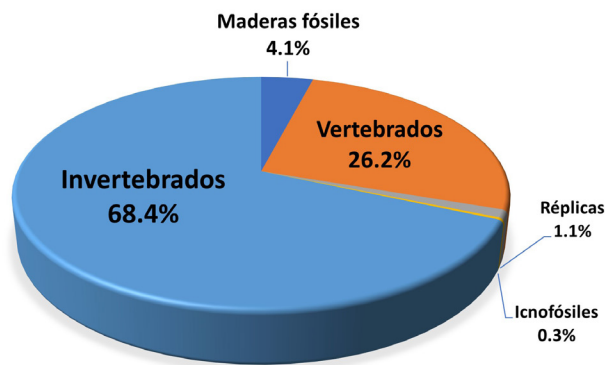
El depósito de bienes culturales del INAH del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur (Figura 1) posee un área aproximada de 35 m², en la cual está la colección paleontológica de 371 piezas fósiles. La colección cuenta actualmente con un listado de muestras para seguimiento y catalogación, resultado del presente trabajo. En este conjunto fosilífero, se han identificado fehacientemente 12 especies fósiles diferentes entre vertebrados e invertebrados (Tabla 1). Del total de la colección, los restos fósiles de invertebrados conforman cerca del 68.4% de los especímenes documentados y son principalmente moldes internos (Figura 2). Los principales grupos taxonómicos de invertebrados comprenden los phyla Annelida, Arthropoda,



Figura 1. Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur, fachada (A). Área de resguardo de la colección paleontológica (B y C). En la foto Quintín Muñoz Garayzar, INAH, anteriormente encargado del depósito de bienes culturales del INAH en el museo.

Tabla 1. Especies fósiles identificadas dentro de la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur.

Especie	Comentarios
<i>Albireo whistleri</i>	El fósil de este delfín fue hallado en la Isla Cedros Baja California, su edad es Mioceno (véase Barnes, 1984). Actualmente, el MRAHBCS posee una réplica del cráneo.
<i>Bison antiquus</i>	Al igual que <i>Mammutus columbi</i> , los restos de bisontes son fragmentarios esto incluye elementos craneales y postcraneales (véase Ferrusquía-Villafranca y Torres-Roldan, 1980).
<i>Carcharocles angustidens</i>	Los dientes fósiles de este tiburón, relativamente más pequeño que el tiburón <i>Otodus megalodon</i> , pertenecen a los particulares afloramientos de rocas marinas de edad Eoceno-Oligoceno presentes en Baja California Sur (véase González-Barba, 2008).
<i>Carcharodon carcharias</i>	Los registros de dientes fósiles del tiburón blanco tienen edades desde el Mioceno al Pleistoceno, son relativamente abundantes en varias localidades a lo largo del estado de Baja California Sur (véase González-Barba y Thies, 2000).
<i>Diplochaetetes mexicanus</i>	Este fósil representa la asociación y agregación de anélidos poliquetos que formaron arrecifes en las costas mexicanas. Esta especie es parte de los registros de edad Oligoceno presentes en Baja California Sur (véase Fischer <i>et al.</i> , 1989).
<i>Echericetus novellus</i>	Este fósil representa un nuevo género y especie de cetáceo, conocido como ballenas del alba o eomisticetidos (Cetacea; Mysticeti; Eomysticetidae), del Oligoceno del Baja California Sur. Los registros de estos mamíferos marinos son únicos a nivel nacional. El holotipo se encuentra en la colección del MRAHBCS y es único en su clase (véase Hernández-Cisneros <i>et al.</i> , 2023).
<i>Encope californica</i>	Esta especie de erizo irregular, conocido como galleta de mar o <i>-sand dollar-</i> (en inglés), se encuentra en algunas localidades donde afloran las llamadas terrazas marinas del Pleistoceno en Baja California Sur. Estas terrazas son usualmente ricas en fósiles de invertebrados (véase Durham y Allison, 1960).
<i>Encope grandis</i>	Este fósil es otra especie de erizo irregular del Pleistoceno similar a <i>Encope californica</i> , también asociado a las terrazas marinas (véase Durham y Allison, 1960).
<i>Guzzeyella bisulcata</i>	Especie de rudista (molusco: bivalvo). Tenían dos valvas asimétricas, una de ellas fijada al sustrato (organismos sésiles). Aparecen en el Jurásico Superior, y se diversificaron en el Cretácico. Se extinguen en el evento de extinción masiva Cretácico-Paleógeno (límite K-Pg). Durante el Cretácico fueron los principales responsables de la formación de arrecifes en el mar de Tetis (véase Alencáster, 1999).
<i>Mammutus columbi</i>	El registro fósil de este proboscideo del Pleistoceno en Baja California Sur suele ser fragmentario. Usualmente se preservan los elementos dentarios (relativamente completos), pero hay registro de extremidades, fragmentos de cráneos, y elementos postcraneales (véase Ferrusquía-Villafranca y Torres-Roldan, 1980).
<i>Otodus megalodon</i>	Los dientes fósiles de esta especie de tiburón gigante de edad Mioceno-Plioceno son comunes y notorios en varias localidades a lo largo de Baja California Sur (véase Jiménez-Castañeda, 2020).
<i>Protoglobicephala mexicana</i>	Esta especie fósil fue el primer género y especie descrita de un delfín para Baja California Sur, su edad es Plioceno y fue encontrado en la Isla San José en la Bahía de la Paz (véase Aguirre-Fernández <i>et al.</i> , 2009). El MRAHBCS posee una réplica del cráneo. Actualmente el fósil original está extraviado. El holotipo se encontraba a resguardo de la colección paleontológica de la Universidad Autónoma de Baja California Sur.



COMPOSICIÓN DE LA COLECCIÓN PALEONTOLÓGICA DEL MRAHBCS

Figura 2. Grupos fósiles en la colección paleontológica del depósito del MRAHBCS. Las muestras dominantes son los invertebrados y en segundo término los vertebrados.

Echinodermata y Mollusca (el grupo más numeroso con 32 géneros identificados; Tabla 2). Dentro de los vertebrados (que conforman el 26.2% de la colección), las clases Chondrichthyes y Mammalia son las más representativas (Tabla 3), los reptiles son más escasos y están presentes con restos de carapachos de tortugas terrestres (Orden Testudines). Los últimos conjuntos fósiles comprenden a los restos de maderas fósiles (4.1%), algunos icnofósiles (.3%) y réplicas (1.1%).

La mayoría de los ejemplares son de edad Cenozoica, aunque en muchos casos es difícil determinar una edad específica dentro de un periodo o época geológica. Poco más del

Tabla 2. Géneros de los invertebrados fósiles identificados dentro de la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur.

Phylum	Géneros
Annelida	<i>Diplochaetetes</i>
Arthropoda	<i>Balanus</i>
Echinodermata	<i>Encope, Clypeaster</i>
Mollusca	<i>Acutostrea, Anadara, Barbatia, Buccinum, Bulla, Callista, Chionopsis, Conus, Crassostrea, Glycymeris, Guzzeyella, Gyrodes, Hexaplex, Macoma, Malea, Natica, Nodipecten, Oliva, Ostrea, Panopea, Pecten, Pinna, Pitar, Pycnodonte, Saccostrea, Spondylus, Strombus, Thais, Tivela, Tonna, Turritella, Vasum</i>

Nota: algunos ejemplares requieren un análisis más exhaustivo para corroborar su identificación genérica y específica, ya que la mayoría de los especímenes son moldes internos. En esta lista no se incluyen las identificaciones con mayor nivel de incertidumbre presentes en la colección (es decir, clasificadas como *aff.* - especies *affinis*; y *cf.* - *confer*, "comparación con").

Tabla 3. Géneros de vertebrados fósiles identificados dentro de la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur.

Clase	Géneros
<i>Chondrichthyes</i>	<i>Alopias, Carcharias, Carcharocles, Carcharodon, Galeocerdo, Hemipristis, Isurus, Lamna, Otodus</i>
<i>Mammalia</i>	<i>Albireo, Bison, Echericetus, Equus, Mammutus, Protoglobicephala</i>

Nota: algunos ejemplares requieren un análisis más exhaustivo para corroborar su identificación específica. En esta lista no se incluyen las identificaciones con mayor nivel de incertidumbre presentes en la colección (es decir, clasificadas como *aff.* - especies *affinis*; y *cf.* - *confer*, "comparación con").

98% de las muestras no tienen fichas técnicas, notas, bitácoras y datos de campo por lo que se desconoce la localidad, coordenadas geográficas, colectores, datos estratigráficos y otras referencias. La mayoría de los materiales fósiles fueron donados, algunos estaban acompañados con notas de donación o comentarios, las cuales se mezclaron a través del tiempo y se perdieron en muchos casos (Figura 3). Cabe hacer notar, que ha sido posible realizar trabajos de investigación asociados a un cierto número de especímenes (por ejemplo, Rochín-Bañaga *et al.*, 2017; Hernández-Cisneros *et al.*, 2023). La ausencia de información se puede cubrir a partir de la disponibilidad de datos en publicaciones científicas sobre fósiles en Baja California Sur, y tomando en cuenta la calidad de algunos fósiles dentro de la colección (Figuras 4-7). Aproximadamente, el 50% de los materiales (mayormente invertebrados) presenta un número de inventario del INAH (por ejemplo, 10-429935). No obstante, algunos materiales inventariados son fragmentos de un solo espécimen, o son parte de un conjunto de muestras similares (lotes), también se encontró que muestras de rocas o sedimentos fueron clasificados como fósiles y fueron

inventariados. Finalmente, los especímenes requieren un grado de trabajo de curación y preparación, por ejemplo, aproximadamente el 98% de los vertebrados.

4. Discusión y conclusiones

Se presenta el primer ordenamiento sistemático de la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur. El cual comprendió un total de 371 ejemplares fósiles, aunque la colección sigue aumentando continuamente su número de especímenes debido a las donaciones o decomisos principalmente. Considerando los porcentajes obtenidos y el volumen que representan el conjunto de los fósiles catalogados, se puede indicar que esta colección es pequeña dentro del espacio correspondiente al depósito de bienes culturales del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur (Figura 1). Esta sistematización permite dar a conocer una imagen general del estado actual y las condiciones en las que se encuentra la colección. Además, refuerza el valor e importancia de la presente colección

Sistematización de la Colección Paleontológica de BCS

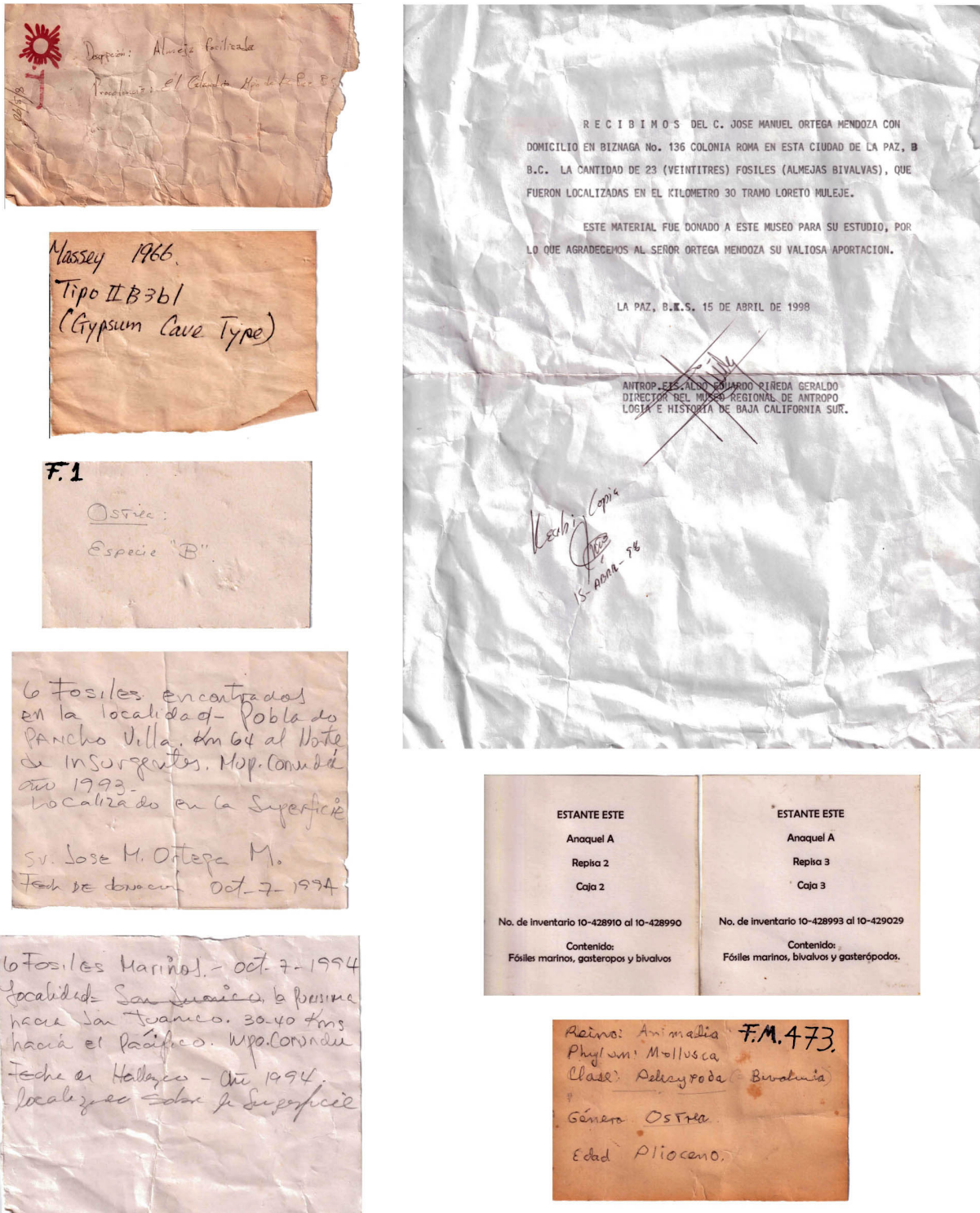


Figura 3. Ejemplo de las notas presentes dentro de la colección.

y hace el llamado urgente a las instituciones implicadas a mostrar mayor interés en el desarrollo de la misma. Al mismo tiempo, el presente trabajo hace un importante llamamiento para atender la precariedad de los espacios con acervo paleontológico y aboga por

la necesidad de fortalecer las colecciones paleontológicas en Baja California Sur con el fin de contribuir a la salvaguarda del patrimonio paleontológico nacional.

Particularmente, la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e

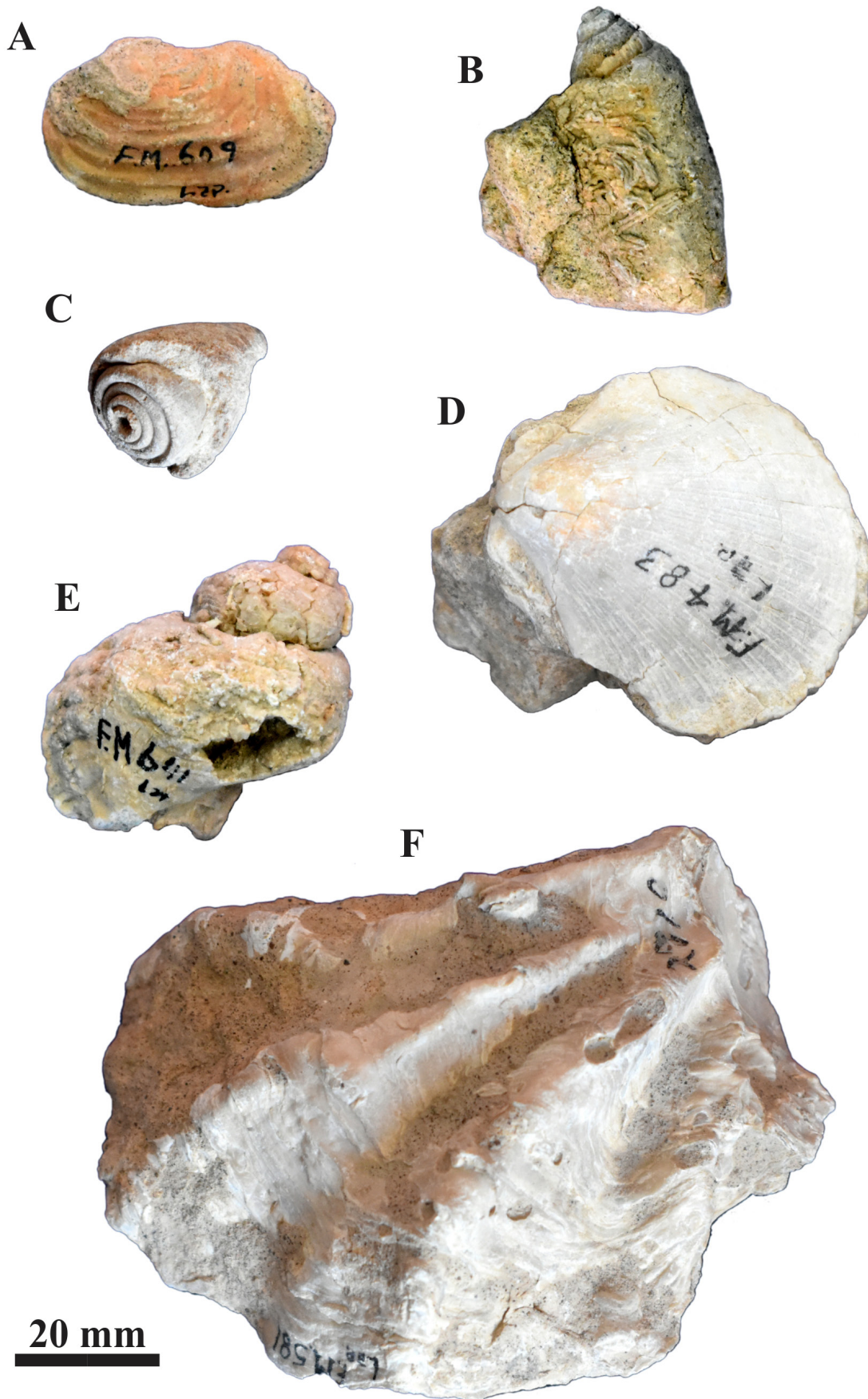


Figura 4. Ejemplares de invertebrados de la colección paleontológica del MRAHBCS. Especímenes: MRAHBCS Pal/I 125, *Panopea* sp. (A); MRAHBCS Pal/I 126, *Oliva* sp. (B); MRAHBCS Pal/I 65, *Conus* sp. (C); MRAHBCS Pal/I 77, *Talochlamys* sp. (D); MRAHBCS Pal/I 129, *Hexaplex* sp. (E); MRAHBCS Pal/I 111, *Lopa* sp. (F).



Figura 5. Espécimen invertebrado de la colección paleontológica del MRAHBCS. *Diplochaetetes mexicanus* (edad Oligoceno), MRAHBCS Pal/I 145, fragmento de colonia de anélidos poliquetos.

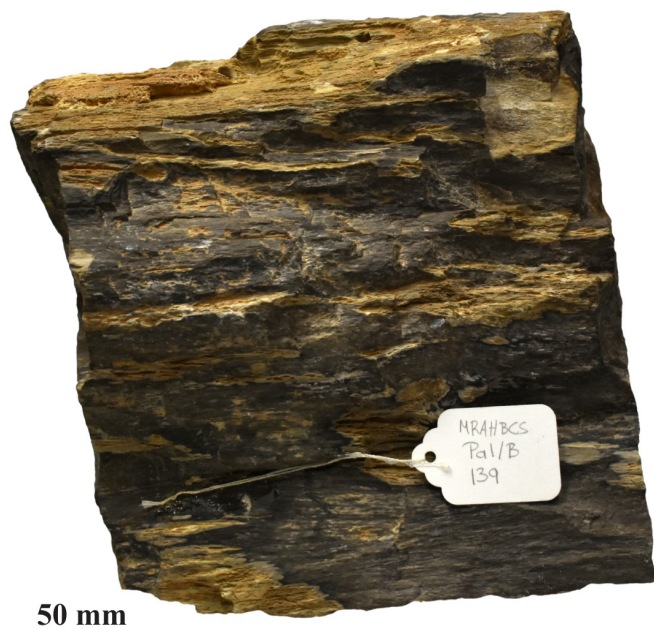


Figura 6. Fragmento del ejemplar MRAHBCS Pal/B 139, maderas fósiles de la colección paleontológica del MRAHBCS.

Historia de Baja California Sur (Figura 1B–C) presenta limitaciones, ya que carece tanto de personal profesionalizado en paleontología como de un plan de manejo adecuado; además de estar restringida por la falta de infraestructura y equipo. Las condiciones presentes en la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur pueden asociarse, en parte, al proceso histórico del desarrollo de la paleontología en México que fue paulatino e inició su expansión hacia otros estados a partir de la capital mexicana, donde diversos naturalistas y profesionales de los siglos XIX y XX fueron asentándose y creando espacios para la práctica paleontológica en cada región (Gío-Argáez y Rodríguez-Arévalo, 2003; Carreño y Montellano-Ballesteros, 2005). Actualmente, la paleontología mexicana se puede considerar como una actividad centralizada si tomamos en cuenta que el centro de México (es decir, Ciudad de México) concentra un número mayor de profesionales en paleontología, colecciones y recursos (CONABIO, 2023; Chacón-Baca *et al.*, 2020).

En contraste, Baja California Sur encara un gran reto para impulsar el trabajo paleontológico, ya que los diversos espacios con colecciones fósiles como el Museo Regional de

Antropología e Historia de Baja California Sur y la colección paleontológica de la Universidad Autónoma de Baja California Sur, están sujetos a la falta de infraestructura, equipo y laboratorios especializados, carecen o tienen un limitado número de profesionales en paleontología, y se ven condicionados por la pasividad institucional y el conflicto de intereses. Históricamente las actividades paleontológicas locales en el estado de Baja California Sur iniciaron con la fundación de las instituciones públicas como el Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur (1981) y la Universidad Autónoma de Baja California Sur (1975), la cual conformaría sus colecciones a partir de 1994. No obstante, a pesar de los últimos 30 años de actividades académicas y de divulgación relacionadas con los fósiles (por ejemplo, Gaitán-Morán *et al.*, 2002; Herrera-Gil, 2003), no se ha logrado conformar un espacio adecuado para el trabajo paleontológico en el estado.

Cabe destacar, que las exposiciones museológicas o demostraciones educativas (Figura 8) han sido una constante que ha dominado el primer plano con relación a los fósiles de Baja California Sur, más que la propia investigación paleontológica. Asimismo, durante las décadas de 1990 y 2000, los estudios paleontológicos a mano de los investigadores locales fueron escasos dando como resultado una baja productividad de publicaciones científicas del estado, lo que dejó inadvertido el trabajo paleontológico en la región con poca o nula referencia en trabajos generales sobre la paleontología en México (por ejemplo, Vega *et al.*, 2005; Arroyo-Cabrales *et al.*, 2008). A pesar de ello, las publicaciones han ido incrementando paulatinamente en la última década (por ejemplo, estudios en mamíferos marinos e invertebrados; Viglino *et al.*, 2023; Morales-Ortega *et al.*, 2023), aun con las limitaciones de orden institucional, infraestructura y recursos (monetarios y humanos). Sin embargo, el reducido número de colecciones paleontológicas de referencia científica en el estado, su condición actual (restringida infraestructura y recursos) y el registro incompleto de sus especímenes

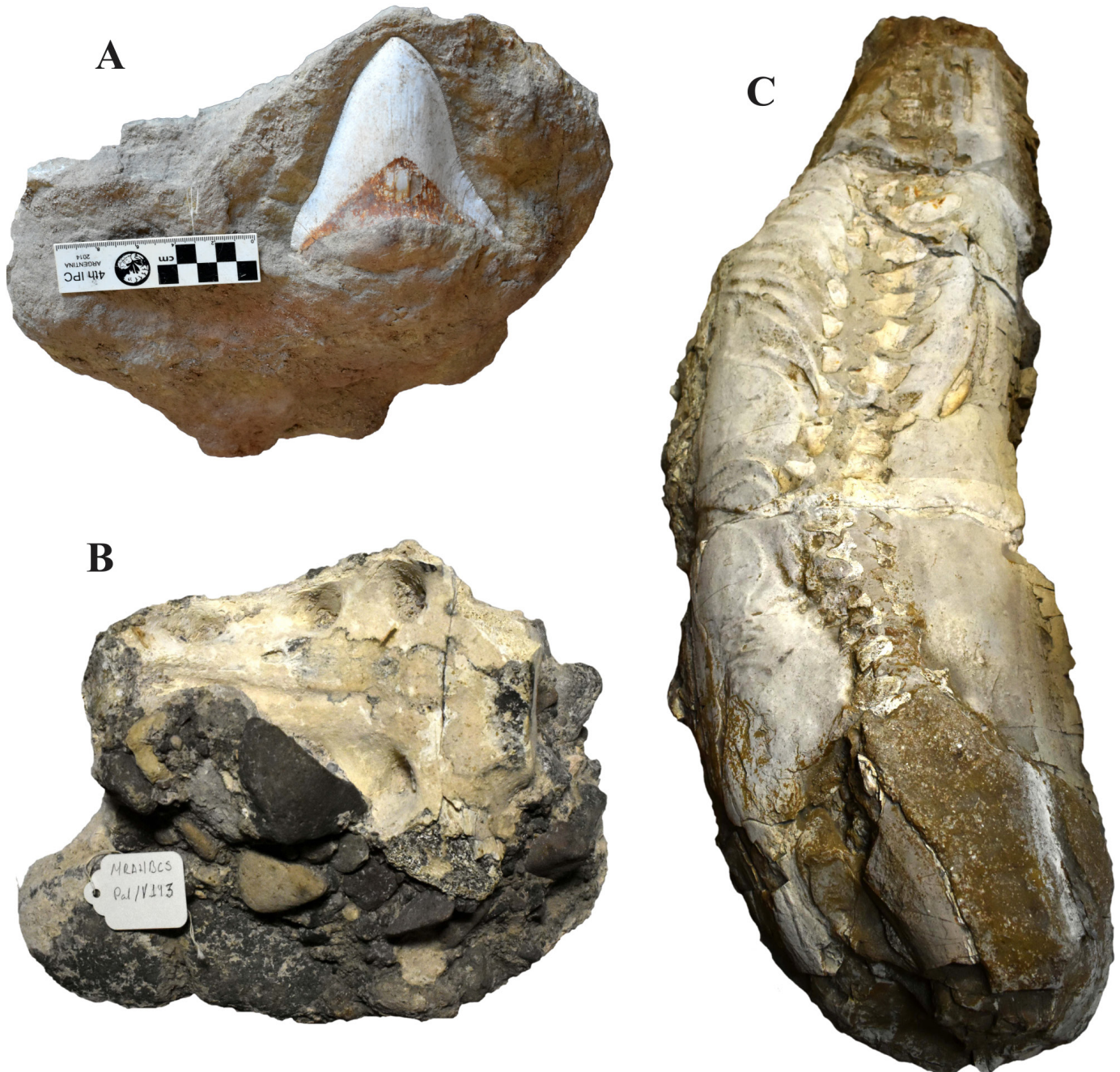


Figura 7. Ejemplares de vertebrados de la colección paleontológica del MRAHBCS. Especímenes: MRAHBCS Pal/V 60, diente de tiburón *Otodus megalodon* (A); MRAHBCS Pal/V 143, coxis de ?*Bison* sp. (B). A y B misma escala. MRAHBCS Pal/V 148, esqueleto parcial de cetáceo de 1630 mm de largo; Cetacea, familia, *gen.* y *sp.* indeterminados (edad Oligoceno; C).

ante el INAH (CONABIO, 2013; Morales-Ortega *et al.*, 2021); además del pobremente desarrollado esquema de organización dentro de los museos locales y colecciones, que se ve sujeto a la personalidad, intereses, objetivos y enfoques del responsable o dirección administrativa en turno, son una importante barrera para el desarrollo de la paleontología en el estado.

En este contexto, la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur es la segunda colección en relevancia del estado debido a que se ha realizado y publicado investigación paleontológica a partir del material fósil que resguarda (Rochín-Bañaga *et al.*, 2017; Hernández-Cisneros *et al.*, 2023), lo que la distingue y da pie a

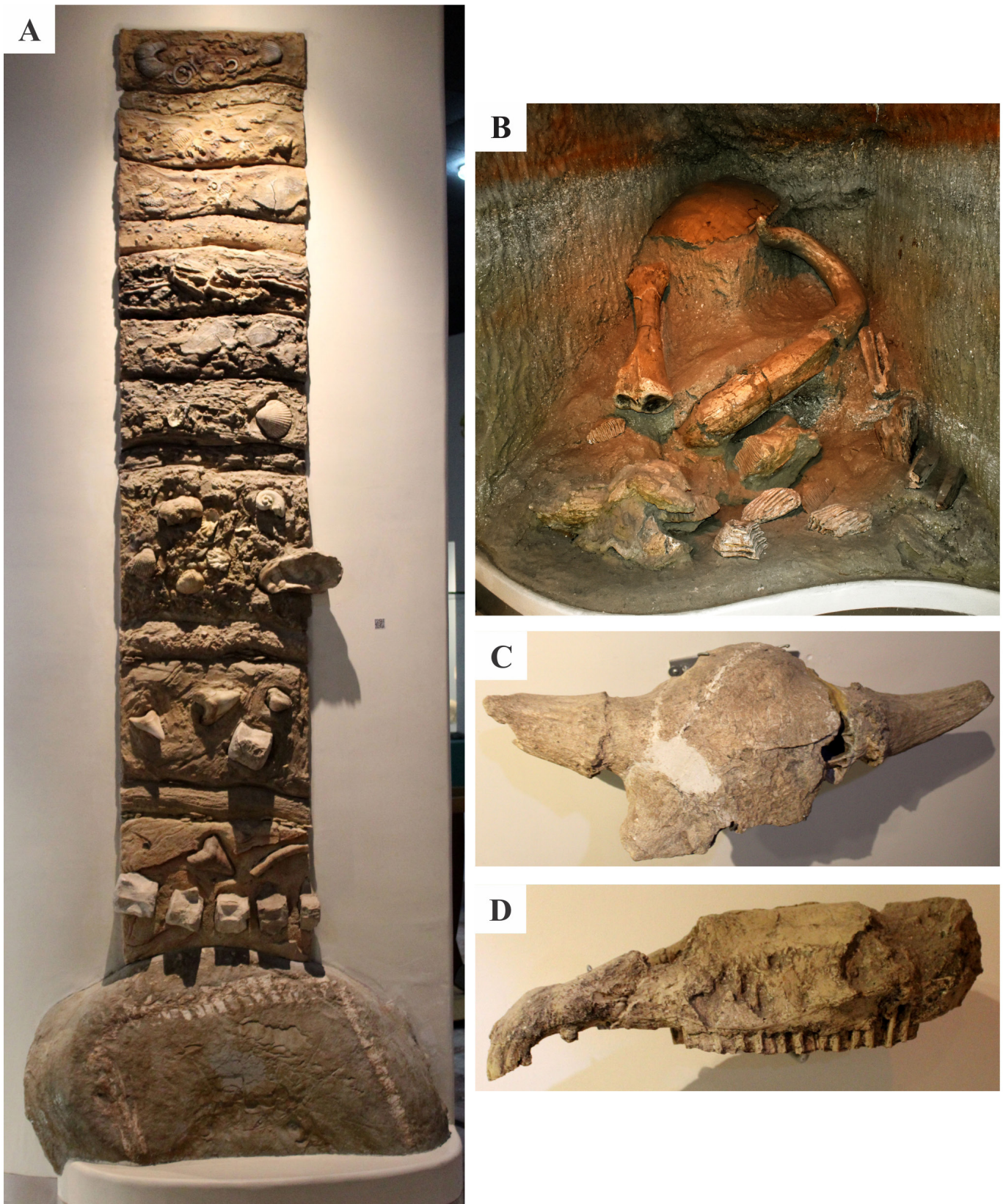


Figura 8. Ejemplo del arreglo y exposición paleontológica del MRAHBCS. (A) Ejemplificación de una columna estratigráfica con diversos materiales incrustados (dientes de tiburones, bivalvos, gasterópodos, restos de vertebrados marinos y en la base el esqueleto parcial de un cetáceo de edad Oligoceno). (B) Ejemplificación de una excavación con diversos materiales fósiles (carapacho de tortuga -parte superior de la foto; restos de mamut -tibia, fragmento de defensa, fragmento de cráneo y molares- centro izquierda de la foto; y restos de maderas fosilizadas -margen inferior derecho de la foto). (C) Exposición de un cráneo fragmentado de *Bison antiquus* y (D) réplica de un cráneo de *Equus sp.*

su posible conformación como una potencial colección científica de referencia. Debe mencionarse que las observaciones y trabajos paleontológicos realizados en el estado de Baja California Sur pueden trazarse hasta la década de 1880 (Merril, 1897). No obstante, una gran parte de la investigación paleontológica del estado de Baja California Sur se ha realizado y liderado por investigadores de otras instituciones nacionales y extranjeras a partir de la década de 1970, por ejemplo, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) es uno de los principales referentes en la región (Barnes, 1998). Este escenario es resultado de las expediciones de reconocimiento paleontológico y geológico llevadas a cabo por el Instituto de Geología de la UNAM e instituciones estadounidenses (por ejemplo, Natural History Museum of Los Angeles County), lideradas por Ismael Ferrusquía-Villafranca, Shelton P. Applegate y William Morris (Barnes, 1998).

Sin embargo, desde la década de 1990 académicos e investigadores de la UABCS, como Luis Alberto Herrera Gil, Gerardo González Barba y Tobias Schwennicke, han contribuido al impulso de la investigación paleontológica en el estado favoreciendo la formación de nuevos jóvenes investigadores que han participado en el desarrollo de la colección paleontológica del Museo de Historia Natural de la UABCS (fundado en 1994), además de estar en estrecha colaboración con el Departamento Académico de Ciencias de la Tierra de la misma institución. En combinación, esto ha permitido el comienzo de una transición generacional donde los nuevos jóvenes investigadores han aportado un importante y reciente número de estudios sobre la paleontología del estado (por ejemplo, Aguirre-Fernández *et al.*, 2009; Rochín-Bañaga *et al.*, 2017; Morales-Ortega *et al.*, 2023; Hernández-Cisneros *et al.*, 2023; Solís-Añorve *et al.*, 2024). Cabe resaltar que, las actividades de prospección e investigación paleontológicas en el estado se han llevado a cabo con pocos recursos, las instituciones (por ejemplo, INAH, UABCS) han dado apoyos de financiamiento puntuales, y es común que el investigador local e interesado sea quien ha invertido

para concretar proyectos, en ocasiones con apoyos externos de empresas o gente local.

Se debe subrayar que, parte del material fósil del estado que ha sido recolectado, investigado y publicado se encuentra en la Colección Nacional de Paleontología del Instituto de Geología de la UNAM (Ferrusquía-Villafranca y Torres-Roldan, 1980; Barnes, 1998; Martínez-Cabrera *et al.*, 2006; Martínez-Melo y Alvarado-Ortega, 2020) y un número indeterminado de especímenes se encuentran en colecciones paleontológicas de instituciones extranjeras (por ejemplo, Kilmer, 1965). Es por ello que la colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia cobra notabilidad, ya que es uno de los pocos espacios de interés científico con registro fósil ordenado y catalogado que puede ser consultado en el estado de Baja California Sur. Sin embargo, esta colección requiere atención para consolidarse en términos de accesibilidad, eficiencia y funcionamiento.

Aquí, se proponen algunas acciones para coadyuvar en el fortalecimiento de la creciente colección paleontológica del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur y favorecer el futuro de la paleontología del estado de Baja California Sur. En este punto, es relevante citar a Cristín y Perrillat (2011), “las colecciones científicas son una condición necesaria para la existencia de la paleontología en México”. Entre las acciones que se podrían realizar son:

- *Promover la investigación científica.* Es una parte sustancial para el desarrollo de las colecciones biológicas, al cumplir con este aspecto realzan su valor y contribución social estimulando el interés sobre las mismas (Allmon, 1994). Este factor es importante para el sustento de la colección ya que al generar nueva información garantiza ser un referente de interés social y gubernamental, a partir del cual se tomarán decisiones o se buscarán soluciones con bases científicas (Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; Allmon, 2005; Johnson y Owens, 2023). Por ello, el Museo Regional de Antropología e

Historia de Baja California Sur debe continuar estimulando y promoviendo la actividad de investigación científica entorno a sus colecciones, como es en el caso del registro fósil bajo su resguardo, lo que le dará herramientas para difundir sus logros en favor del desarrollo sociocultural y económico de la región, y lograr resaltar como institución.

- *Atención institucional.* Un aspecto relevante para el fortalecimiento de las colecciones es el respaldo institucional, el cual determina la calidad de estas y da el impulso necesario para cumplir con los objetivos de la investigación para el beneficio social. Sin embargo, esta parte está sujeta a los objetivos y metas de la institución, y a la comprensión que tiene la misma, acerca de las colecciones que resguarda (Allmon, 1994, 2005; Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; Suarez y Tsutsui, 2004; NASEM, 2020). Por tanto, el nivel de valoración e importancia que se le dé a las colecciones se refleja en los logros, propósitos y razón social de la institución. En el caso del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur, instamos a replantear las metas y objetivos relacionados con el depósito de bienes culturales para mejorar la percepción y valorización de sus colecciones, entre ellas la de paleontología. La intención es optimizar sus condiciones acordes a sus necesidades. Esto traerá beneficios en términos de accesibilidad, control, y desarrollo institucional.
- *Planeación.* El manejo de colecciones no es una tarea fácil ya que se requiere un esfuerzo considerable y recursos (personal, insumos, infraestructura, equipo, etc.) que, aplicados correctamente, justifican plenamente los recursos invertidos en términos de investigación y beneficio social (Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; Suarez y Tsutsui, 2004; NASEM, 2020). En este caso, el Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur y el Centro INAH - BCS requieren establecer

una coordinación sólida y continua para crear un plan de trabajo regional a corto, mediano y largo plazo en favor de sus colecciones, como la de paleontología. Este debate de planeación debe dársele seguimiento sin importar los cambios administrativos. Además, su planteamiento debe fundarse en los estándares actuales de accesibilidad y funcionamiento de las colecciones biológicas (Thomson *et al.*, 2008; Schindel y Cook, 2018), evitando inhibir su funcionamiento con la burocratización de sus procedimientos, y apoyarse con la opinión de profesionales en el área, tanto de locales, nacionales y de entidades internacionales.

- *Profesionales en paleontología.* Actualmente, el Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur y el Centro INAH - BCS no cuentan con profesionales en paleontología dentro de su personal contratado. Usualmente, la asesoría externa (principalmente de profesores-investigadores de la UABCS) ha sido el elemento auxiliar para el manejo de los restos fósiles. Además, ciertas actividades y acciones han sido llevadas a cabo por arqueólogos y antropólogos adscritos a la institución. Debido a ello, ambos organismos se han visto rebasados por las necesidades y responsabilidad que implica el rescate y resguardo de material paleontológico, dejándolo susceptible a su deterioro, pérdida y destrucción (Boletín-INAH, 2018). Por ello, es necesario que se promueva la contratación de personal profesionalizado en paleontología para cubrir el manejo, curación, procesamiento e investigación de restos fósiles. Juicio que debe hacerse bajo un esquema planeado con objetivos claros con relación al patrimonio paleontológico y las colecciones (Schindel y Cook, 2018; Morales-Ortega *et al.*, 2021). Garantizando la conformación de una colección paleontológica dinámica y sana, es decir, un manejo y ejecución adecuados de actividades de

campo, curación, registro continuo de nuevo ejemplares, digitalización y bases de datos, y al mismo tiempo permitir la accesibilidad para consultas e investigación (Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; NASEM, 2020).

- *Infraestructura y equipo.* Las colecciones biológicas necesitan espacios y laboratorios adecuados para su manejo, en especial para los trabajos curatoriales y el almacenamiento de los especímenes (Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; Schindel y Cook, 2018). Además, la infraestructura y el equipamiento de las colecciones debe visualizarse como un esquema a largo plazo para dar paso a nuevos métodos y tecnologías, como es en el caso de los laboratorios de paleontología (Brown, 2013). Se reconoce que el INAH está limitado en recursos económicos, lo que se traduce en una escasa inversión en laboratorios de paleontología en los diversos estados de la República Mexicana (Boletín-INAH, 2018; Morales-Ortega, 2020). Sin embargo, las actividades de investigación y restauración del material fósil, se puede sobrellevar con la celebración de convenios y/o acuerdos de colaboración interinstitucional que le permita procesar sus muestras, esto le permitirá optimizar espacios, mejorar su logística interna y tener los medios para generar nuevos datos en investigación y elementos para incidir en las cuestiones culturales y educativas de la región. Sin embargo, esto solo será posible a través del establecimiento del plan de trabajo coordinado e impulsado por la dirección estatal y el museo regional, y por supuesto con el apoyo y la injerencia del INAH.
- *Accesibilidad.* La accesibilidad es un elemento sustancial para el buen funcionamiento de las colecciones biológicas, esta puede ser física o digital (Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; Schindel y Cook, 2018; NASEM, 2020). Actualmente, el esquema digital es de interés global debido al beneficio que representa el

acceso a grandes volúmenes de datos derivados de la información contenida en las colecciones naturales (Johnson y Owens, 2023). Sin embargo, si las instituciones con colecciones se ven limitadas en recursos y apoyos, además de tener un esquema de manejo pobremente desarrollado, entonces la digitalización y la investigación de vanguardia son casi imposibles (Allmon, 2005; Mclean *et al.*, 2016; Johnson y Owens, 2023). Por ello, es necesario que dentro del plan de trabajo para el desarrollo de las colecciones del Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur, el esquema de accesibilidad sea adecuado y que se desarrolle con miras hacia la digitalización sin descuidar el mantenimiento físico de las colecciones. Además, debe garantizar que las colecciones podrán ser asequibles por cualquiera que los solicite formalmente (investigación, consultas, etc.) bajo criterios adecuados (reglamentos y protocolos), evitando el conflicto de intereses. Las colecciones biológicas o naturales requieren un esquema de normas de uso y manejo (depósitos, requisiciones, curación, etc.), enfocados en el acceso abierto y no de intereses particulares (Mclean *et al.*, 2016), finalmente son bibliotecas biológicas prioritarias para el desarrollo científico y fuentes de información que favorecen el bienestar social de un país (Suarez y Tsutsui, 2004; Schindel y Cook, 2018).

Por último, el estado de Baja California Sur posee un importante patrimonio paleontológico (mayormente de la Era Cenozoica) con características singulares, es decir, algunos fósiles son únicos a nivel nacional (por ejemplo, los restos fósiles de mamíferos marinos; Vignino *et al.*, 2023). En consecuencia, los registros fósiles del estado requieren atención para impulsar su conservación, protección, preservación, investigación, difusión y divulgación. Los conjuntos fosilíferos del territorio sudcaliforniano prometen desvelar varias incógnitas relacionadas con la evolución de la biota

moderna en el Océano Pacífico (transiciones biológicas y eventos biogeográficos), además de abonar a las explicaciones sobre los eventos importantes de cambio climático y geológico de la región y a escala global durante el Cenozoico. Por ello, el establecimiento y desarrollo adecuado de las colecciones paleontológicas en la región abonará sustancialmente a la investigación científica en México. Asimismo, dará pauta a la necesidad de visualizar la importancia y utilidad de las colecciones biológicas dentro de los museos de historia natural, universidades e institutos de investigación, y su inobjetable beneficio socioeconómico, educativo y cultural (Allmon, 1994; Llorente-Bousquets *et al.*, 1999; Suarez y Tsutsui, 2004; Johnson y Owens, 2023).

Agradecimientos

Damos nuestro agradecimiento al editor en jefe y a los dos revisores anónimos que ayudaron a mejorar el presente manuscrito con sus observaciones. También ofrecemos nuestra gratitud a Sandra Ramos Amézquita por su apoyo durante el proceso de edición del presente trabajo. Agradecemos al Centro INAH de la Paz, BCS, y al Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur por su apertura y acceso a sus colecciones. Estamos agradecidos con A. Calderon Vega y L. A. Trasviña Moreno por el apoyo incondicional y confianza que nos brindaron. Un especial aprecio y gratitud a Q. Muñoz Garayzar por brindarnos su amistad, tiempo, anécdotas, información y detalles históricos alrededor de la colección de fósiles del museo. También, damos nuestro agradecimiento a K. Bulhusen Muñoz y a los compañeros del museo que nos auxiliaron de diversas formas durante el desarrollo del proyecto. Agradecemos a E. Anaya Godínez por sus observaciones y comentarios durante la preparación del manuscrito. PMO fue respaldada por la beca CONAHCyT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, ahora SECIHTI),

periodo 2021-2024, CVU 389635. AEHC fue respaldado por el Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM (POSDOC; 2024-2026).

Contribuciones de los autores

AEHC y PMO concibieron el estudio, analizaron los datos y escribieron el artículo. Ambos autores aprobaron la versión final de este manuscrito y aceptaron ser responsables de su contenido.

Referencias

- Aguirre-Fernández, G., Barnes, L. G., Aranda-Manteca, F. J., & Fernández-Rivera, J. R. (2009). *Protoglobicephala mexicana*, a new genus and species of Pliocene fossil dolphin (Cetacea; Odontoceti; Delphinidae) from the Gulf of California, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(2), 245–265. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2009v61n2a13>
- Alencáster, G. (1999). New caprinid rudist genera Guzzeyella and Muellderiedia (Bivalvia-Hippuritacea) from the Albian (Cretaceous) of central Mexico. *Revista mexicana de Ciencias geológicas*, 15(1), 91–105.
- Allmon, W. D. (1994). The value of natural history collections. *Curator*, 37(2), 83–89.
- Allmon, W. D. (2005). The importance of museum collections in paleobiology. *Paleobiology*, 31(1), 1–5. [http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373\(2005\)031<0001:TIOHCI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373(2005)031<0001:TIOHCI>2.0.CO;2)
- Arroyo-Cabrales, J., Carreño, A. L., Lozano-García, S., Montellano-Ballesteros, M., Cevallos-Ferriz, S., Corona, E., Espinosa-Arrubarrrena, L., Guzmán, A. F., Magallón-Puebla, S., Morán-Zenteno, D. J., Naranjo-García, E., Olivera, M. T., Polaco, O. J., Sosa-Nájera, S., Téllez-Duarte, M., Tovar-Liceaga, R. E., & Vázquez-Sellem, L. (2008). La diversidad en el pasado. En *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México.
- Barnes, L. G. (1984). Fossil odontocetes (Mammalia: Cetacea) from the Almejas Formation, Isla Cedros, Mexico. *Paleobios*, 42, 1–46.
- Barnes, L. G. (1998). The sequence of fossil marine mammal assemblages in Mexico. In Carranza-Castañeda, O., & Córdoba-Méndez, D. A. (Eds.), *Avances en Investigación, Paleontología de Vertebrados* (Publicación especial 1, pp. 26–79). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Boletín-INAH, No. 175. (2018). *Consejo de Paleontología, primer aniversario de su reactivación, Instituto Nacional de Antropología e Historia*. <https://www.consejopaleontologia.inah.gob.mx/boletines/7-consejo-de-paleontologia-primer-aniversario-de-su-reactivacion>, consultado Abril, 2024
- Brown, M. A. (2013). The development of “modern” palaeontological laboratory methods: a century of progress. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 103, 1–12. <https://doi.org/10.1017/S1755691013000352>
- Buitrón-Sánchez, B. E., Cuadros-Mendoza, I. M., Campos-Madrigal, E., Suárez-Noyola, M. E. (2020). The Paleontological Collection of the Facultad de Ingeniería of the Universidad Nacional Autónoma de México. *Paleontología Mexicana*, 6(1), 1–9.
- Carbot-Chanona, G. (2015). La Colección Paleontológica de la SEMAHN: análisis preliminar. *LACANDONIA*, 9(2), 43–54.

- Carreño, A. L., & Montellano-Ballesteros, M. (2005). La Paleontología mexicana; pasado, presente y futuro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2, 137–147. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n2a2>
- Chacón-Baca, E., Velasco-de León, M. P., Castañeda-Posadas, C., Cuen-Romero, F. J., & Lozano-Carmona, D. E. (2020). La Sociedad Mexicana de Paleontología: Una Retrospectiva Pertinente. *Paleontología Mexicana*, 9(1), 41–51.
- CONABIO – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2013). *Informe final del Proyecto HC008, Computarización de la colección de referencia para zoología, arqueozoología y paleontología del Museo de Historia Natural de la Universidad Autónoma de Baja California Sur*. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfHC008.pdf>, consultado Setiembre 2023.
- CONABIO – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2023). *Catálogo electrónico de acrónimos de colecciones e instituciones*. Base de datos SNIB-CONABIO, México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/InstyColecc>, consultado Septiembre 2023.
- Cristin, A., & Perrilliat, M. C. (2011). Las colecciones científicas y la protección del patrimonio paleontológico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 421–427. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2011v63n3a4>
- DOF – Diario Oficial de la Federación, (2018). *Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas*. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Última reforma publicada DOF 16-02-2018. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/131_160218.pdf
- Durham, W., & Allison, E. C. (1960). Part I. The geologic history of Baja California and its marine faunas. *Systematic Biology*, 9(2), 47–91. <https://doi.org/10.2307/2411859>
- Ferrusquía-Villafranca, I., & Torres-Roldán, V. (1980). El registro de mamíferos terrestres del Mesozoico y Cenozoico de Baja California. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 1, 56–62.
- Fischer, R., Galli-Oliver, C., & Reitner, J. (1989). Skeletal structure, growth, and paleoecology of the patch reef-building polychaete worm *Diplochaetetes mexicanus* Wilson, 1986 from the Oligocene of Baja California (Mexico). *Geobios*, 22(5), 761–775. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(89\)80071-3](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(89)80071-3)
- Gaitán-Morán, J., Herrera-Gil, L. A., Oseguera-Cházaro, M., & Regadas-Dahl, F. (2002). The Binational Programme: Heritage Conservation in Baja California Sur. En *Eighth North American Higher Education Conference, Mount Royal College in Calgary*, Alberta, Canada, 1–6.
- Gío-Argáez, F. R., & Rodríguez-Arévalo, H. E. Y. (2003). Panorama general de la paleontología mexicana. *CIENCIA ergo sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 10(1), 85–95. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10410110>
- González-Barba, G. (2008). *Descripción de la asociación faunística de elasmobranquios fósiles del conglomerado basal en las formaciones San Gregorio y El Cien (Oligoceno temprano) de Baja California Sur, México* [Tesis doctoral]. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – Instituto Politécnico Nacional. <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/14650>
- González-Barba, G., & Thies, D. (2000). Asociaciones faunísticas de condrictios en el Cenozoico de la Península de Baja California, México, *Perfil*, 18, 1–23.
- Hernández-Cisneros, A. E., Schwennicke, T., Rochín-Bañaga, H., & Tsai, C.-H. (2023). *Echericetus novellus* n. gen. n. sp. (Cetacea: Mysticeti: Eomysticetidae), a late Oligocene baleen whale from Baja California Sur, Mexico. *Journal of Paleontology*, 97(6), 1309–1328. <https://doi.org/10.1017/jpa.2023.80>
- Herrera-Gil, L. A. (2003). Paisajes de Baja California pasado y presente. *Arqueología Mexicana*, 11(62), 24–27.
- ISC – Instituto Sudcaliforniano de Cultura. (2024). *Museo Regional de Antropología e Historia de Baja California Sur*. <https://culturabcs.gob.mx/recinto/31>, consultado Abril 2024.
- Jiménez-Castañeda, M. F. (2020). *La fauna miocénica de elasmobranquios en Baja California Sur y sus implicaciones biogeográficas* [Tesis de maestría]. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – Instituto Politécnico Nacional. https://delfin.cicimar.ipn.mx/Biblioteca/Busqueda/Tesis/1111?Origen=coleccion_tesis
- Johnson, K. R., & Owens, I. F. P. (2023). A global approach for natural history museum collections. *Science*, 379(6638), 1192–1194. <https://doi.org/10.1126/science.adf6434>
- Kilmer, F. H. (1965). A Miocene dugongid from Baja California, Mexico. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*, 64(2), 57–74.
- Llorente-Bousquets, J., Koleff-Osorio, P., Benítez-Díaz, H., & Lara-Morales, L. (1999). *Síntesis del estado de las colecciones biológicas mexicanas. Resultados de la encuesta Inventario y Diagnóstico de la actividad taxonómica en México 1996-1998*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Martínez-Cabrera, H. I., Cevallos-Ferriz, S. R. S., & Poole, I. (2006). Fossil woods from early Miocene sediments of the El Cien Formation, Baja California Sur, Mexico. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 138, 141–163. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2006.01.001>
- Martínez-Melo, A., & Alvarado-Ortega, J. (2020). *Vaquerosella perrillatae* sp. nov.: A Miocene species of Echinarachniidae (Echinodermata: Clypeasteroidea) from Baja California Sur, Mexico. *Paleontología Electrónica*, 23(1), a14. <https://doi.org/10.26879/1040>
- McLean, B. S., Bell, K. C., Dunnum, J. L., Abrahamson, B., Colella, J. P., Deardorff, E. R., Weber, J. A., Jones, A. K., Salazar-Miralles, F., & Cook, J. A. (2016). Natural history collections-based research: progress, promise, and best practices. *Journal of Mammalogy*, 97(1), 287–297. <http://dx.doi.org/10.1093/jmammal/gyv178>
- Merrill, G. P. (1897). Notes on the geology and natural history of the Peninsula of Lower California. *Smithsonian Institution*, 969–994.
- Morales-Ortega, P. (2020). *Protección de los bienes paleontológicos en México: estado actual y consideraciones para el futuro*. [Tesis de Especialidad en Gestión de Ambientes Costeros] Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – Instituto Politécnico Nacional. https://delfin.cicimar.ipn.mx/Biblioteca/busqueda/Tesis/1100?Origen=coleccion_tesis
- Morales-Ortega, P., González-Barba, G., Nava-Sánchez, E. H., & Vera-Dimas, D. (2015). New early Eocene echinoids from Baja California Sur, Mexico. *Paleontología Mexicana*, 4(1), 12–23.
- 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.
- Morales-Ortega, P., González-Barba, G., Díaz-Santana-Iturríos, M., & Schwennicke, T. (2023). Eocene nautiloids from the Baja California Peninsula, Mexico: records, description of a new species, and biogeographic implications. *Publicación Electrónica de la Asociación Paleontológica Argentina*, 23(2), 188–201. <https://doi.org/10.5710/PEAPA.17.09.2023.463>
- NASEM – National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2020). *Biological Collections: Ensuring Critical Research and Education for the 21st Century*. Washington, DC, The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25592>
- Partida de la Cruz, L. A. (2020). La fundación del Museo de Paleontología de Guadalajara y la institucionalización de esta ciencia en Jalisco. *Saberes. Revista de historia de las ciencias y las humanidades*, 3(8), 129–146.
- Rochín-Bañaga, H., Schwennicke, T., & Herrera-Gil, L. A. (2017). Registro de *Mammuthus columbi* en el área de El Carrizal, Baja California Sur, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 495–503. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2017v69n2a12>
- Schindel, D. E., & Cook, J. A. (2018). The next generation of natural history collections. *PLoS Biology*, 16(7), e2006125. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006125>
- Solis-Añorve, A., González-Barba, G., Buono, M. R., Schwennicke, T., & Díaz-Cruz, J. A. (2024). First record of an Eomysticetidae from the El Cien Formation (late Oligocene), “Ten Minute” locality, Baja California Sur, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 76(1), A131223. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n1a131223>

- Suarez, A. V., & Tsutsui, N. D. (2004). The Value of Museum Collections for Research and Society. *BioScience*, 54(1), 66–74. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0066:TVOMCF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0066:TVOMCF]2.0.CO;2)
- Thomson, N., Hyam, R., Rinaldo, C., Butler, C., Holland, D., Mathé, B., Waibel, G., Addink, W., Altenburg, R., & Döring, M. (2008). *Natural Collections Description (NCD), A data standard for exchanging data describing natural history collections, Standards for the Exchange of Biodiversity Data*. Biodiversity Information Standards TDWG. www.tdwg.org/standards/312/
- Vega, F. J., Nyborg, T. G., Perrilliat, M. C., Montellano-Ballesteros, M., Cevallos-Ferriz, S. R. S., & Quiroz-Barroso, S. A. (2005). *Studies on Mexican paleontology*. Springer.
- Viglino, M., Valenzuela-Toro, A. M., Benites-Palomino, A., Hernández-Cisneros, A. E., Gutstein, C. S., Aguirre-Fernández, G., Vélez-Juarbe, J., Cozzuol, M. A., Buono, M. R., & Loch, C. (2023). Aquatic mammal fossils in Latin America – a review of records, advances and challenges in research in the last 30 years. *Latin American Journal of Aquatic Mammals*, 18(1), 50–65. <https://doi.org/10.5597/lajam00295>

Extracción de foraminíferos: Aporte metodológico de muestras de canal derivadas de pozos petroleros

Foraminifera Extraction: Methodological Contribution of Canal Samples Derived from Oil Wells

Méndez-Berlanga, Wendy J.¹; Silva Martínez, Luis Encarnación²;
Arellano-Gil, Javier³; Gutiérrez-Alejandro, Alejandra G.⁴; Chacón-Baca, Elizabeth^{1,*}

¹ Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera a Cerro Prieto Km. 8, Linares, Nuevo León, México 67700, México.

² Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera a Ciudad Universitaria, Monterrey, Nuevo León, México 64655, México.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

⁴ Escuela Superior de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. Adolfo López Mateos s/n C.P. 26800. Nueva Rosita, Coahuila, México.

* conophyton@gmail.com

Resumen

La vertiente de la industria petrolera actual se inclina a encontrar métodos eficaces y rentables a la hora de realizar determinaciones de parámetros clave como son las litologías y edades de formación de las rocas durante el proceso de explotación de un pozo. El análisis micropaleontológico proporciona no solamente información científica bioestratigráfica muy valiosa, sino también información práctica (y logística) para estimar rendimientos y métodos de extracción de muestras de canales durante la exploración petrolera. Este trabajo describe brevemente el alto contenido de microfósiles de foraminíferos encontrados en muestras de lodos petroleros, así como las ventajas y limitaciones derivadas de analizar este tipo de muestras. La metodología aquí descrita destaca la abundancia de foraminíferos en un muestreo colateral a lo largo de un perfil vertical de 600 m de profundidad, sino también sus limitaciones tafonómicas en los foraminíferos observados. Aunque el grado de preservación de microfósiles analizados es pobre debido a la metodología de disgregación de rocas utilizada en la industria, así como en las metodologías en exploración geofísica, es importante su descripción y análisis por el potencial que tienen a nivel paleogeográfico, a nivel de docencia, y hasta para el desarrollo de nuevas metodologías en la exploración petrolera como en el desarrollo de nuevas tecnologías ambientalmente amigables.

Palabras clave: barrenación de pozos, exploración petrolera, extracción de foraminíferos, microfósiles planctónicos, muestras de lodos petroleros.

Cómo citar / How to cite: Méndez-Berlanga, W. J., Silva Martínez, L. E., Arellano-Gil, J., Gutiérrez-Alejandro, A., & Chacón-Baca, E. (2025). Extracción de foraminíferos: Aporte metodológico de muestras de canal derivadas de pozos petroleros. *Paleontología Mexicana*, 14(1), 63–75.

Manuscrito recibido: Septiembre 10, 2024.

Manuscrito corregido: Noviembre 22, 2024.

Manuscrito aceptado: Noviembre 25, 2024.



<https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2025.14.1.392>

Abstract

The current oil industry is demanding the finding of effective and cost-effective methods when making determinations of key parameters, such as lithologies and formation ages during the exploitation process of oil wells. Micropaleontological analyses provide not only biostratigraphic relevant information, but also practical (and logistic) information to estimate yields and extraction methods of cutting samples during the exploration of oil wells. This work briefly describes the high microfossil content of foraminifera found in oil cuttings as well as the advantages and limitations derived from this type of samples. The methods here described emphasize the abundance of recovered foraminifera from collateral oil-drillings cutting samples along a 600 m depth vertical profile, and the observed taphonomic limitations. Even when the preservation grade oscillates from regular toward poor in the analyzed foraminifera because of the rock disaggregation and the applied geophysical methods of exploration, their description and analysis is important because of their potential use in paleogeography, paleoecology, teaching and even for the development of new environmentally friendly technologies in the oil industry.

Keywords: foraminifera extraction, oil cutting samples, oil drilling wells, oil wells exploration, planktonic microfossils.

1. Introducción

Los foraminíferos son eucariontes unicelulares marinos pertenecientes al grupo de protistas, con un registro fósil que se remonta al Cámbrico (Paleozoico inferior) y persisten en la actualidad en gran variedad de ambientes marinos (Pawlowski *et al.*, 2003). Tanto los foraminíferos actuales como los fósiles exhiben en una gran variedad de formas y tamaños. Se pueden encontrar desde las zonas litorales (hipo o hipersalinas) hasta los fondos oceánicos, y desde climas tropicales a fríos (Boudagher, 2015). Entre sus características más distintivas destaca el exoesqueleto, concha o testa, a través de la cual se extienden proyecciones de la misma célula en forma de pseudópodos. La concha o esqueleto segregado puede estar formado por carbonato de calcio o quitina (foraminíferos calcáreos), por pequeñas partículas de arena aglutinadas mediante un cemento orgánico o mineralizado (foraminíferos aglutinados o arenáceos) o por sílice segregado (Hart *et al.*, 2005). Esta concha (testa), la cual puede tener formas muy variadas, se divide en numerosas cámaras o forámenes, y es de ahí de donde obtiene su nombre (Jones, 1994).

Adicionalmente, la concha constituye el elemento básico para diferenciar los foraminíferos, y es la única estructura del organismo que fosiliza. Estos fósiles son muy abundantes en el sedimento marino, participando también en la formación de rocas sedimentarias. La composición química de las conchas consiste

en calcita, aragonita y sílice. La forma y dimensión de la cámara embrionaria depende de su origen, ya sea el producto de la reproducción sexual o asexual (Lipps, 1993). Durante su ontogenia los foraminíferos, realizan un control del crecimiento y tamaño de las cámaras. Ese control lo hacen a través de la longitud y disposición de las corrientes pseudopodiales, ya que los seudópodos son los responsables de la formación de la membrana orgánica que precede a la concha mineral (Lipps, 1993). La morfología de las conchas o caparzones de los foraminíferos varía enormemente: éstas pueden estar formadas por una sola cámara (concha unilocular) o por varias cámaras (concha multilocular); las conchas multiloculares están divididas por tabiques internos o septos y presentan suturas, definidas por las líneas de contacto entre cámaras (Boudagher, 2015). Además de su importancia paleontológica durante la evolución biológica, los foraminíferos son la herramienta bioestratigráfica por excelencia en la exploración petrolera, pues poseen una alta resolución temporal y geográfica, además de ser abundantes y diversos (Haq y Boersma, 1978; McGowran, 2005). Considerando el alto porcentaje de organismos preservados por fracción de muestra son los microorganismos más numerosos de todos los protistas conocidos. Por todos sus atributos paleontológicos, los microfósiles de foraminíferos planctónicos constituyen una herramienta muy valiosa y ampliamente utilizada en el análisis de estratos rocosos en busca de agua

y petróleo (Arellano-Gil *et al.*, 2017). Como en todo el mundo, históricamente la industria petrolera habría impulsado la micropaleontología de foraminíferos, y tanto en México como en EUA se concentraron los esfuerzos en el Golfo de México (Alafita, 1988; Angeles-Aquino y Cantú-Chapa, 1992; Martin, 2013). En la industria petrolera los fluidos de composición química variable utilizados en operaciones de perforación de pozos de sondeo se conocen como lodos de perforación. Pese a su abundancia en muestras petroleras, el análisis del contenido de estos microfósiles en muestras colaterales resultantes de pozos exploratorios es muy escaso. Considerando el número de ejemplares, su recuperación a partir de núcleos y muestras de canal reviste una gran importancia especialmente en países como México, donde la perforación petrolera sigue siendo una metodología común. En este trabajo se describe brevemente la metodología para la extracción de foraminíferos en muestras de lodos de perforación y su uso potencial en paleontología y docencia.

2. Conceptos básicos durante la perforación de un pozo petrolero

La perforación de un pozo incluye diversas etapas, entre las que se incluye el diseño, construcción del pozo, terminación, seguimiento de integridad y abandono, por lo cual la aplicación correcta de dicha metodología influye de manera importante en la verificación de los modelos propuestos previamente por las compañías petrolera mediante métodos indirectos como el registro de Rayos Gamma y la conductividad eléctrica. De este modo se evalúan y detectan variaciones, o bien se realizan ajustes para dichos datos preliminares. Durante la perforación del pozo y durante su actividad rotatoria, la barrena avanza a través de la roca en el subsuelo, por consiguiente, una porción equivalente de la roca triturada debe ser desplazada hacia la superficie para continuar un avance adecuado de la herramienta.

Es mediante el lodo de perforación que los recortes o muestras de canal o esquirlas son arrastrados hasta la superficie. Al iniciar una perforación vertical y durante su desarrollo, se encuentran primeramente los estratos de roca ubicadas en posiciones superiores equivalentes a las rocas más jóvenes; es decir, las cimas de las formaciones es lo primero que se observa y, por ende, lo primero que debiera ser caracterizado (Fig. 1). Para el Cenozoico es el material rocoso y sedimento de menor consolidación es lo que primero que generalmente se observa; para este rango temporal que el estudio e identificación de foraminíferos

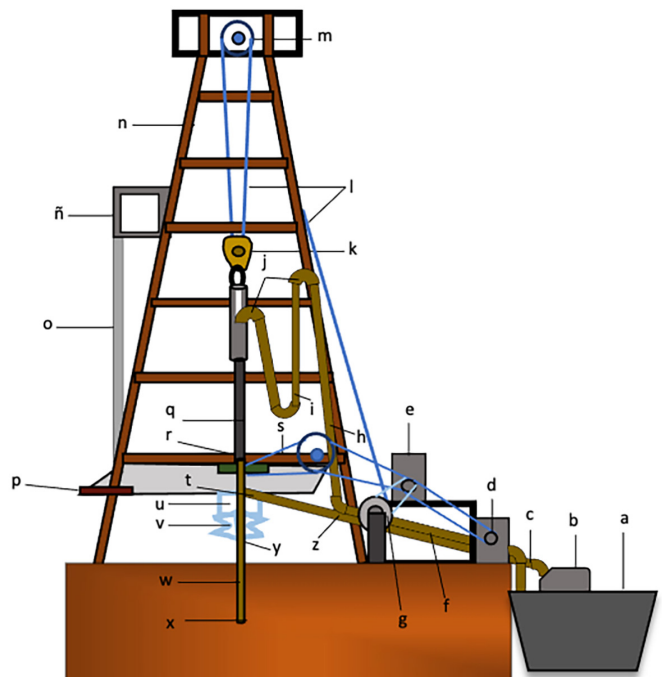


Figura 1. Componentes básicos del equipo de perforación terrestre. (a) Tanque de lodo. (b) Temblorinas o Zarandas. (c) Línea de succión. (d) Bomba de lodo. (e) Motor. (f) Manguera de la bomba. (g) Carrete del aparejo. (h) Línea vertical. (i) Manguera de lodo. (j) Gancho. (k) Aparejo viajero. (l) Cable del aparejo. (m) Bloque corona. (n) Estructura. (ñ) Piso de enganche. (o) Lingadas. (p) Rack. (q) Unión giratoria ó Swivel (en equipos modernos “top drive”). (r) Barra o Kelly. (s) Mesa rotaria. (t) Piso de perforación. (u) Bell nipple. (v) Válvula (BOP) anular. Válvula (BOPs) ciega y de cañería. (w) Sarta de perforación. (x) Mecha o barrena (Trépano). (y) Cabeza del “casing”. (z) Línea de retorno de lodo. (Tomado de Méndez-Berlanga, 2022).

provenientes de muestras de canal es por norma el más utilizado debido a la naturaleza “suelta” de las muestras obtenidas, evitando así pérdida de tiempo en un proceso de disgregación de material sumamente consolidado.

Generalmente al momento de detectar litologías durante la perforación, supuestamente correspondientes al Mesozoico, que son rocas mucho más duras y consolidadas, se tiende a optar por realizar el estudio del contenido microfósil mediante la elaboración de láminas delgadas de las mismas muestras de canal o a partir de la extracción de núcleos para un intervalo determinado. Existe el consenso de que la información bioestratigráfica de mayor calidad proviene justamente del análisis de núcleos. En contraste, las muestras de canal son utilizadas en mucho menor medida debido a la naturaleza suelta en la que se presentan, puesto que hace es frecuente la presencia de organismos “caídos” procedentes de metros perforados previamente, por ende, son muestras susceptibles de contaminación (Barret, 2011).

Esto supone una gran desventaja que debe ponderarse con la gran ventaja de que al ser los recortes o muestras de canal derivados de la perforación, su extracción es un paso necesario y por tanto no genera costo extra alguno. Además, la disponibilidad de estas muestras, conocidas como recortes, serán en cantidades cuantiosas de la misma roca removida. Como los recortes no son considerados como primera opción, se dejan sin analizar una gran cantidad de muestras con gran información paleontológica y geológica potencial (Méndez-Berlanga, 2022). De ahí que se haga evidente y necesaria su caracterización por lo menos y la evaluación del tipo de información paleontológica pueda ser extraída por métodos relativamente simples. Dichos métodos son susceptibles de mejora y hasta podrían ser comparables en rendimiento y calidad de información a los datos obtenidos mediante análisis de núcleos en algunos casos.

Al mismo tiempo, son muestras representativas que han brindado información y bases metodológicas para abordar desde el punto

de vista científico, económico y profesional. En la industria petrolera la evaluación, tanto el diagnóstico micropaleontológico como la descripción litológica, son parte esencial para llevar a cabo un control geológico integral de pozo, ya sea uno exploratorio o en monitoreo de operación (Sierra y Salazar, 1999). A pesar de que el proceso de estudio de foraminíferos en roca disgregada no es la mejor fuente para obtener información de las formaciones perforadas del Mesozoico, ni es la fuente más útil en pozos productivos o de prospección en el caso de pozos exploratorios, no se puede negar la abundancia de foraminíferos planctónicos contenidos en las muestras de canal después de la perforación y acorde a la composición química de los fluidos de perforación (Fig. 2).

Por lo que el objetivo de este trabajo es presentar una breve evaluación sobre la viabilidad de la disgregación de roca, separación, extracción de foraminíferos y posterior identificación como archivos paleontológicos y bioestratigráficos que generalmente no son totalmente aprovechados mediante este método específico. La información contenida en dichos recortes puede ser comparada, cotejada y correlacionada con la obtenida de otros pozos en el mismo intervalo bioestratigráfico.

3. Metodología

Las muestras provienen de la provincia del Sureste se define como la provincia de petróleo y gas más prolífera del país, y comprende a las cuencas: Salina del Istmo, Comalcalco, Macuspana y Pilar Reforma Akal. Conforman junto a la Plataforma Burro-Picachos, Cuenca de Burgos, Sabinas, Tampico-Misantla, Veracruz, Cinturón Plegado de Chiapas y la Plataforma de Yucatán, las Provincias Petroleras de México (Figura 3).

La fuente de las muestras donadas por parte de una compañía petrolera deriva de un canal provenientes del pozo A, Cuencas del Sureste, correspondientes a un intervalo de 600 m desde la zona 6500 md* a la zona 6990 md

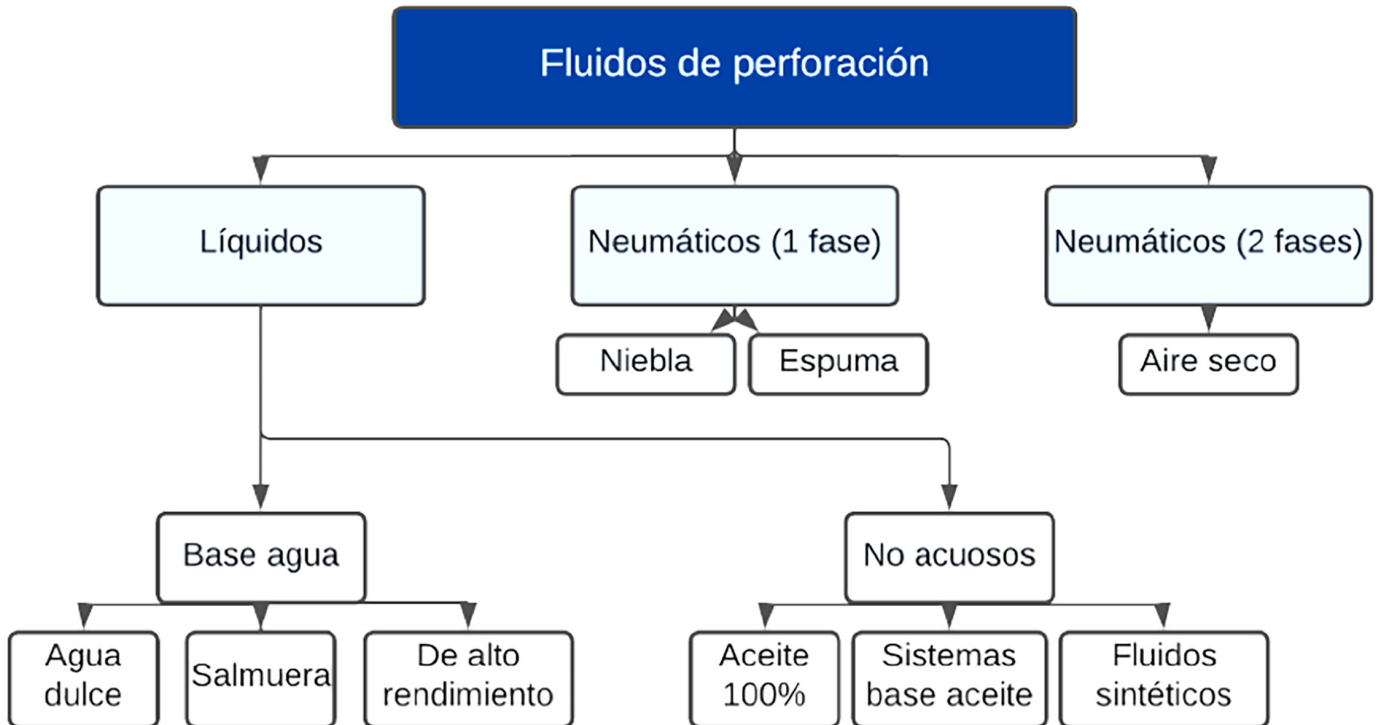


Figura 2. Tipos de fluidos de perforación (modificado de Caenn *et al.*, 2017).

que abarca edades del Jurásico al Cretácico Superior.

3.1. Metodología para muestras de canal

La preparación experimental de las muestras de canal que incluye un tratamiento o preparación experimental que consta de tres etapas descritas a continuación (Figura 4).

3.1.1. Etapa I: Eliminación de lodos

La etapa I consiste en la eliminación del lodo de perforación: el lavado de muestras obtenidas por perforación con lodo bentónico o polimérico (base agua), inicia al llenar un recipiente con agua donde la muestra se agita con las manos, eliminando así los posibles excesos de sedimentos y lodo presente, repitiendo el proceso las veces que sea necesario. Para el lavado de muestras obtenidas por perforación con lodo de emulsión inversa (base aceite), que es el caso utilizado en este trabajo para las muestras analizadas, se realizó con detergente biodegradable, y posteriormente se introducen a un horno de secado a 100°C para empaquetar (Figura 5).

3.1.2. Etapa II: Levigado

La segunda etapa consiste en aplicar el método de Levigado a todas las muestras, para lo cual se emplean los tamices No. 325 (45 µm), 230 (63µm), 80 (180 µm), 40 (330 µm), además de los guantes de neopreno y recipientes plásticos de 1 litro. Se añade H₂O₂ al 30% a cada una de las muestras, se dejan reposar (20–40 minutos), y posteriormente se tamizan en orden creciente de diámetro. Finalizado el tamizado se decantaron mediante un proceso de frotado enérgico contra la malla y se procura que vayan pasando de un tamiz a otro los restos de muestra (Figura 6).

A partir de esta etapa la extracción y el pegado de cada foraminífero individual se realiza bajo el microscopio (Figura 7).

3.1.3. Etapa III: Separación de Microfauna

Durante la última etapa se requiere precisión y cuidado debido a que consiste en la extracción individual de los microfósiles de foraminíferos planctónicos. Utilizando un pincel 000 se coloca en la charola graduada una muestra tamizada de fracción determinada, se separan mediante una aguja de disección y se procede

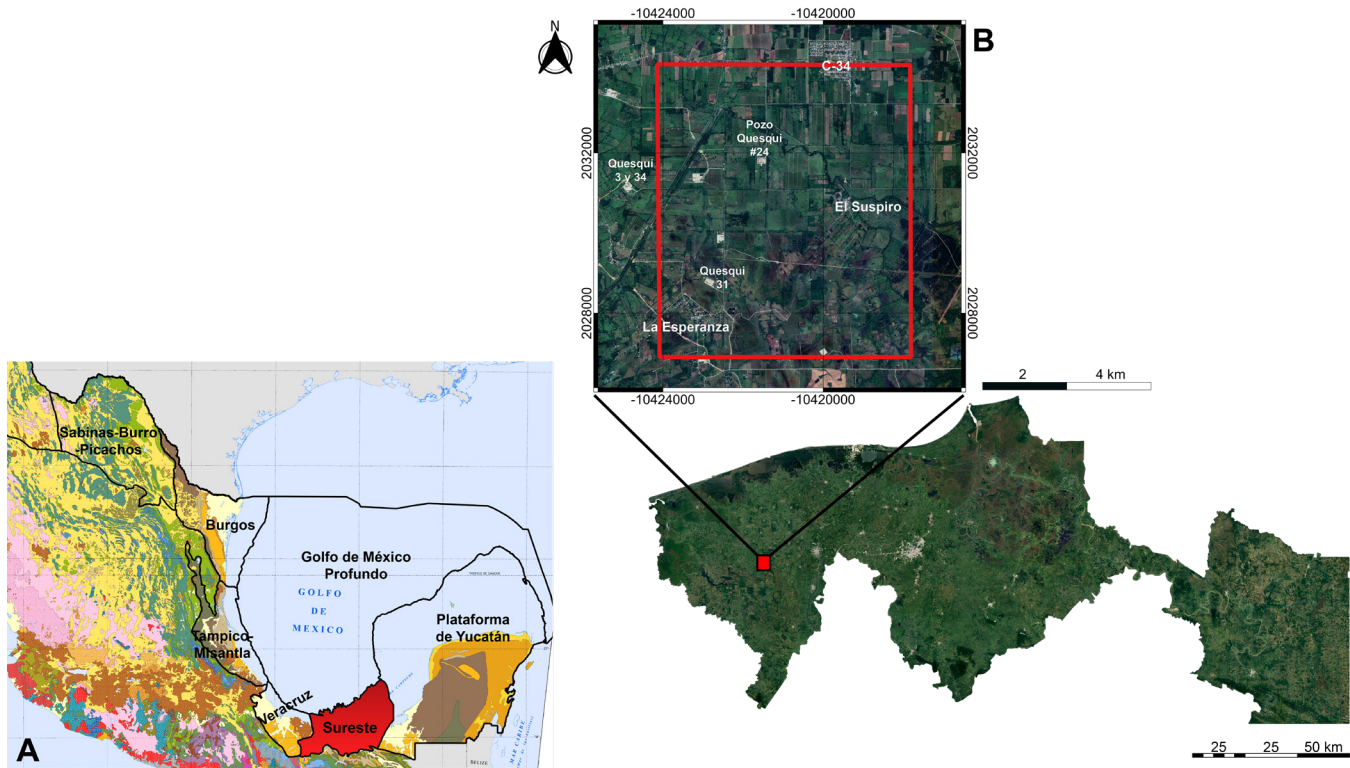


Figura 3. (A) Provincias petroleras de México (tomado de la Comisión Nacional de hidrocarburos). (B) Localización del área de estudio: en rojo se presenta una aproximación al Campo Quesqui localizado entre los municipios de Huimanguillo y Cárdenas en Tabasco, México.

a la extracción de cada microfósil individualmente. Posteriormente se adhieren con el pegamento en la placa micropaleontológica.

4. Rendimiento de microfósiles extraídos

Las muestras de canal obtenidas por perforación del pozo A se concentraron en un total de 64 sobres individuales. Una vez procesadas todas las muestras se procede a la fase de análisis para describir las características litológicas de la columna recuperada dividida en subintervalos, basándose primordialmente en las tonalidades presentes en cada una de las muestras de canal, desde una profundidad que abarca de los 6500 a 6955 metros. Muchas muestras presentaron tonalidades cafés rojizas avanzando a café pardo con intercalaciones de tonalidades grisáceas donde claramente se observó una dominancia de coloraciones grises y café oscuras al extremo final del intervalo. Estas tonalidades corresponden a margas con mayor contenido calcáreo intercaladas

con calizas (de los 6500 a 6700 m) y a calizas intercaladas, incluyendo las variaciones de composición margosa hacia mayoritariamente calizas puras (de 6700 a 6950 m). La descripción a detalle de cada subintervalo recuperado se dividió en secciones que abarcaron los intervalos muestreados: 6500–6600, 6600–6700, 6700–6800, 6800–6850, 6900–6952, los cuales se presentan en las figuras 8 y 9.

El examen microscópico preliminar de algunos ejemplares de foraminíferos reveló que la preservación era muy variable de uno a otro espécimen, por lo que posteriormente se realizaron observaciones de la morfología mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM). Con esta última etapa se determinó el grado de preservación de las testas a nivel superficial, así como la posibilidad de detectar alguna estructura diagnóstica en los diferentes ejemplares (Figura 10). En esta figura se muestran tres foraminíferos alterados en su textura superficial (figuras 10A–C) y un acercamiento para ilustrar los huecos o “roturas” de la testa, tal como se observó mediante micrografía



Figura 4. Diagrama de flujo simplificado para el procesamiento de las muestras de canal incluyendo el material de cada etapa.

electrónica. Los numerales 1 y 2 en la figura 10 indica una superficie íntegra o sin alterar (1), en contraste con una superficie alterada (2) o mal preservada.

La Figura 9 describe ejemplares correspondientes al caso uno, en los cuales su estado de preservación es bastante pobre y no permite realizar determinaciones taxonómicas ni descripciones complejas. Los ejemplares allí observados presentan tamaños entre 80 y 100 μm . Las observaciones de la morfología externa de los foraminíferos seleccionados presentan diferentes grados de preservación, y generalmente los atributos morfológicos diagnósticos para su identificación están pobre o medianamente preservados. En los cuatro ejemplares se observaron dos regiones claramente diferentes: la superficie no alterada original del microfósil, así como la presencia de una textura rasgada o maltratada con huecos, junto con microfracturas (Fig. 9) que permiten inferir que es posible mejorar la calidad y que

es durante el montaje donde se ha maltratado más el ejemplar. También esta técnica, como cualquier otra, es sujeta de mejoramiento.

La forma y el tamaño, sin embargo, si permiten en algunos casos distinguir algunos géneros muy familiares. También se observó que las texturas presentan una preservación diferencial, por lo que es difícil decir si se trata de efectos tafonómicos durante la fosilización o directamente durante la extracción, o incluso, durante el montaje en placas, pues son muestras extremadamente frágiles.

El estado en el que se encuentran estos ejemplares deriva de los métodos perforatorios en sí, por la naturaleza corrosiva para las conchas de foraminíferos de las que son característicos los componentes contenidos en los fluidos de perforación, sumado a la preparación fisicoquímica que conlleva el disgregar la roca que los contiene. Pese al pobre estado de preservación de algunos ejemplares, las numerosas testas de foraminíferos recuperadas en cada



Figura 5. (A–B). Lavado de recortes con jabón biodegradable, (C–D) Secado en horno a 100°C. (E–F) Empaquetado de las muestras.

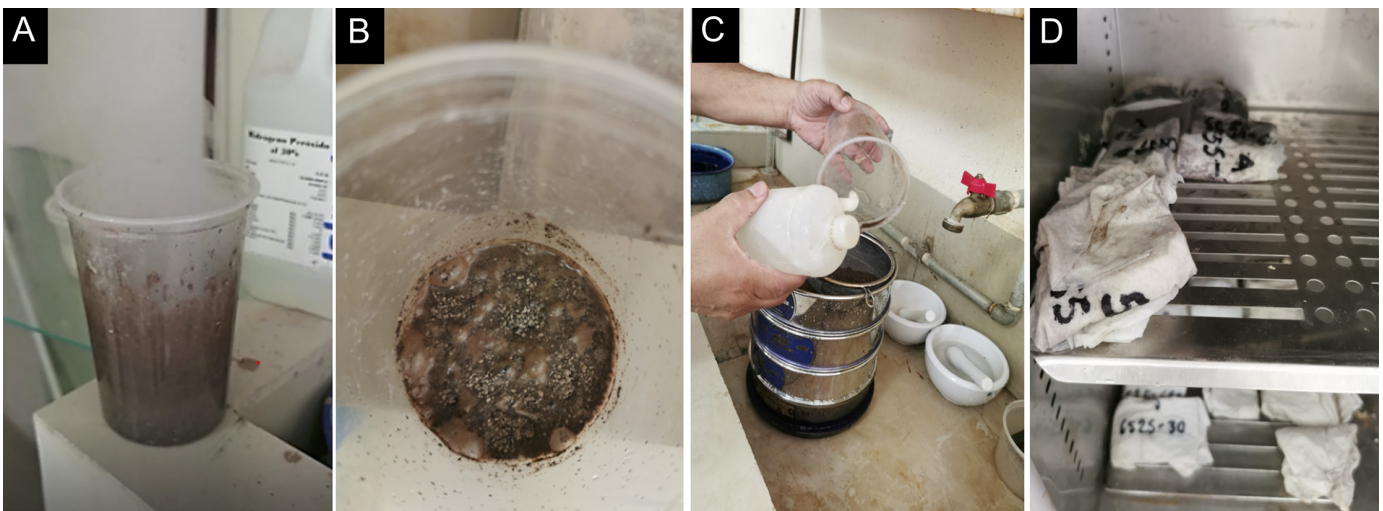


Figura 6. (A–B) Reacción de H_2O_2 componentes siliciclásticos en muestra. (C–D) Tamizado, separación y secado de recortes.

intervalo (Figs. 8 y 9) permite una valoración cualitativa de la abundancia relativa y la diversidad en formas y tamaños.

5. Discusión

En el intervalo seleccionado de la columna del pozo A, cuyo espesor aproximado es de seiscientos metros, y correspondiente a una profundidad de 6500 hasta 7000 metros, se observó la presencia de muchos géneros de foraminíferos, juzgando únicamente con base a su morfología y tamaño. Así mismo, se pudieron observar niveles de abundancia variable en

cada intervalo de recuperación. Este trabajo metodológico muestra el uso potencial de las muestras de lodo producidas colateralmente durante la exploración de un pozo petrolero. Las observaciones realizadas en todas las muestras sugieren que en general, el grado de preservación de los microfósiles es regular. Además del proceso de extracción, existen otros factores primarios que influyen en la pobre preservación, como lo es el efecto del calor a profundidades muy grandes. El calor que se produce es transmitido al lodo, el cual por circulación es llevado a la superficie, donde finalmente se disipa. Por consiguiente, el arrastre mecánico de las muestras, el calor

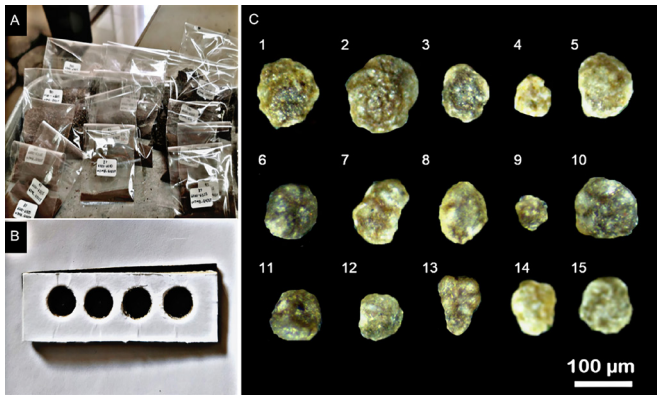


Figura 7. (A) Sobres conteniendo fracciones de muestra 45 μm, 63μm, 180 μm y 330 μm. (B) Placa micropaleontológica artesanal de 4 ventanas para colocación de microfósiles. (C) Fracción de foraminíferos planctónicos recuperados de tamaños aproximados a 100 μm.

ya la composición química de los fluidos de perforación empleados durante la exploración del pozo (Fig. 2), evidentemente son factores que no favorecen una buena preservación de las testas de foraminíferos.

Aunque la preservación realmente varía de regular a pobre (Figs. 7c y 9), es evidente el potencial que estas muestras consideradas en ocasiones desperdicio pueden tener en diferentes ámbitos. Sin embargo, en algunos casos hay microfósiles cuyo tamaño o preservación sugiere una observación más detallada en el SEM. En el caso de algunos ejemplares analizados no se pudieron obtener micrografías

Intervalo (MD)	Muestra tamizada (330 μm)	%	Litologías
6500 – 6505		100	Marga: Café rojizo, moderadamente dura.
6505 – 6510		100	Marga: Café rojizo, moderadamente dura.
6519 – 6520		-	Muestra muy contaminada por fragmentos de cemento. Marga: Café rojizo con microfracturas rellenas de calcita.
6525 – 6530		80 20	Marga: Café rojizo, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema con microfracturas.
6538 – 6540		100 TRZ*	Marga: Café rojizo, café oscuro, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, con microfracturas.

Intervalo (MD)	Muestra tamizada (330 μm)	%	Litologías
6605 – 6610		100 TRZ	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.
6615 – 6620		90 10	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.
6625 – 6630		80 20	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.
6640 – 6645		60 40	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.
6665 – 6670		90 10	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.

Figura 8. De la zona 6500 m a la zona 6990 m de profundidad, estando divididas en subintervalos tomados cada 5–10 m.

Intervalo (MD)	Muestra tamizada (330 µm)	%	Litologías	Intervalo (MD)	Muestra tamizada (330 µm)	%	Litologías
6705 – 6710		100 ESP	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.	6800 – 6805		90 10	Caliza: Gris oscuro, café claro, gris claro y blanco cremoso. Bentonita: Blanca y gris cremoso.
6715 – 6720		100	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura.	6825 – 6830		70 20 10	Caliza: Café claro, café oscuro, gris oscuro de aspecto arcilloso. Caliza: Gris claro, con microfracturas rellenas de calcita. Bentonita: Blanca y gris cremoso.
6765 – 6770		80 20	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.	6835 – 6840		100	Caliza: Gris claro, gris oscuro, café oscuro blanco crema, algunos fragmentos café oscuro de aspecto arcilloso, algunos fragmentos gris claro se encuentran parcialmente dolomitizados.
6775 – 6780		60 40	Marga: Café rojizo, café oscuro, gris, moderadamente dura. Caliza: Blanco crema, gris claro, con microfracturas rellenas de materia orgánica.	6845 – 6850		80 20	Caliza: Gris claro, gris oscuro, café oscuro y blanco crema. Dolomía: Gris claro, microcristalina..
6795 – 6800		90 10	Caliza: Gris oscuro, café claro, gris claro y blanco cremoso. Bentonita: Blanca y gris verdoso.	6895 – 6900		50 40 10	Caliza dolomitizada: Café claro y gris claro. Caliza arcillosa: Café oscuro y gris oscuro, con inclusiones de materia orgánica. Dolomía: Gris claro, microcristalina.

Figura 9. Subintervalos puntuales y cambios litológicos representativos para la columna estudiada en orden creciente de profundidad de los 6500 a los 6670 metros.

con mayor resolución debido a causas ajenas a la metodología de extracción, como fueron alteraciones durante el transporte al laboratorio y al montaje de los ejemplares individuales de foraminíferos en el portaobjetos para observación en el SEM.

Aun cuando el estudio de foraminíferos en roca disgregada no es la fuente principal para obtener información de las formaciones perforadas del periodo Mesozoico, ni son mayoritariamente útiles en pozos productivos, o en la prospección geológica en el caso de pozos exploratorios, los resultados de este trabajo hacen evidente que la información de estos lodos es escasa o inexistente, y que hay una

gran cantidad de información paleontológica potencial que se puede aprovechar técnica y científicamente. Aunque pueda parecer obvio, el análisis de recortes o muestras de canal es una actividad colateral a la perforación de pozo que brinda muestras frescas, numerosas y sin costo alguno, a diferencia de hace varias décadas, cuando el proceso de eliminación de lodo se realizaba cada 5 pies extrayendo el contenido de la cubeta (tubo con una válvula en la parte inferior), y vaciando los detritos agregados por el mismo proceso de perforación (Alafita-Méndez *et al.*, 1988). Aunque no sea viable la paleontología sistemática de cada ejemplar, aún así es posible obtener información útil

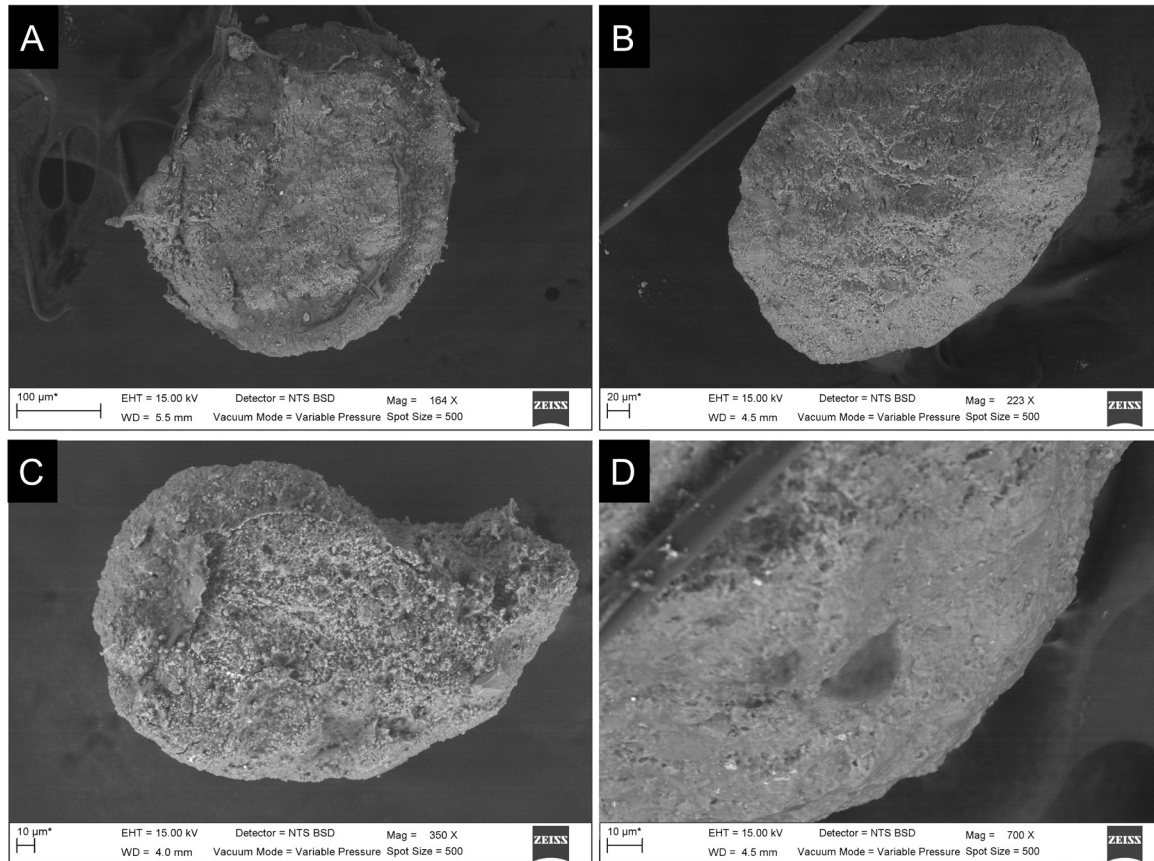


Figura 10. Micrografías SEM para la visualización de foraminíferos planctónicos derivados de las muestras de canal procesadas. (A) Foraminífero individual donde se observa el perímetro sin alterar de la testa (línea punteada) en contraste con la región central visiblemente alterada (2). (B) Foraminífero subsférico que muestra pequeñas diferencias en la textura superficial de la testa. (C) Foraminífero que muestra un área expuesta o “descarapelada” en el centro (región 2). (D) Aproximación visual al foraminífero que ilustra los huecos irregulares de la superficie de la testa del foraminífero en C.

con aplicación estratigráfica, especialmente porque la información existente publicada en materia de foraminíferos para la región sureste de México es muy limitada (Salvador, 1991; Padilla y Sánchez, 2007). Una gran ventaja hasta ahora viene dada por la gran abundancia de microfósiles que se obtienen en cada uno de los intervalos de extracción o metros desarrollados (MD). La otra gran ventaja es que son muestras que se utilicen o no, siempre van a estar disponibles sin costo alguno. Por esta razón esta metodología tiene un gran potencial ya que la utilización de diferentes compuestos químicos para extracción podría mejorarse para evitar el daño superficial de las testas de foraminíferos.

Por otra parte, a nivel de docencia y debido a la gratuidad y abundancia de estas muestras representan una gran oportunidad para

desarrollar las habilidades de manipulación de los estudiantes, así como sus habilidades de innovación y observación. Es decir, son muestras de entrenamiento que se pueden desperdiciar mientras los estudiantes aprenden las técnicas de extracción y trabajan con muestras frescas y reales, sin perjudicar en nada el costo o cualquier información paleontológica relevante. De hecho, se han realizado varios trabajos de investigación paleobiológica utilizando esta técnica como identificación preliminar de foraminíferos (Coronado Díaz, 2018; Córdoba Merino, 2018; Morales-Juárez, 2019; Guadiana Padilla, 2021; Coronado Díaz, 2022), la cual se ha logrado corroborar como una buena aproximación bioestratigráfica (Méndez-Berlanga, 2022). Adicionalmente, la metodología empleada durante la secuencia de exploración de pozos puede ser contrastada

y/o complementaria con otras metodologías comúnmente empleadas (Fertl *et al.*, 1983; Cordes *et al.*, 2016). Finalmente, el uso de estas muestras también abre una oportunidad para el ensayo y error de nuevos compuestos químicos de extracción y variantes en cada paso metodológico, por ejemplo, durante el lavado de lodo. También está la posibilidad de que eventualmente pudieran innovar y hasta proponer nuevas metodologías menos contaminantes que pudieran, con el tiempo, exportarse al proceso de barrenación de pozos petroleros. Precisamente, por la transición a energías verdes, tendrá que innovarse en nuevas tecnologías, especialmente en la industria petrolera, que sean compatibles con una aproximación integral que disminuya o ralentice el cambio climático (de Garidel *et al.*, 2022).

6. Conclusiones

Consideramos que la información más valiosa radica en el registro de los cambios de litología observados en las muestras más recientes, la cuales se podrían correlacionar a diferentes tipos de testas de foraminíferos con mayor o menor resistencia. Debido a que las muestras tienen una gran trazabilidad en cuanto a su profundidad es posible establecer estimaciones cualitativas en cuanto a la diversidad aparente de los microfósiles extraídos y en cuanto al número de ejemplares extraíbles en cada intervalo de extracción.

Es un método relativamente rápido, sin costo real porque el desperdicio de la exploración ingenieril viene a ser un tesoro por explorar a nivel paleobiológico. La mayor ventaja es que son muestras prácticamente gratuitas cuya caracterización ha sido subestimada como fuente de información bioestratigráfica, pero cuyo uso en docencia y laboratorio puede aportar nuevos conocimientos y habilidades para complementar los cursos de micropaleontología. Incluso estas muestras tan numerosas podrían servir como material de entrenamiento para ensayar diferentes tipos de compuestos orgánicos para extracción

de microfósiles, pues las metodologías siempre son objetivo de optimización y siempre hay un hueco de información metodológica que no ha sido abordado en estas muestras tan abundantes. La información contenida en dichos recortes puede ser comparada, cotejada y correlacionada con la obtenida de otros pozos del mismo intervalo bioestratigráfico. Aunque los foraminíferos derivados de estas muestras no son utilizados como archivos paleontológicos y bioestratigráficos, aún queda por explorar su relevancia paleoceanográfica y paleoecológica en proyectos multidisciplinarios. Los resultados pueden ser especialmente confiables al analizarse de manera conjunta con los registros geofísicos de pozos.

Agradecimientos

Los autores agradecen la dedicación y sugerencias de los revisores anónimos, así como la ayuda profesional del equipo editorial de PM. También se agradece el apoyo institucional de la Facultad de Ciencias de la Tierra (UANL) y de la Facultad de Ciencias Biológicas (UANL) que brindaron en cada fase del trabajo de tesis (WJMB), así como a la institución que donó las muestras. Se agradece el apoyo parcial al proyecto CONAHCyT CF-2439 (E. Chacón).

Referencias

- Alafita Méndez, L., Benítez Juárez, M., & Olvera Rivera, A. (1988). *Historia Gráfica de la Industria Petrolera y sus Trabajadores (1900-1938)*. Tuxpan, Veracruz: Universidad Veracruzana, PEMEX, Instituto Veracruzano de la Cultura; México.
- Angeles Aquino, F. J., & Cantú Chapa, A. (1992). Subsurface Upper Jurassic Stratigraphy in the Campeche Shelf, Gulf of Mexico. En C. Bartolini, R. T. Buffler, & A. Cantú Chapa (Eds.), *The Western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, Sedimentary Basins, and Petroleum Systems* (pp. 343–352). American Association of Petroleum Geologists Memoir, 75.
- Arellano Gil, J., Soto Ayala, R., & Pérez Martínez, A. L. (2017). *Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y aplicaciones*. DGAPA UNAM.
- Barrett, M. L. (2011). *Drilling Mud: A 20th Century History*. International Symposium on the History of the Oil Industry.
- Boudagher Fadel, M. K. (2015). *Biostratigraphic and Geological Significance of Planktonic Foraminifera*. UCL Press.
- Caenn, R., Darley, H., & Gray, G. R. (2017). *Composition and properties of drilling and completion fluids* (7 ed.). Gulf Professional Publishing.

- Cordes, E. E., Jones, D. O. B., Schlacher, T. A., Amon, D. J., Bernardino, A. F., Brooke, S., Carney, R., DeLeo, D. M., Dunlop, K. M., Escobar-Briones, E. G., Gates, A. R., Génio, L., Gobin, J., Henry, L.-A., Herrera, S., Hoyt, S., Joye, M., Kark, S., Mestre, N. C., Metaxas, A., Pfeifer, S., Sink, K., Sweetman, A. K., & Witte, U. (2016). Environmental Impacts of the Deep-Water Oil and Gas Industry: A Review to Guide Management Strategies. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 58. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00058>
- Córdoba Merino, G. (2018). Bioestratigrafía de la Formación La Peña, Cretácico inferior, en base a foraminíferos (Clase Rhizopoda) del Cañón de la Huasteca, Santa Clara, Nuevo León, México [Tesis de Maestría]. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Coronado-Díaz, M. (2018). Bioestratigrafía y microfácies de la Formación Cuesta del Cura (Cretácico Inferior) en la Cañada Guadalupe del municipio de Iturbide, Nuevo León, México [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México.
- Coronado-Díaz, M. (2022). Correlación microfaunística mediante el uso de foraminíferos y paleobiota asociada entre las Formaciones Cuesta del Cura y Agua Nueva pertenecientes al Cretácico superior (Cenomaniano-Turoniano) en algunas localidades del noreste de México [Tesis Doctoral]. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- de Garidel-Thoron, T., Chaabane, S., Giraud, X., Meilland, J., Jonkers, L., Kucera, M., Brummer, G.-J. A., Grigoratou, M., Monteiro, F. M., Greco, M., Martyn, P. G., Kuroyanagi, A., Howa, H., Beaugrand, G., & Schiebel, R. (2022). The Foraminiferal Response to Climate Stressors Project: Tracking the Community Response of Planktonic Foraminifera to Historical Climate Change. *Frontiers in Marine Science*, 9, 827962. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.827962>
- Fertl, M. W. (1983). Gamma ray spectral logging: A new evaluation frontier: part III - Measuring source rock potential. *World Oil*, 197(2).
- Guadiana Padilla, R. (2021). Interpretación Tafonómica y geoquímica de las Formaciones Eagle Ford y Agua Nueva del Cretácico superior, en dos localidades del noreste de México, Reconstrucción paleoambiental [Tesis de Doctorado]. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Haq, B. U., & Boersma, A. (1978). *Introduction to Marine Micropaleontology* (376 pp.). Elsevier.
- Hart, M., Armstrong, H. A., & Brasier, M. D. (2005). *Microfossils* (2n ed., 296 pp.). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1017/S001675680621238X>
- Jones, R. W. (1994). *The Challenger Foraminifera*. Oxford University Press.
- Lipps, J. H. (1993). Single-Cell Fossils. *Science*, 260, 565–566.
- Martin, R. E. (2013). The evolution of Gulf coast Micropaleontology: from biostratigraphy to chronostratigraphy. En A. J. Bowden, F. J. Gregory, & A. S. Henderson (Eds.), *Landmarks in Foraminiferal micropaleontology* (pp. 103–124), Geological Society of London, Bertforms Information Press Ltd.
- McGowran, B., (2005). *Biostratigraphy: Microfossils and Geological time*. Cambridge University Press.
- Méndez-Berlanga, W. J. (2022). Caracterización litobioestratigráfica basada en foraminíferos planctónicos de muestras de canal pertenecientes a pozo A campo Quesqui, cuencas del sureste [Tesis Profesional]. Campus Linares, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Morales-Juárez, S. P. (2019). Reconstrucción paleoambiental de la Formación Eagle Ford en dos núcleos del Noroeste de Coahuila, con base a la macro y microfauna [Tesis de Maestría]. Campus Nueva Rosita, Universidad Autónoma de Coahuila.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 1, 19–42.
- Pawlowski, J., Holzmann, M., Berney, C., Samuel S., & Bowser, S. S. (2003). The evolution of early Foraminifera, *PLOS*, 100(20), 11494–11498. <https://doi.org/10.1073/pnas.2035132100>
- Salvador, A. (1991). Origin and development of the Gulf of Mexico Basin, in A. Salvador, ed., *The Gulf of Mexico Basin. Geological Society of America, J: The Gulf of Mexico Basin*, 389–444. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-J.389>
- Sierra, M., & Salazar, G. (1999). Principales tipos de lodos empleados en la perforación de pozos de gas, aceite o agua. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 13, 118–131.