

Primer registro de los icnogéneros *Macaronichnus* y *Phycosiphon* en el Pérmico medio (Wordiano) de Coahuila, México: Consideraciones paleoambientales

First record of the ichnogenera Macaronichnus and Phycosiphon in the middle Permian (Wordian) of Coahuila, Mexico: Paleoenvironmental considerations

Campos-Méndez, Mirhan¹, Fernández-Barajas, María del Rosario²;
Torres-Martínez, Miguel Angel^{3,*}; Quiroz-Barragán, Jesús⁴

¹Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

²Laboratorio de Ciencias de la Tierra y Paleontología, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, 54090, Tlalnepantla, Estado de México, México.

³Departamento de Paleontología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

⁴Museo Paleontológico de La Laguna, Av. Juárez 580, Poniente, Colonia Centro, 27000, Torreón, Coahuila, México.

* miguelatm@geologia.unam.mx

Resumen

La Formación Las Delicias de Coahuila, México, es una unidad litoestratigráfica del Pérmico, bien reconocida por la gran diversidad y abundancia de invertebrados marinos fósiles que presenta. A pesar de que esta formación se ha estudiado desde diferentes puntos de vista, ya sea geológicos o paleontológicos, aún perdura una evidente escasez de trabajos relacionados con los icnofósiles de la región. En esta contribución se reporta por primera vez la presencia de dos icnogéneros para el Pérmico de México: *Macaronichnus* y *Phycosiphon*. En el caso de *Macaronichnus* isp., ubicado en la parte superior de la sección (en un nivel de arenisca calcárea), se relacionó con una traza de pastoreo (*Pascichnia*), perteneciente a poliquetos infaunales, asociados con ambientes de alta energía, oxigenados y ricos en nutrientes. Por otro lado, *Phycosiphon incertum*, encontrado en la parte inferior de la sección (en un estrato de margas), se vinculó con una traza de alimentación (*Fodinichnia*), realizada por un organismo detritívoro infaunal oportunista, presente en ambientes marinos de baja energía, con materia orgánica fluctuante y poco oxígeno.

Palabras clave: Guadalupiano medio, icnofósiles, *Macaronichnus*, paleoambientes, *Phycosiphon*.

Abstract

The Las Delicias Formation of Coahuila, Mexico, is a Permian lithostratigraphic unit well-known for its high diversity and abundance of fossil marine invertebrates. Although this formation has been studied from different perspectives, whether geological or paleontological, there remains a clear scarcity of work related to the ichnofossils of the region. Thus, two ichnogenera: *Macaronichnus* and *Phycosiphon*, are reported for the first time in the Permian of Mexico. In the case of *Macaronichnus* isp., located in the upper part of the section (in a calcareous sandstone level), it was related to a grazing trace (*Pascichnia*), belonging to infaunal polychaetes, associated with high-energy, oxygenated, and nutrient-rich environments. On the other hand, *Phycosiphon incertum*, found in the lower part of the section (in a marl horizon), was linked to a feeding trace (*Fodinichnia*), carried out by an opportunistic infaunal detritivore organism, present in low-energy marine environments, with fluctuating organic matter and low oxygen.

Keywords: Ichnofossils, *Macaronichnus*, middle Guadalupian, paleoenvironments, *Phycosiphon*.

Cómo citar / How to cite: Campos-Méndez, M., Fernández-Barajas, M. del R., Torres-Martínez, M. A. & Quiroz-Barragán, J. (2025).

Primer registro de los icnogéneros *Macaronichnus* y *Phycosiphon* en el Pérmico medio (Wordiano) de Coahuila, México: Consideraciones paleoambientales. *Paleontología Mexicana*, 14(2), 133–141.

Manuscrito recibido: Mayo 29, 2025.

Manuscrito corregido: Junio 16, 2025.

Manuscrito aceptado: Junio 17, 2025



<https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2025.14.2.402>

1. Introducción

La Formación Las Delicias, ubicada en el suroeste del estado de Coahuila, México, en la Sierra Las Delicias, representa una unidad geológica que destaca por presentar los afloramientos pérmicos más jóvenes de Norteamérica. Su registro fósil marino es abundante y diverso, y su litología está compuesta principalmente por rocas volcánicas de granulometría variable (en su mayoría andesíticos y dacíticos), areniscas volcanoclásticas, areniscas calcáreas de grano fino-medio depositadas en medios someros, sedimentos marinos pelágicos finos que se depositaron por debajo del nivel de influencia del oleaje de tormentas, areniscas y conglomerados depositados por flujo de escombros u otras masas menos fluidas impulsadas por la gravedad, así como calizas alóctonas provenientes del borde de la cuenca (McKee *et al.*, 1999).

Los estudios paleontológicos de la región iniciaron con reportes de invertebrados como braquiópodos, corales rugosos y un briozoo (Haarman, 1913; Haack, 1914). Con el transcurso del tiempo, diferentes trabajos han enriquecido el conocimiento sobre las asociaciones fosilíferas de la formación; de manera que, actualmente se han identificado distintos taxones de una gran diversidad de grupos como conuláridos, braquiópodos, cefalópodos (ammonoideos, nautiloideos y bacrítidos), trilobites y osículos columnares de crinoideos (Sour-Tovar *et al.*, 2016; Torres-Martínez *et al.*, 2019; Quiroz-Barroso *et al.*, 2019; Heredia-Jiménez *et al.*, 2019, 2024; Villanueva-Olea *et al.*, 2021; Rosas-García, 2024; Alanis-Pavón *et al.*, 2025, aceptado). Sin embargo, a pesar del aumento de trabajos paleontológicos, el campo de la icnología permanece escasamente explorado para el Pérmico de Las Delicias, aun cuando su estudio puede proporcionar información sobre aspectos paleoambientales, paleobiológicos y paleoecológicos. Su importancia radica en que permiten obtener datos detallados sobre los parámetros ambientales que influyeron en el depósito de los sedimentos, ya que la formación de estas trazas estará

principalmente determinada por la anatomía del productor, su comportamiento y las condiciones del sustrato (Minter *et al.*, 2007, 2016). Además, para aumentar la precisión de estas interpretaciones, se estudia la etología y aspectos paleoecológicos de las trazas, como las estrategias de alimentación, icnodiversidad y densidad de icnofósiles (Buatois y Mángano, 2011). Con respecto a la Formación Las Delicias, hasta el momento solo se ha realizado el reporte de *Arachnostega*, un icnofósil hallado sobre conchas de gasterópodos de la localidad Las Difuntas, cuya edad fue asignada al Pérmico medio (Wordiano) (Quiroz-Barroso *et al.*, 2017).

Dada la escasez de trabajos que existen sobre los icnofósiles de la Formación Las Delicias, y considerando su importancia para el reconocimiento e interpretación de paleoambientes depositacionales es que se plantea el presente trabajo. Además de la identificación taxonómica, se discute la relación de estas trazas con su ambiente de formación, brindando información novedosa sobre las facies de una localidad recientemente descubierta del Wordiano (Pérmico medio) de Coahuila.

2. Área de estudio

2.1. Ubicación

La sección stratigráfica donde se colectaron los icnofósiles se ubica dentro del litosoma caótico Cerro Prieto de la Formación Las Delicias, entre las coordenadas 26°25'0.41" N y 102°55'33.4" W (Figura 1). La sección fue denominada Cerro Prieto dado que se localiza a las faldas del cerro del mismo nombre. Esta sección presenta 21 m de espesor, compuesta por una sucesión continua de intercalaciones de lutitas finas, calizas, margas y areniscas de grano fino. La presencia de diferentes braquiópodos, los cuales aún se encuentran bajo estudio, como *Paranorella imperialis*, *Leiorhynchoidea schucherti* y *Bryorhynchus bisulcatum* han permitido señalar que la sección pertenece al Wordiano (Guadalupiano medio).

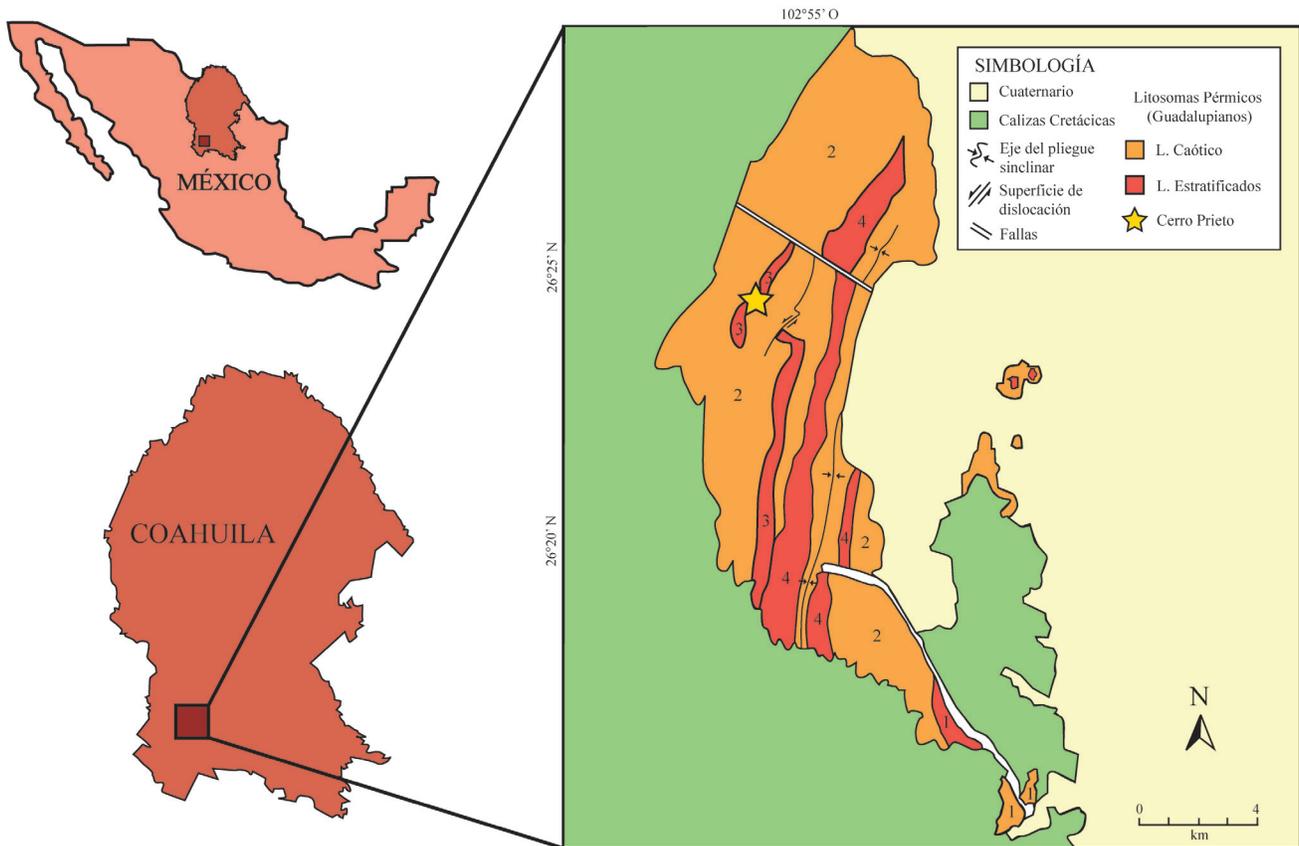


Figura 1. Mapa de la Sierra Las Delicias, mostrando el punto donde se levantó la sección Cerro Prieto.

2.2. Estratigrafía general

La Formación Las Delicias es una unidad del Pérmico inferior-medio (Cisuraliano-Guadalupiano), cuyas rocas afloran en la Sierra Las Delicias, ubicada al noreste de la ciudad de Torreón, Coahuila. Esta formación se caracteriza por sus rocas vulcano-sedimentarias de origen marino, las cuales se han asociado con un arco volcánico que estuvo activo a finales del Paleozoico (McKee *et al.*, 1988, 1999). Además, esta unidad es bien reconocida por la presencia de numerosos protistas e invertebrados marinos, incluyendo diferentes fósiles índice como fusulínidos, braquiópodos, ammonoideos y conodontos (King *et al.*, 1944; Wardlaw *et al.*, 1979; McKee *et al.*, 1999; Torres-Martínez *et al.*, 2019; Alanis-Pavón *et al.*, 2025, aceptado). Debido a la deformación post-deposicional de sus estratos el estudiar esta unidad ha representado un reto a diferentes niveles. Así, en campo es posible denotar

una clara discontinuidad en la sucesión vertical, una evidente variabilidad lateral de facies, e inconsistencia en los espesores de los estratos (King *et al.*, 1944; Wardlaw *et al.*, 1979; McKee *et al.*, 1999; Alanis-Pavón *et al.*, 2025, aceptado). Por esta razón es que la unidad no se ha podido estudiar de manera sencilla, e incluso McKee *et al.* (1988, 1999) propusieron su análisis mediante el uso de litosomas, diferenciados en estratificados y caóticos, los cuales han permitido dividir y estudiar con mayor precisión a la formación mediante estas unidades informales. Así, es que recientemente se ha recurrido al estudio individualizado por localidades de la Formación Las Delicias, lo que ha permitido reconocer no solo como fue la deposición de las rocas de áreas particulares sino también establecer edades relativas precisas de las mismas mediante el uso de diferentes fósiles índice, tal como braquiópodos (Herdía-Jiménez *et al.*, 2019, 2024; Torres-Martínez *et al.*, 2019) o ammonoideos (Alanis-Pavón *et al.*, 2025, aceptado) (Figura 2).

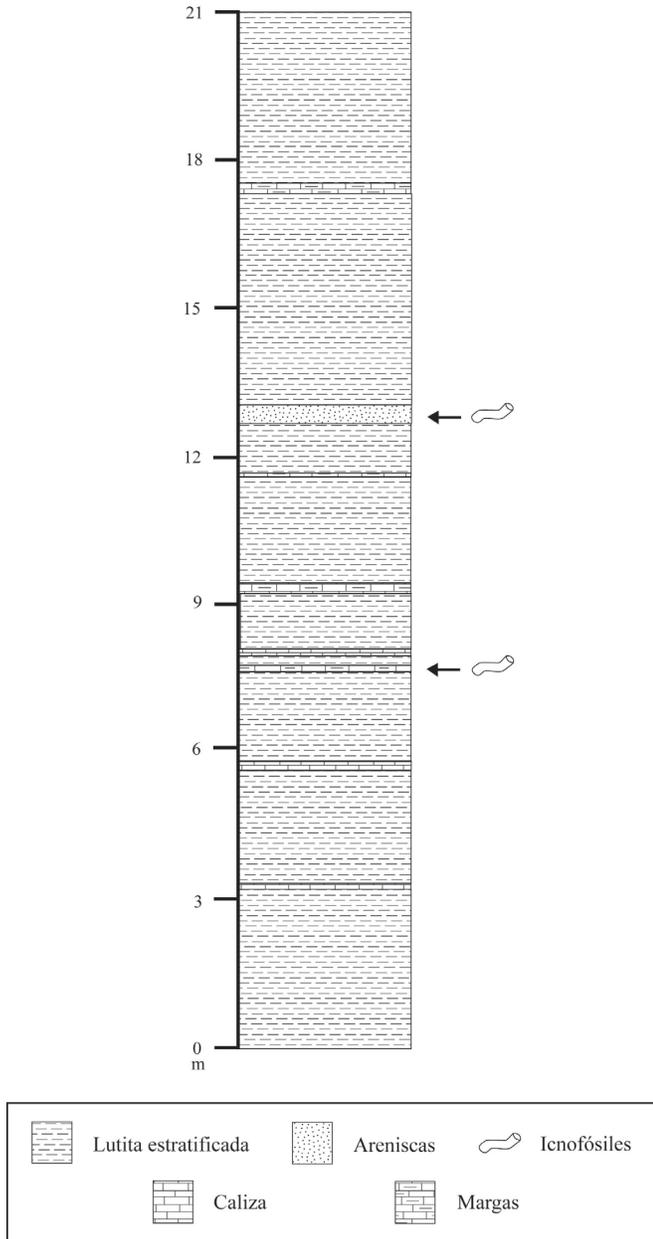


Figura 2. Columna estratigráfica de la sección Cerro Prieto, señalando los estratos donde se encontraron los ejemplares de icnofósiles estudiados.

3. Icnología sistemática

Los ejemplares estudiados están resguardados en la Colección Nacional de Paleontología del Instituto de Geología, UNAM. Estos cuentan con su acrónimo IGM (Instituto Geológico Mexicano) y su número correspondiente.

Icnogénero *Macaronichnus* Clifton y Thompson, 1978

Icnoespecie tipo. *Macaronichnus segregatis* Clifton y Thompson, 1978. Jurásico, Estados Unidos.

Macaronichnus isp.
(Figura 3A)

Material. Ejemplar IGM 14345.

Descripción. Galerías cilíndricas compactadas, delgadas, predominantemente horizontales respecto al plano de estratificación pero también verticales, circulares en sección transversal con un diámetro que varía entre 1–2 mm; rectas a sinuosas con una longitud máxima de 10 mm, sin ramificaciones y con interpenetraciones comunes; preservadas en relieve completo y en relieve positivo epignial; el sedimento del núcleo presenta un color más claro que la roca huésped, mientras que el manto de la traza se distingue por sedimento oscuro de grano grueso.

Etología. A partir del análisis del material fósil y observaciones actuales de interacciones de invertebrados con el substrato, este icnogénero se ha interpretado como una traza de pastoreo (*Pascichnia*), atribuida a poliquetos asociados a depósitos de materia orgánica (familia: *Opheliidae*) que se alimentan de biopelículas y detritos orgánicos epigranulares, comúnmente encontrados en sustratos arenosos o fangosos (Clifton y Thompson, 1978; Rouse y Pleijel, 2001; Nara y Seike, 2019).

Icnogénero *Phycosiphon* Fisher-Ooster, 1858

Icnoespecie tipo. *Phycosiphon incertum* Fisher-Ooster, 1858. Maastrichtiano, Suiza.

Phycosiphon incertum Fisher-Ooster, 1858
(Figura 3B)

Sinonimia.

1858 *Phycosiphon incertum* Fischer-Ooster, p. 59, figs. 15, 4.

1962 *Phycosiphon incertum*; Häntzschel, p. W208, fig. 129 (6a, b).

- 1971 *Phycosiphon incertum*; Chamberlain, p. 238, lám. 30, figs. 10, 13, 15; lám. 31, fig. 11.
- 1979 *Anconichnus horizontalis* Kern, 1978; Pickerill y Forbes, p. 2025, fig. 3a.
- 1989 *Phycosiphon incertum*; Stepanek y Geyer, p. 27, lám. 6, figs. 43-47.
- 1990 *Phycosiphon incertum*; Dam, p. 141, figs. 15, 19.
- 1994 *Anconichnus horizontalis*; Wetzel y Bromley, p. 1398-1400, figs. 2-5.
- 1996 *Phycosiphon incertum*; Orr *et al.*, p. 248, fig. 8C.
- 1998 *Phycosiphon incertum*; Głuszek, p. 536, figs. 14, 11C, 4A, 12B.
- 2006 *Phycosiphon incertum*; Gaillard y Racheboeuf, p. 1214, figs. 9.1, 9.2.
- 2007 *Phycosiphon incertum*; Uchman, p. 9257, fig. 15.8.
- 2008 *Phycosiphon incertum*; Naruse y Nifuku, p. 270-279, figs. 11, 12, 14.
- 2008 *Phycosiphon incertum*; Hovikoski *et al.*, p. 11, fig. 8E.
- 2018 *Phycosiphon incertum*; Hammersburg *et al.*, p. 29, figs. 16.1-16.6.
- 2019 *Phycosiphon incertum*; Dorador *et al.*, p. 17-18, fig. 3E.

Material. Ejemplar IGM 14346.

Descripción. Galerías irregulares sinuosas, principalmente paralelas a la capa de estratificación, pero también oblicuas a esta; circulares a ovaladas en sección transversal con un diámetro de 2–3 mm; preservadas en relieve completo; el sedimento del núcleo es oscuro, mientras que el del manto y la roca huésped es claro; ausencia de spreiten.

Etología. La morfología vermiforme y manipulación de sedimento que caracteriza este icnogénero ha sido interpretada como una traza de alimentación (Fodinichnia) realizada por un organismo detritívoro oportunista (Wetzel y Bromley, 1994). De acuerdo con Bednarz y McIlroy (2009) esta traza probablemente resulta de la ingesta selectiva de material arcilloso para procesar biomasa microbiana, materia orgánica disuelta, biopelículas en los granos de sedimento y la biomasa meiofaunal asociada.

4. Discusión

La propuesta de las icnofacies fue realizada por Seilacher (1964, 1967), y varios autores

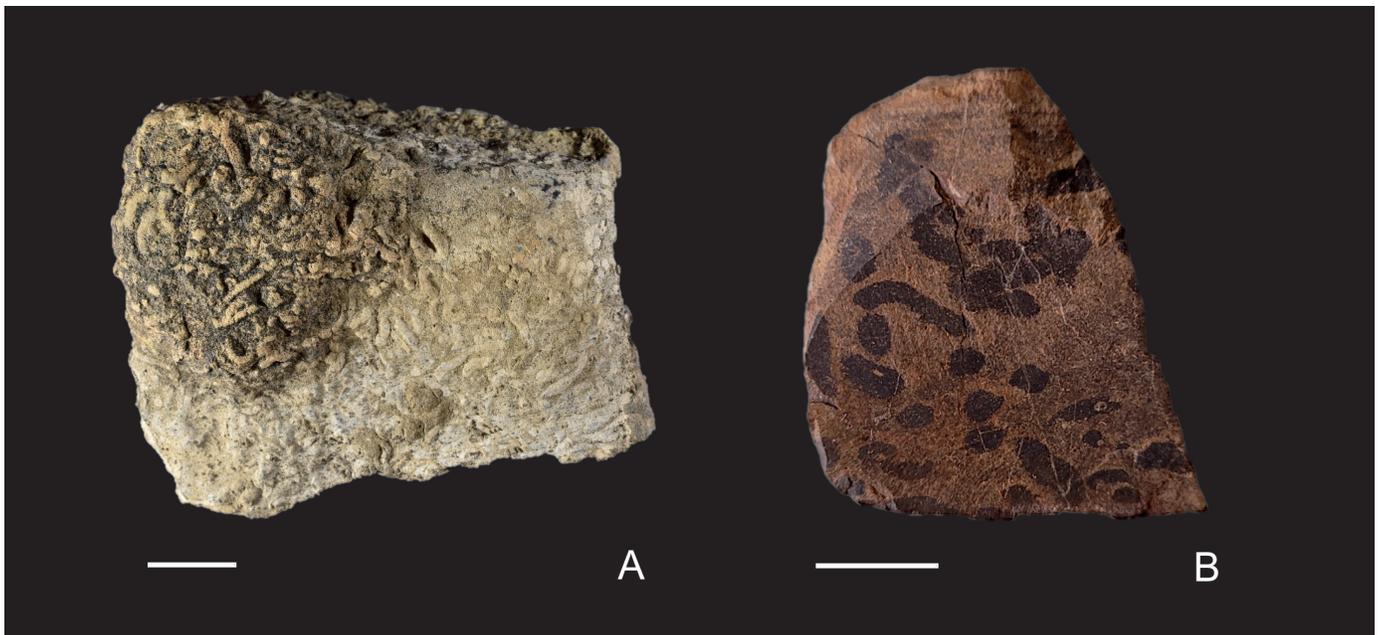


Figura 3. A) *Macaronichnus* isp. en vista horizontal, (IGM 14345). B) *Phycosiphon incertum* en vista transversal, (IGM 14346). Escala gráfica igual a 1 cm.

han contribuido a su refinamiento (Bromley *et al.*, 1984; Frey y Pemberton, 1984; Buatois y Mángano, 1995; Hunt y Lucas, 2007). Buatois y Mángano (2011), describen una icnofacies como una construcción conceptual basada en la identificación de características clave compartidas entre diferentes icnocenosis (grupo de fósiles traza producidos por una comunidad biológica) de un amplio rango de edades, formadas bajo condiciones ambientales similares.

Aunque, para determinar una icnofacies es necesario tomar en cuenta diferentes características clave (p. ej., etología dominante entre las estructuras, niveles de icnodiversidad, estrategias de alimentación) dentro de una muestra representativa de icnocenosis de diferentes edades, así como la articulación de estas características con factores ecológicos y procesos deposicionales. De esta forma, se logra extraer un modelo arquetípico biológico que resulta de una interacción compleja de parámetros físicos, que sirve de base para comparar distintos ensambles y finalmente construir interpretaciones paleoambientales (Buatois y Mángano, 2011). Así, se debe evitar la idea de que las icnofacies son indicadores de ambientes sedimentarios, ya que, lo que verdaderamente reflejan son respuestas de asociaciones faunísticas a un conjunto de condiciones ambientales particulares de un ambiente de depósito. Es decir, documentar la presencia de ciertas morfologías no es suficiente para analizar apropiadamente una icnocenosis (Buatois y Mángano, 2011).

Por consiguiente, a continuación, se presentan los análisis de los icnogéneros identificados en la sección Cerro Prieto. Con respecto a *Macaronichnus* isp. (presente en uno de los estratos de arenisca calcárea de la parte superior de la columna), se identificó de acuerdo con la clasificación de Bush *et al.* (2007), siendo considerada una traza de pastoreo que está asociada con hábitos infaunales y una movilidad libre y lenta. Sus rasgos etológicos han sido documentados por debajo de la interfaz sedimento-agua, lo cual conlleva una infiltración que resulta en un ambiente oxigenado y

rico en nutrientes. Si bien, las trazas horizontales se asocian comúnmente con ambientes de baja energía, *Macaronichnus* representa una excepción, ya que ocurre en ambientes de alta energía; la profundidad a la que se desarrollan las trazas de *Macaronichnus* favorece su potencial de conservación, al encontrarse fuera del alcance de la influencia del oleaje (Pemberton *et al.*, 2001; Buatois y Mángano, 2011), siendo característica de sustratos arenosos marinos poco profundos (Clifton y Thompson, 1978; Bromley, 1996; Pemberton *et al.*, 2001; Gingras *et al.*, 2002; Quiroz *et al.*, 2010; Seike *et al.*, 2011; Uchman *et al.*, 2016; Nara y Seike, 2019). Adicionalmente, el icnogénero ha sido reconocido como una herramienta paleoceanográfica y paleoclimática, ya que permite indicar condiciones de agua fría, independientemente de la latitud a la que se encuentre (Quiroz *et al.*, 2010).

Phycosiphon incertum es una traza de alimentación asociada a un organismo detritívoro infaunal con movilidad libre y lenta (Wetzel y Bromley, 1994; Bush *et al.*, 2007). Sus rasgos etológicos han sido documentados en ambientes marinos, e inicia a partir de 15 cm por debajo de la interfaz-sedimento agua. Su presencia se ha reportado en sustratos variables (desde lodo hasta arena fina), pero predomina en limolitas ricas en arcilla, encontrándose en una batimetría que abarca desde zonas marinas someras hasta profundidades batiales y posiblemente incluso abisales (Kern, 1978; Wetzel y Bromley, 1994; Bromley, 1996; Bednarz y McIlroy, 2009). *Phycosiphon* es una traza generalmente asociada a ambientes de baja energía, en los cuales predominan este tipo de trazas horizontales generadas por organismos detritívoros. Además, se asocia con un contenido fluctuante de materia orgánica y déficit de oxígeno (Buatois y Mángano, 2011; Arregui *et al.*, 2023).

La interpretación de un ambiente de depósito específico en ambos niveles resulta limitada, ya que cada uno presenta únicamente un icnogénero. Como se ha establecido, las interpretaciones paleoambientales deben basarse en el análisis de icnocenosis, lo cual no es

factible ante una diversidad icnológica reducida. En consecuencia, sólo es posible vincular las trazas fósiles observadas con condiciones ambientales que probablemente influyeron en los respectivos contextos de sedimentación. Cabe resaltar que, en la sección estudiada también se detectó la ocurrencia de diferentes fósiles de invertebrados, incluyendo esponjas, braquiópodos y gasterópodos, aunque no en los mismos horizontes que los icnofósiles. La integración de este contenido fosilífero adicional podría enriquecer la reconstrucción paleoambiental de la localidad de Cerro Prieto, aportando más información sobre sus condiciones de depositación.

La presencia en México de los icnogéneros aquí descritos se restringe a depósitos mesozoicos; por ejemplo, *Macaronichnus* del Cretácico Temprano de Coahuila (Ocampo-Díaz *et al.*, 2008) y *Phycosiphon* del Cretácico Tardío de Baja California (Callow *et al.*, 2013). Es así que, este trabajo representa el primer registro de ambos icnogéneros para el Pérmico de México.

5. Conclusiones

Se reporta por vez primera la presencia de los icnotaxones *Macaronichnus* y *Phycosiphon* para el Pérmico de México, los cuales se encontraron en la sección Cerro Prieto de la Formación Las Delicias de Coahuila.

Macaronichnus isp. se ha relacionado con una traza de pastoreo (Pascichnia), generada en depósitos de materia orgánica por anélidos poliquetos. En cuanto a *Phycosiphon incertum*, su presencia se asocia con una traza de alimentación (Fodinichnia), originada por un organismo detritívoro oportunista.

Macaronichnus isp., encontrado en un nivel de arenisca calcárea de la parte superior de la sección, se interpretó como una traza de pastoreo que está asociada con hábitos infaunales. Esta se puede asociar con un ambiente de alta energía, oxigenado y rico en nutrientes, fuera del alcance de la influencia del oleaje.

Phycosiphon incertum, presente en un estrato margoso de la parte inferior de la sección, representa una traza de alimentación relacionada con un organismo detritívoro infaunal. En este caso, su etología se restringe a ambientes marinos de baja energía, con materia orgánica fluctuante, presente en sustratos variables y pobremente oxigenados. Además, se ha reportado en batimetrías que van de aguas someras a zonas profundas.

Agradecimientos

Agradecemos la asistencia brindada por Daniela Paulina Heredia-Jiménez y Edwin Aldrin Juárez-Aguilar durante el trabajo de campo, también a José Roberto Ovando Figueroa por su apoyo en la toma de fotografías de los ejemplares. MATM agradece el apoyo proporcionado por el proyecto PAPIIT-DGAP-UNAM IN114623, el cual financió el presente trabajo. Los autores agradecen las revisiones y comentarios realizados por dos árbitros anónimos, los cuales enriquecieron ampliamente el manuscrito original. Los autores agradecen al Dr. Josep Moreno, la Mtra. Sandra Ramos y al Mtro. León Felipe Álvarez por su apoyo editorial.

Referencias

- Alanis-Pavón, A., Torres-Martínez, M. A., Moreno-Bedmar, J. A., & Utrup, J. (2025). Permian ammonoids from the Guadalupian (Wordian–Capitanian) of Las Delicias, Coahuila state, Mexico: new biostratigraphical and paleobiogeographical insights. *Journal of Paleontology*. (Accepted).
- Arregui, M. G., Giannoni, I. E., & Varela, A. N. (2023). Dominance of *Phycosiphon incertum* vs. *Zoophycos* in shelf environment: example of the Austral-Magallanes Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 155, 106384. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106384>
- Bednarz, M., & McIlroy, D. (2009). Three-dimensional reconstruction of “phycosiphoniform” burrows: implications for identification of trace fossils in core. *Palaeontologia Electronica*, 12.3, 12–15.
- Bromley, R. G. (1996). Trace Fossils: Biology, Taphonomy and Applications. London: Chapman & Hall. <https://doi.org/10.4324/9780203059890>
- Bromley, R. G., Pemberton, S. G., & Rahmani, R. A. (1984). A Cretaceous woodground: the *Teredolites* ichnofacies. *Journal of Paleontology*, 58, 488–498.

- Buatois, L. A., & Mángano, M. G. (1995). The paleoenvironmental and paleoecological significance of the lacustrine *Meriania* ichnofacies: an archetypical subaqueous nonmarine trace fossil assemblage. *Ichnos*, 4, 151–161. <https://doi.org/10.1080/10420949509380122>
- Buatois, L. A., & Mángano, M. G. (2011). Ichnology: Organism-substrate interactions in space and time. *Cambridge University Press*, 744.
- Bush, A. M., Bambach, R. K., & Daley, G. M. (2007). Changes in theoretical ecospace utilization in marine fossil assemblages between the mid-Paleozoic and late Cenozoic. *Paleobiology*, 33(1), 76–97. <https://doi.org/10.1666/06013.1>
- Callow, R. H., McIlroy, D., Kneller, B., & Dykstra, M. (2013). Integrated ichnological and sedimentological analysis of a Late Cretaceous submarine channel-level system: The Rosario Formation, Baja California, Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 41, 277–294. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.02.001>
- Chamberlain, C. K. (1971). Morphology and ethology of trace fossils from the Ouachita Mountains, southeast Oklahoma. *Journal of Paleontology*, 212–246.
- Clifton, H. E., & Thompson, J. K. (1978). *Macaronichnus segregatis*; a feeding structure of shallow marine polychaetes. *Journal of Sedimentary Research*, 48(4), 1239–1302. <https://doi.org/10.1306/212f7667-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Dam, G. (1990). Palaeoenvironmental significance of trace fossils from the shallow marine Lower Jurassic Neill Klinger Formation, East Greenland. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 79(3–4), 221–248. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(90\)90019-4](https://doi.org/10.1016/0031-0182(90)90019-4)
- Dorador, J., Buatois, L. A., Mángano, M. G., & Rodríguez-Tovar, F. J. (2019). Ichnology of the Winnipeg Formation, southeast Saskatchewan: a glimpse into the marine infaunal ecology of the Great Ordovician Biodiversification Event. *Lethaia*, 52(2), 14–30. <https://doi.org/10.1111/let.12287>
- von Fischer-Ooster, C. (1858). Die fossilen Fucoiden der Schweizer-Alpen, nebst Erörterungen über deren geologisches Alter. *Huber, Bern*, 72.
- Frey, R. W., & Pemberton, S. G. (1984). Trace fossils Facies Models. En R. G. Walker (ed.), *Facies Models* (pp. 189–207). Geoscience Canada Reprint Series.
- Gaillard, C., & Racheboeuf, P. R. (2006). Trace fossils from nearshore to offshore environments: Lower Devonian of Bolivia. *Journal of Paleontology*, 80(6), 1205–1226. [https://doi.org/10.1666/0022-3360\(2006\)80\[1205:TFFNTO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/0022-3360(2006)80[1205:TFFNTO]2.0.CO;2)
- Gingras, M. K., MacMillan, B., Balcom, B. J., Saunders, T., & Pemberton, S. G. (2002). Using magnetic resonance imaging and petrographic techniques to understand the textural attributes and porosity distribution in *Macaronichnus*-burrowed sandstone. *Journal of Sedimentary Research*, 72(4), 552–558. <https://doi.org/10.1306/122901720552>
- Gluszek, A. (1998). Trace fossils from Late Carboniferous storm deposits, Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Acta Paleontologica Polonica*, 43(3), 517–546.
- Haack, W. (1914). Über eine marine Permfauna aus Nordmexiko nebst Bemerkungen über Devon daselbst. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 66, 482–504.
- Haarmann, E. (1913). Geologische Streifzüge in Coahuila. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 45, 18–47.
- Hammersburg, S. R., Hasiotis, S. T., & Robinson, R. A. (2018). Ichnotaxonomy of the Cambrian spence shale of the Langston Formation, Wellsville Mountains, northern Utah, USA. *Paleontological Contributions*, 2018, 20, 1–66. <https://doi.org/10.17161/1808.26428>
- Häntzschel, W. (1962). Trace fossils and problematica. En Moore, R. C. (ed.), *Treatise on invertebrate paleontology: part W* (pp. 177–245). Geological Society of America.
- Heredia-Jiménez, D. P., Alanis-Pavón, A., Quiroz-Barragán, J., Becerra-Rodríguez, A. G., & Torres-Martínez, M. A. (2019). Braquiópodos del Pérmico medio (Wordiano) de las Delicias, Coahuila, México. *Paleontología Mexicana*, 8(2), 89–96. <https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2019.8.2.229>
- Heredia-Jiménez, D. P., Alanis-Pavón, A., Torres-Martínez, M. A., & Quiroz-Barragán, J. (2024). A new rhynchonellid fauna (Brachiopoda) from the Wordian (middle Permian) of Coahuila, México: Stratigraphy and paleoenvironments. *Journal of South American Earth Sciences*, 149, 105195. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105195>
- Hovikoski, J., Lemiski, R., Gingras, M., Pemberton, G., & MacEachern, J. A. (2008). Ichnology and sedimentology of a mud-dominated deltaic coast: Upper Cretaceous Alderson Member (Lea Park Fm), western Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 78, 803–824. <https://doi.org/10.2110/jsr.2008.089>
- Hunt, A. P., & Lucas, S. G. (2007). Tetrapod icnofacies: a new paradigm. *Ichnos*, 14, 59–68. <https://doi.org/10.1080/10420940601006826>
- Kern, J. P. (1978). Paleoenvironment of new trace fossils from the Eocene Mission Valley Formation, California. *Journal of Paleontology*, 186–194. <https://www.jstor.org/stable/1303806>
- King, R. E., Dunbar, C. O., Cloud, P. E., & Miller, A. K. (1944). Geology and paleontology of the Permian area northwest of Las Delicias, southwestern Coahuila, Mexico. *Geological Society of America Special Papers*, 52, 1–170. <https://doi.org/10.1130/SPE52>
- McKee, J. W., Jones, N. W., & Anderson, T. H. (1988). Las Delicias basin: a record of late Paleozoic arc volcanism in northeastern Mexico. *Geology*, 16, 37–40. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0037:LDBARO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0037:LDBARO>2.3.CO;2)
- McKee, J. W., Jones, N. W., & Anderson, T. H. (1999). Late Paleozoic and early Mesozoic history of the las Delicias terrane, Coahuila, Mexico. In C. Bartolini, J. L. Wilson & T. F. Lawton (Eds.), *Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico* (vol 340, pp. 161–189). Geological Society of America Special Paper. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2340-X.161>
- Minter, N. J., Braddy, S. J., & Davis, R. B. (2007). Between a rock and a hard place: arthropods trackways and ichnotaxonomy. *Lethaia*, 40(4), 365–375. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2007.00035.x>
- Minter, N. J., Buatois, L. A., & Mángano, M. G. (2016). The conceptual and methodological tools of ichnology. *The trace-fossil record of major evolutionary events: Volume 1: Precambrian and Paleozoic*, 1–26. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9600-2_1
- Nara, M., & Seike, K. (2019). Palaeoecology of *Macaronichnus segregatis degiberti*: Reconstructing the infaunal lives of the travisiid polychaetes. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 516, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.12.011>
- Naruse, H., & Nifuku, K. (2008). Three-dimensional morphology of the ichnofossil *Phycosiphon incertum* and its implication for paleoslope inclination. *Palaios*, 23(5), 270–279. <https://doi.org/10.2110/palo.2007.p07-020r>
- Ocampo-Díaz, Y. Z. E., Jenchen, U., & Guerrero-Suastegui, M. (2008). Facies and depositional systems of the Galeana Sandstone Member (Tarais Formation, Lower Cretaceous, northeastern Mexico). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(3), 438–464.
- Orr, P. J., Benton, M. J., & Trewin, N. H. (1996). Deep marine trace fossil assemblages from the Lower Carboniferous of Menorca, Balearic Islands, western Mediterranean. *Geological Journal*, 31(3), 235–258. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1034\(199609\)31:3%3C235::AID-GJ706%3E3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1034(199609)31:3%3C235::AID-GJ706%3E3.0.CO;2-4)
- Pemberton, S. G., Spila, M., Pulham, A. J., Saunders, T., MacEachern, J. A., Robbins, D., & Sinclair, I. K. (2001). Ichnology and sedimentary of shallow to marginal marine systems. *Geological Association of Canada. Short Course Notes*, 15, 343.
- Pickerill, R. K., & Forbes, W. H. (1979). Ichnology of the Trenton Group in the Quebec City area. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(10), 2022–2039. <https://doi.org/10.1139/e79-188>
- Quiroz, L. I., Buatois, L. A., Mángano, M. G., Jaramillo, C. A., & Santiago, N. (2010). Is the trace fossil *Macaronichnus* an indicator of temperature to cold waters? Exploring the paradox of its occurrence in tropical coasts. *Geology*, 38(7), 651–654. <https://doi.org/10.1130/G30140.1>

- Quiroz-Barroso, S. A., Sour-Tovar, F., & Quiroz-Barragán, J. (2019). Dos especies nuevas de *Paraconularia* (Scyphozoa, Conulariidae) en la Formación Las Delicias, Pérmico inferior-medio de Coahuila, México. *Revista Brasileira de Paleontología*, 22(2), 120–130. <https://doi.org/10.4072/rbp.2019.2.04>
- Quiroz-Barroso, S. A., Sour-Tovar, F., Reyes-Gómez, G. G., Galeana-Morán, M. Á., & Quiroz Barragán, J. (2017). Presencia del icnogénero *Arachnostega* en el Pérmico de Coahuila, Norte de México [Resumen]. En *XV Congreso Nacional de Paleontología, Libro de resúmenes*, San Luis Potosí, México, p. 129.
- Rosas-García, H. (2024). *Nautiloideos y bacrítidos (Cephalopoda) del Pérmico medio de Coahuila, México: Implicaciones paleobiogeográficas y estratigráficas*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México. https://tesisunam.dgb.unam.mx/F/LE7X8TVB5ETQLI7M4YEXQ1BAJ1688YQSRLCLYMXJJ-VY8VRQQFR-28953?func=full-set-set&set_number=092218&set_entry=000005&format=999
- Rouse, G. W., & Pleijel, F. (2001). 8 Opheliidae Malmgren, 1867. Polychaetes. *Oxford university press, Oxford*, 53–56. <https://doi.org/10.1017/S0016756803278341>
- Seike, K., Yanagishima, S. I., Nara, M., & Sasaki, T. (2011). Large *Macaronichnus* in modern shoreface sediments: Identification of the producer, the mode of formation, and paleoenvironmental implications. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 311(3–4), 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.08.023>
- Seilacher, A. (1964). Biogenic sedimentary structures. En Imbrie J., & Newell N. (Eds.), *Approaches to Paleocology* (pp. 296–316). John Wiley & Sons.
- Seilacher, A. (1967). Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5(5–6), 413–428. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(67\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(67)90051-5)
- Sour-Tovar, F., Quiroz-Barroso, S. A., Quiroz-Barragán, J., Torres-Martínez, M. A., & González-Mora, S. (2016). Presencia de *Anisopyge perannulata* y *Ditomopyge* cf. *D. whitei* (Trilobita, Proetidae) en el Pérmico (Guadalupiano medio) de la Formación Las Delicias, Coahuila, norte de México. *Paleontología Mexicana*, 5(2), 103–109. <https://doi.org/10.22201/igl.05437652e.2016.5.2.209>
- Stepanek, J., & Geyer, G. (1989). Spurenfossilien aus dem Kulm (Unterkarbon) des Frankenwaldes. *Beringeria*, 1, 1–55.
- Torres-Martínez, M. A., Heredia-Jiménez, D. P., Quiroz-Barroso, S. A., Navas-Parejo, P., Sour-Tovar, F., & Quiroz-Barragán, J. (2019). A Permian (late Guadalupian) brachiopod fauna from northeast Mexico and their paleobiogeographic affinities. *Journal of South American Earth Sciences*, 92, 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.03.002>
- Uchman, A. (2007). Deep-sea ichnology: development of major concepts. En *Trace fossils: Concepts, problems, prospects* (pp. 248–267). Elsevier.
- Uchman, A., Johnson, M. E., Rebelo, A. C., Melo, C., Cordeiro, R., Ramalho, R. S., & Ávila, S. P. (2016). Vertically-oriented trace fossil *Macaronichnus segregatis* from Neogene of Santa Maria Island (Azores; NE Atlantic) records vertical fluctuations of the coastal groundwater mixing zone on a small oceanic island. *Geobios*, 49(3), 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2016.01.016>
- Villanueva-Olea, R., Quiroz-Barroso, S. A., Quiroz-Barragán, J., Torres-Martínez, M. A., & Sour-Tovar, F. (2021). Placas columnares de crinoideos de la Formación Las Delicias, Pérmico inferior y medio de Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(1), A040820. <https://doi.org/10.18268/bsgm2021v73n1a040820>
- Wardlaw, B. R., Furnish, W. M., & Nestell, M. K. (1979) Geology and paleontology of the Permian beds near Las Delicias, Coahuila, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 111–116. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90<111:GAPOTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90<111:GAPOTP>2.0.CO;2)
- Wetzel, A., & Bromley, R. G. (1994). *Phycosiphon incertum* revisited: *Achonichnus horizontalis* is its junior subjective synonym. *Journal of Paleontology*, 68(6), 1396–1402. <https://doi.org/10.1017/S0022336000034363>.