

Técnicas de estudio de icnofósiles de vertebrados e invertebrados continentales en territorio mexicano

Techniques for studying ichnofossils of continental vertebrates and invertebrates in the Mexican territory

Guerrero-Arenas, Rosalía^{1,*}; Bravo-Cuevas, Victor Manuel²;
Jiménez-Hidalgo, Eduardo¹

¹Laboratorio de Paleobiología, Instituto de Recursos, Universidad del Mar. Km. 2.5 Carretera Puerto Escondido-Sola de Vega, 71980, San Pedro Mixtepec, Oaxaca, México.

²Museo de Paleontología, Área Académica de Biología. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

* rosaliaga@zicatela.umar.mx

Resumen

Los icnofósiles son una fuente de información para la interpretación de los ambientes del pasado. Su estudio debe realizarse con prácticas adecuadas, de tal forma que se garantice la calidad de la información, así como su conservación a largo plazo y de sus localidades de procedencia. Con el fin de documentar las técnicas de campo que se practican en México, se refieren diversos casos de estudio de icnofósiles producidos por vertebrados e invertebrados continentales; asimismo, se describen las técnicas de rescate más usadas. Finalmente, se especifica la protección legal de los icnofósiles en México, así como algunos ejemplos exitosos de sitios protegidos.

Palabras clave: buenas prácticas, conservación, icnofósil continental, icnofósil terrestre, patrimonio icnológico, rescate.

Abstract

Ichnofossils represent a source of information for the interpretation of past environments. Their study must be executed with appropriate practices, attesting the quality of the information and the long-term conservation of the ichnofossils and their localities. Several Mexican case studies of ichnofossils produced by continental organisms are described to document the used field techniques, as well as the commonly used techniques of rescue are described. The legal protection of the ichnofossils in Mexico and some successful cases of protected sites are referred.

Keywords: conservation, continental trace fossil, good practices, ichnological heritage, rescue, terrestrial ichnofossil.

Cómo citar / How to cite: Guerrero-Arenas, R., Bravo-Cuevas, V. M., & Jiménez-Hidalgo, E. (2024). Técnicas de estudio de icnofósiles de vertebrados e invertebrados continentales en territorio mexicano. *Paleontología Mexicana*, 13(2), 105–113.

Manuscrito recibido: Febrero 21, 2024.

Manuscrito corregido: Junio 16, 2024.

Manuscrito aceptado: Junio 17, 2024.



1. Introducción

Los icnofósiles registran la actividad de los organismos en o dentro del sustrato, con el fin de mantener sus funciones (Goldring, 1999). El término *ichnofossil* (inglés americano) o *trace fossil* (inglés británico) se conoce en español como icnofósil o fósil traza, respectivamente. Sin embargo, con fines de uniformar el uso de estos términos con base en el inglés de procedencia, se sugiere utilizar solamente uno (Jorge Genise, comunicación personal, 2024).

Aunque el término *icnofósil* pueda ser aparentemente simple de comprender, existen diversas discusiones en torno a lo que se considera como tal y las estructuras que no. De acuerdo con Bertling *et al.* (2022), las marcas de raíces, los coprolitos, los regurgitalitos, los cololitos, los gastrolitos y diversas estructuras generadas por mordidas y raspado se consideran como icnofósiles. Por otro lado, no se consideran icnofósiles a las raíces, los estromatolitos, los huevos o las agallas en tejidos vegetales, entre otras estructuras. Estos mismos autores (Bertling *et al.*, 2022) proponen referir como cecidiotaxones (*cecidotaxon*, en inglés) a aquellos tejidos de organismos hospederos que reaccionan ante organismos, como las agallas (también conocidas como cecidias) de las plantas, y no como un tipo de icnofósil.

Debido a que los icnofósiles generalmente se encuentran en el sitio en el que se formaron (*in situ*), es posible relacionarlos con ambientes de depósito y litología particulares. De manera simple, podemos referir a los icnofósiles de ambientes continentales, transicionales y marinos. De igual forma, también podemos referirnos informalmente a los icnofósiles producidos por vertebrados e invertebrados.

Las aplicaciones de la información derivada de icnofósiles puede ser de diferente índole: paleobiológica (como evolución del comportamiento, recolonización o información de animales con cuerpo blando), geoquímica (niveles de oxígeno o salinidad) y sedimentológica (distribución de porosidad, indicadores de corriente o naturaleza del sustrato) (Goldring, 1999). Los icnofósiles continentales ofrecen información sobre condiciones paleoambientales, paleoclimáticas y la historia de vida de sus productores.

Los objetivos de este artículo son: 1) Recopilar las técnicas habituales en el estudio de icnofósiles de vertebrados e invertebrados continentales, con base en estudios de caso en territorio mexicano; 2) Resumir las principales técnicas usadas en rescate de icnofósiles continentales en México y 3) Discutir el marco legal y las medidas de protección con que cuentan diversos afloramientos icnofosilíferos en el país.

2. Técnicas de estudio

Por su naturaleza, el estudio de los icnofósiles demanda técnicas específicas para obtener la mayor parte

de los datos en campo. En varios casos, es imposible recolectar el ejemplar o los ejemplares para su resguardo posterior en alguna colección, por lo que deben dejarse en la zona de origen. Por ello, es necesario considerar diversas medidas de registro y protección a largo plazo, incluso desde la planeación de la salida al campo.

Con el fin de ejemplificar diversas técnicas de estudio, a continuación se abordará una recopilación de estudios de caso con icnofósiles hallados en México, tanto de vertebrados como de invertebrados.

2.1. Vertebrados continentales

El registro de icnofósiles de vertebrados continentales de México consiste en huellas, coprolitos y madrigueras. La diversidad icnológica conocida tiene un alcance geocronológico del Jurásico Medio al Pleistoceno y se asocia a huellas de dinosaurios, pterosaurios, cocodrilos, tortugas, aves y mamíferos (Rodríguez de la Rosa *et al.*, 2004; Bravo-Cuevas y Rodríguez de la Rosa, 2014), coprolitos de dinosaurios y mamíferos (Rodríguez de la Rosa *et al.*, 1998; Bravo-Cuevas *et al.*, 2017), así como madrigueras producidas por mamíferos pequeños (Guerrero-Arenas *et al.*, 2020).

2.1.1. Huellas

Las huellas representan la evidencia más común y mejor documentada entre los icnofósiles de vertebrados continentales de México, con un número importante de localidades mesozoicas y en menor medida cenozoicas. El primer reporte de este tipo de evidencia es de finales del siglo XIX y corresponde al del naturalista Alfredo Dugès quien describió impresiones atribuidas a un felido y aves del Cenozoico tardío de Jalisco (Dugès, 1894). El estudio intensivo de huellas fósiles comenzó en la segunda mitad del siglo XX, incluyendo varios hallazgos y reportes de afloramientos con impresiones producidas por dinosaurios (Ferrusquía-Villafranca *et al.*, 1995). En este siglo XXI se han descubierto nuevos yacimientos junto con el estudio y análisis de las huellas que preservan (*e.g.*, Rodríguez de la Rosa *et al.*, 2012; Jiménez-Hidalgo y Guerrero-Arenas, 2018), además, se han reevaluado algunos sitios previamente estudiados (*e.g.*, Meyer *et al.*, 2008; Cabral-Perdomo *et al.*, 2018).

En México, los métodos para documentar este tipo de evidencia han seguido las prácticas tradicionales utilizadas desde la segunda mitad del siglo XIX, las cuales incluyen la realización de dibujos y la captura de fotografías, tanto de huellas aisladas como de rastros (Falkingham *et al.*, 2017). Asimismo, la elaboración de duplicados de diferentes materiales, como yeso o resina es una técnica recurrente. En algunos casos, se ha utilizado una cubierta plástica transparente para registrar la distribución espacial y orientación de las huellas (*e.g.*, Ferrusquía-Villafranca *et al.*, 2007).

La calca del contorno de las huellas suele ser un método “impreciso” en el que se puede perder

información de los detalles morfológicos y posibles variaciones extramorfológicas, mientras que las fotografías proveen de un mayor detalle (Falkingham *et al.*, 2017). En muchos de los trabajos de huellas fósiles de México se presentan tanto los dibujos como las fotografías para complementar la información del registro y con ello obtener una mayor cantidad de datos (*e.g.*, Rodríguez de la Rosa y Guzmán-Gutiérrez, 2012).

La generación de modelos 3D de huellas fósiles es una estrategia que actualmente se utiliza para documentar el registro. Estos modelos muestran un alto grado de precisión de la morfología de las huellas y pueden replicarse con el mismo detalle. Las técnicas que se usan incluyen la fotogrametría y escáneres láser (Falkingham *et al.*, 2017). En México, estos métodos han sido poco explorados y, por lo tanto, representa un área de oportunidad para futuros estudios icnológicos y conservación del registro en bases de datos. Actualmente, la fotogrametría digital se ha aplicado en el registro de huellas de dinosaurio de diversas localidades del Cretácico tardío de Coahuila (Gaudiño-Maussán *et al.*, 2018).

2.1.2. Coprolitos

Los coprolitos son heces fecales fosilizadas que proveen de información paleobiológica y arqueológica relevante (Yang *et al.*, 2022; Blong *et al.*, 2023). Para la colecta de este tipo de icnofósiles se puede implementar alguna de las técnicas convencionales en paleontología de vertebrados (Montero y Diéguez, 2001; Melendi *et al.*, 2009). Sin embargo, es recomendable evitar la aplicación de adhesivos y consolidantes, dado que su composición química podría alterar el análisis mineralógico y/o bioquímico de los ejemplares.

Algunos análisis para el estudio de los coprolitos son destructivos, incluyendo el contenido mineralógico, así como la extracción de microfósiles (*e.g.*, polen, parásitos), macrofósiles (*e.g.*, huesos, plantas) y biomoléculas (*e.g.*, ácidos nucleicos, lípidos) (Shillito *et al.*, 2020). Previo a la realización de este tipo de análisis, es importante que se lleve a cabo la captura fotográfica de los ejemplares, documentar su color, morfología, dimensiones, peso y estado de preservación (Jouy-Avantín *et al.*, 2003), así como es deseable la elaboración de duplicados. Por su parte, la microtomografía computarizada (μ TC) mediante rayos X es una estrategia que permite caracterizar el contenido de los coprolitos sin dañar los ejemplares (Blong *et al.*, 2023) y, por lo tanto, preservar el registro.

En México, se conocen coprolitos de vertebrados del Cretácico Tardío de Coahuila, los cuales fueron analizados por detección de energía dispersiva con un microscopio electrónico de barrido y seccionados para conocer su contenido (Rodríguez de la Rosa *et al.*, 1998). También se cuenta con evidencia de coprolitos producidos por un cánido del Pleistoceno Tardío de

Hidalgo, cuyo estudio incluyó la caracterización mineralógica por difracción de rayos X, así como el análisis de su contenido por microtomografía computarizada (Bravo-Cuevas *et al.*, 2017).

2.1.3. Madrigueras

Las madrigueras fosilizadas producidas por vertebrados son relativamente comunes (Cardonatto y Melchor, 2018), aunque en México los icnofósiles de este tipo son poco conocidos. Guerrero-Arenas *et al.* (2020) describieron un sistema de madrigueras producido por geómidos del Oligoceno de Oaxaca (Figura 1). Con base en la naturaleza de este tipo de evidencia y dada la extensión que llegan a ocupar, es que su protección y mantenimiento debe realizarse *in situ* y, por lo tanto, alguna de las estrategias de conservación implementadas en yacimientos con huellas fosilizadas podría aplicarse de manera potencial en sitios con madrigueras fósiles. La extracción parcial o total de la superficie que aloja este tipo de evidencia resultaría costosa, y podría correrse el riesgo de que el registro se dañe si no se cuenta con la logística, equipo, maquinaria y recursos humanos idóneos para tal efecto.



Figura 1. Yacimiento fosilífero con abundantes sistemas producidos por geómidos. El icnotaxón fue nombrado *Yavichnus iniyoensis* (Guerrero-Arenas *et al.*, 2020). La localidad se encuentra en la población de Santiago Yolomécatl, Oaxaca. Los afloramientos pertenecen a la Formación Chilapa.

2.2. Invertebrados continentales

Los organismos invertebrados productores de icnofósiles de ambientes terrestres y lacustres incluyen una miríada de artrópodos, anélidos, crustáceos y organismos vermiformes (Hasiotis, 2002; Genise, 2017).

En México, son pocos los hallazgos de icnofósiles continentales producidos por invertebrados. En yacimientos del Oligoceno de la Formación Chilapa, en la Mixteca Alta de Oaxaca, se han registrado diversos sistemas producidos por abejas minadoras y coleópteros en paleosuelos (Jiménez-Hidalgo *et al.*, 2015; Guerrero-Arenas *et al.*, 2018). En la Formación Cerro del Pueblo (Cretácico Tardío) también se han documentado icnofósiles producidos por artrópodos en huesos de dinosaurios (Serrano-Brañas *et al.*, 2019; Venegas Gómez *et al.*, 2023). En ambos trabajos, las técnicas de estudio consistieron básicamente en la limpieza de los ejemplares y la toma de sus características merísticas usando vernieres.

En el caso de los icnofósiles en paleosuelos, generalmente suelen destacar las estructuras que se erosionan por el viento y el agua. En muchos casos, las cámaras son más visibles, ya que tienen mayor potencial de preservación que los túneles, por lo que tienden a conservarse mejor. Por ello, al ubicar una estructura en el sustrato, no debe de extraerse, ya que puede separarse del resto de un sistema. Se aconseja observar si hay celdas en solitario o agrupadas (aun cuando aparentemente no tengan ninguna conexión por túneles) y, una vez que se ubiquen, tratar de separar la laja con ellos. Si es posible, es mejor llevar los bloques al laboratorio e ir descubriendo los sistemas del resto del paleosuelo. En algunos casos, los sistemas se consolidan y pueden montarse con ayuda de monturas *ad hoc*. Sin embargo, si no es posible montarlas, es mejor mantenerlas sin separar el bloque de sedimento que las contiene, especialmente aquellos sistemas con túneles delgados y largos o estructuras que puedan romperse. También se aconseja no sacar del sedimento a aquellas celdillas que estén agrupadas, ya que se perdería la configuración y arreglo tridimensional del sistema (Figura 2). En algunos casos, con el fin de reinterpretar correctamente la posición de los sistemas, es mejor mantener los sistemas en el bloque de sedimento para tener una idea más aproximada de la posición original de los icnofósiles.

En el caso de las estructuras en hueso, debe removerse de ellas cualquier resto del sedimento circundante. Se debe tener especial cuidado al usar instrumentos afilados o punzocortantes para sacar el sedimento de las perforaciones, ya que la forma de éstas puede alterarse, lo que impacta la información potencial a partir de ésta.

3. Técnicas de rescate

Las técnicas de rescate refieren aquellas intervenciones que necesitan realizarse por emergencias y que



Figura 2. Las celdillas que se agrupan en clusters no deben separarse del sedimento, ya que se perdería el arreglo espacial del grupo. La escala es en milímetros. Ejemplares procedentes de la Formación Chilapa, en Santiago Yolomécatl, Oaxaca.

involucran la pérdida parcial o total del registro. En estos casos, puede existir la recuperación total o parcial de los icnofósiles, y en otros no, dependiendo de diversos factores. Entre éstos se considera el peso de la laja portadora, la posición de los estratos, la accesibilidad al sitio o la extensión del área icnofosilífera. Dependiendo de éstos y de los recursos disponibles, se seleccionará la técnica de rescate a ejecutar. En general, lo que debe asegurarse es la conservación de los ejemplares a largo plazo, tanto como sea posible en campo. De no ser posible, la información queda en registros digitales en repositorios académicos y colecciones.

Los rescates de material de icnofósiles de vertebrados son más frecuentes, debido a que varios de ellos son registros únicos. Hasta el momento, no se han ejecutado rescates de icnofósiles producidos por invertebrados continentales en territorio mexicano.

3.1. Digitalización

En la actualidad, la generación de modelos 3D es el protocolo utilizado para el registro y análisis de huellas y rastros. La digitalización mediante el escaneo láser y la fotogrametría se han convertido en las herramientas

fundamentales para tal efecto (Bates *et al.*, 2010; Falkingham *et al.*, 2017; Lallensack *et al.*, 2022).

El escaneo láser genera una nube de puntos que integra una réplica geométrica detallada de la superficie de un objeto. La combinación de imágenes fotográficas con la nube de puntos produce un modelo 3D fotorrealista (Bates *et al.*, 2010). Esta técnica crea modelos con una alta precisión; sin embargo, los escáneres digitales con cámara acoplada suelen ser costosos.

La fotogrametría es un método accesible que requiere de una cámara y una computadora (Falkingham *et al.*, 2017). En términos generales, consiste en la captura de una serie de imágenes fotográficas que se procesan en un software para generar un modelo 3D del objeto (Lallensack *et al.*, 2022). Cabe señalar que hay varias opciones de software de acceso libre que pueden utilizarse para un análisis fotogramétrico (*e.g.*, Meshroom, Polycam). Esta técnica puede complementarse con el uso de drones con cámara, lo cual permite cubrir un área mayor y obtener modelos digitales de un afloramiento, recuperando la orientación y distribución espacial del registro icnofosilífero (Cónsole-Gonella *et al.*, 2021).

El escaneo láser y la fotogrametría son técnicas no destructivas que proporcionan información icnotaxonómica importante. A partir de los modelos 3D que generan es posible realizar interpretaciones biomecánicas, tafonómicas y paleoambientales; asimismo, representan bases de datos de referencia y medios de preservación digital del registro icnofosilífero (Falkingham *et al.*, 2017; Mujal *et al.*, 2020). En México, la aplicación de estos métodos es aún incipiente y representa un área de oportunidad para futuros estudios sobre icnofósiles de vertebrados.

En relación con las técnicas empleadas en estudios de icnofósiles producidos por invertebrados en territorio mexicano, todavía no se han aplicado técnicas de rayos X, tomografía computarizada o escaneo láser.

3.2. Fotografías

Las fotografías son uno de los medios estándar para documentar icnofósiles, pues su uso también constituye un mecanismo de conservación a largo plazo (Lockley y Hunt, 1995). Debido a que los registros fotográficos se pueden conservar en archivos digitales o impresos en papel en las colecciones paleontológicas, estos archivos quedan al alcance de cualquier investigador que desee revisarlas.

Es recomendable guardar las fotografías digitales en formato TIFF y no JPG, ya que los archivos TIFF guardan una mayor cantidad de datos y no pierden definición cada vez que se abren, a diferencia de los archivos JPG, en los que hay pérdida de datos por el tipo de compresión que usan. Adicionalmente, en los archivos JPG pueden aparecer artefactos (la imagen se “píxelea”) con el tiempo (Adobe, 2023). Las fotografías también deben contar con una escala centimétrica o milimétrica, no objetos como un bolígrafo, por ejemplo. Si es necesario, se pueden realizar dos tomas, una con escala y otra sin escala.

3.3. Extracción

La extracción de un afloramiento icnofosilífero para su protección es un evento excepcional, ya que, de no realizarse correctamente, se corre el riesgo de perder el registro de los icnofósiles. Un caso exitoso es la localidad Paluxy River, Formación Glen Rose, del Cretácico Temprano de Texas, en Estados Unidos. Este es uno de los sitios más famosos con huellas de dinosaurios que aloja un importante número de impresiones producidas por saurópodos y terópodos. En 1970 fue considerado área natural protegida a la que se conoce como “*Dinosaur Valley State Park*” (Jasinski, 2009). Después de la Gran Depresión en los Estados Unidos, bloques de este afloramiento fueron extraídos y llevados al Museo Americano de Historia Natural en Nueva York y al *Texas Memorial Museum* en Austin, Texas, para su exhibición y resguardo (Farlow *et al.*, 2012).

En México no se ha documentado ningún caso en el que se extraigan las lajas de algún afloramiento, pero en casos excepcionales, podría considerarse siempre y cuando se cuenten con los recursos logísticos y humanos para asegurar la integridad de los ejemplares, así como su resguardo permanente en una colección científica.

4. Importancia de la colecta y rescate oportuno

Como mencionamos, los icnofósiles son una fuente de información valiosa (*e.g.*, taxonomía, biomecánica, ecología, tafonomía, paleoambiente). Asimismo, son parte del geopatrimonio de cualquier nación y, por lo tanto, tienen un valor científico, cultural, educativo y social. En consecuencia, es importante procurar el registro adecuado de este tipo de evidencias y promover su protección.

Previo al estudio y/o la intervención de una localidad con icnofósiles, es muy importante dar aviso y solicitar los permisos necesarios a las personas y autoridades competentes. Llevar a cabo y promover este tipo de prácticas entre los paleontólogos, autoridades y sociedad, conducirá a dar a conocer y sensibilizar a las personas del valor biogeocultural de los yacimientos icnofosilíferos. En el caso de los ejemplares que no pueden trasladarse a una colección, esta sensibilización debe realizarse, ya que las personas que viven cerca de los sitios fosilíferos son las que pueden garantizar, en buena medida, su conservación a largo plazo.

Realizar los procesos adecuados es importante, ya que garantiza que los icnofósiles no se alteren durante su estudio. El uso de diversas sustancias, como el yeso, pueden alterar o incluso destruir las huellas si no se emplea de manera correcta. Diversos afloramientos mexicanos accesibles al público, como Pie de Vaca, en Puebla, centro de México, han sido afectados por las malas prácticas de colecta (Aranguthy-García, 2023).

En otros casos, la ubicación de los afloramientos puede verse amenazada por la escorrentía, meteorización y la

erosión. Los yacimientos icnofosilíferos son bienes inmuebles que forman parte del patrimonio paleontológico, cuya protección y mantenimiento debe procurarse *in situ*. Para tal efecto, se ha implementado la construcción de muros de contención, cercas y/o el techado de la superficie del terreno en la que está preservado el registro. Esto con la finalidad de minimizar los efectos de la meteorización y erosión por escorrentía, así como la alteración antrópica accidental y/o intencional. Si se cuenta con suficientes recursos, en algunos casos es recomendable construir una edificación que cubra todo el afloramiento (Sheldon, 1994; Pérez-Lorente, 2015). La comunicación y trabajo conjunto entre los habitantes de la región, las autoridades y los paleontólogos son necesarios para establecer las estrategias adecuadas de protección y su mantenimiento posterior. Algunos de estos procedimientos de conservación se han implementado en la localidad de Esqueda que forma parte del Grupo Cabullona, Cretácico Tardío de Sonora y en la que están preservados rastros producidos por hadrosaurios y terópodos (González-León et al., 2022).

5. Protección a los registros icnológicos

La “Ley Federal Sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas” (1972, reformada en 2018) es el instrumento legal que resguarda la protección y conservación de los fósiles y sitios paleontológicos mexicanos. En ella, existe un equiparamiento de los restos fosilizados corporales y de los icnofósiles, ya que ambos tipos de evidencia son parte del patrimonio paleontológico. De igual manera, en los “Lineamientos para la investigación de vestigios o restos fósiles de interés paleontológico en México” (INAH, 2020), los restos fosilizados corporales e icnofósiles se equiparan y quedan sujetos a las mismas condiciones.

En el caso de localidades con registros paleoicnológicos, existen varios ejemplos de sitios que gozan de protección debido a su importancia. A continuación, mencionamos algunos de los casos más emblemáticos.

5.1. Ejemplo de casos en territorio mexicano

A lo largo del territorio nacional se conocen numerosos sitios icnofosilíferos cuyo estudio ha proporcionado información geobiológica importante. Algunos de estos han sido considerados patrimonio cultural debido al significativo acervo paleontológico que albergan, tal es el caso de Las Águilas y Pie de Vaca en las regiones norte y centro de México respectivamente.

En el 2011, la localidad Las Águilas en el Municipio de General Cepeda al sureste del estado de Coahuila, fue inscrita en el Registro Público de Zonas y Monumentos Arqueológicos Inmuebles del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), formando parte del patrimonio paleontológico mexicano que amerita ser protegido y conservado (Aguilar-Arellano, 2012). El yacimiento

icnofosilífero es parte de la Formación Cerro del Pueblo del Cretácico Tardío (Campaniano), con una extensión de aproximadamente 5,000 m² y en el que están preservadas unas 200 huellas. Este registro representa la asociación más grande de huellas de dinosaurios en México, con una diversidad icnológica que se asocia a hadrosaurios (grupo más abundante), así como ornitómidos, dromeosáuridos y tiranosáuridos (Rodríguez de la Rosa et al., 2003; Meyer et al., 2008; Rivera-Sylva et al., 2017).

La localidad Pie de Vaca se ubica en la región centro-meridional de Puebla, forma parte de la formación homónima y consiste en un afloramiento de unos 200 m² en el que están preservados numerosos rastros que se asocian a más de 200 huellas producidas por camélidos, félidos y pecaríes (Cabral-Perdomo et al., 2018; Bravo-Cuevas et al., 2019) (Figura 3). El yacimiento concentra, hasta ahora, la mayor diversidad y número de huellas de mamíferos del Cenozoico tardío de México. En 1998, Pie de Vaca, junto con la Cantera Tlayúa y el ahora Museo Regional Mixteco Tlayúa en el Municipio de Tepexi de Rodríguez, fueron declarados Patrimonio Cultural del Estado de Puebla (González-Rodríguez et al., 2023).

Con relación a la protección de localidades paleontológicas con icnofósiles de invertebrados continentales,



Figura 3. La localidad Pie de Vaca, en el estado de Puebla, se caracteriza por diversos rastros producidos por mamíferos, como camélidos félidos y tayasúidos. La edad de este afloramiento es de Plioceno-Pleistoceno.

un único caso ha sido registrado en Santiago Yolomécatl, al noroeste de Oaxaca. Esta localidad se inscribió en el Sistema Único de Registro Público de Monumentos y Zonas Arqueológicas e Históricas, y se caracteriza por una abundancia notable de sistemas producidos por abejas minadoras (*Celliformidae*) (Figuras 4a y 4b). Aunque la zona está dentro de la jurisdicción de la Universidad para el Bienestar Benito Juárez García de Santiago Yolomécatl, las autoridades de este recinto y la gente de la población permitieron su resguardo, lo cual garantiza en buena medida su conservación a mediano y largo plazo.

6. Conclusiones

Los icnofósiles son una fuente invaluable de información paleoambiental, etológica y evolutiva que debe ser conservada apropiadamente. Dependiendo del grupo icnotaxonómico, existen diversas técnicas para su estudio, como la recolecta, las fotografías, la calca del contorno de huellas en cubiertas plásticas o la fotogrametría.

Los yacimientos icnofosilíferos rara vez se pueden transportar a las colecciones paleontológicas, por lo que es necesario contar con estrategias adecuadas que permitan su conservación a largo plazo, como la edificación de muros, vallas o techos que disminuyan la erosión y meteorización de los sitios.

La “Ley Federal Sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas” (1972) es la encargada de brindar la protección y conservación de los fósiles directos y de las huellas de actividad de especies extintas, así como de las localidades fosilíferas mexicanas donde se hallan. Por ello, es necesario ceñirse a los Lineamientos para la investigación de vestigios o restos fósiles de interés paleontológico en México, y con ello cumplir con la normatividad actual.

Agradecimientos

Al Dr. Carlos Castañeda Posadas por su invitación a participar en el “Paleoworkshop: rescate del material paleontológico mexicano”. Dicha participación



Figura 4. a) Panorámica de la localidad paleontológica de Santiago Yolomécatl, en Oaxaca. El área se encuentra dentro del perímetro delineado por postes y alambre. b) El sello que el área tiene en una de sus esquinas y que señala que el área está registrada en el Sistema Único de Registro Público de Monumentos y Zonas Arqueológicas e Históricas. La localidad paleontológica se caracteriza por su abundancia de icnofósiles producidos por abejas minadoras y pertenece a la Formación Chilapa.

permitió la publicación de este escrito. Agradecemos las sugerencias y comentarios de dos revisores anónimos.

Referencias

- Adobe (2023). *JPG vs TIFF*. <https://www.adobe.com/mx/creativecloud/file-types/image/comparison/jpeg-vs-tiff.html>, consultado en Febrero 2024.
- Aguilar-Arellano, F. (2012). ¿Cómo proteger yacimientos paleontológicos?, la experiencia del INAH en Coahuila. *El Tlacuache, Suplemento Cultural, La Jornada Morelos*, 529, 1–2.
- Aranguthy-García, K. (2023). Problemas y desafíos en la conservación de Pie de Vaca, Plio-Pleistoceno de Tepexi de Rodríguez, Puebla, centro de México. *Memorias del V Simposio Latinoamericano de Icnología SLIC 2023. Universidad del Mar, Puerto Escondido, Oaxaca, México*, 14.
- Bates, K. T., Falkingham, P. L., Rarity, F., Hodgetts, D., Purslow, A., & Manning, P. L. (2010). Application of high-resolution laser scanning and photogrammetric techniques to data acquisition, analysis and interpretation in palaeontology. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK*, 68–73.
- Bertling, M., Buatois, L. A., Knaust, D., Laing, B., Mángano, M. G., Meyer, N., Mikuláš, R., Minter, N. J., Neumann, C., Rindsberg, A. K., Uchman, A., & Wisshak, M. (2022). Names for trace fossils 2.0: theory and practice in ichnotaxonomy. *Lethaia*, 55(3), 1–19. <https://doi.org/10.18261/let.55.3.3>
- Blong, J. C., Whelton, H. L., van Asperen, E. N., Bull, I. D., & Shillito, L. M. (2023). Sequential biomolecular, macrofossil, and microfossil extraction from coprolites for reconstructing past behavior and environments. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1131294. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1131294>
- Bravo-Cuevas, V. M., & Rodríguez de la Rosa, R. A. (2014). A summary of the Mesozoic vertebrate tracks of Mexico. In H. Rivera-Sylva, K. Carpenter, & E. Frey (Eds.), *Dinosaurs and other reptiles from the Mesozoic of Mexico* (pp. 181–192). Indiana University Press.
- Bravo-Cuevas, V. M., Morales-García, N. M., Barrón-Ortiz, C. R., Theodor, J. M., & Cabral-Perdomo, M. A. (2017). Canid coprolites from the Late Pleistocene of Hidalgo, Central Mexico: Importance for the Carnivore Record of North America. *Ichnos*, 24(4), 239–249. <https://doi.org/10.1080/10420940.2016.1270209>
- Bravo-Cuevas, V. M., Jiménez-Hidalgo, E., Cabral-Perdomo, M. A., & Contreras-López, M. (2019). The first Mexican record of peccary footprints (Artiodactyla, Tayassuidae) from the late Cenozoic of Puebla: ichnotaxonomy and palaeobiological considerations. *Historical Biology*, 31(9), 1135–1144. <https://doi.org/10.1080/08912963.2018.1424844>
- Cabral-Perdomo, M. A., Bravo-Cuevas, V. M., Pérez-Pérez, A., & García-Cabrera, N. (2018). Descripción de las huellas de camélidos y félidos de la localidad Pie de Vaca, Cenozoico Tardío de Puebla, centro de México y algunas consideraciones paleobiológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(2), 397–416. <https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n2a9>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1972). Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticas e históricos (DOF 16-02-2018). Diario Oficial de la Federación. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/131_160218.pdf
- Cardonatto, M. C., & Melchor, R. N. (2018). Large mammal burrows in late Miocene calcic paleosols from central Argentina: paleoenvironment, taphonomy and producers. *PeerJ*, 6, e4787. <https://doi.org/10.7717/peerj.4787>
- Cónsole-Gonella, C., Díaz-Martínez, I., Citton, P., & Valais, S. (2021). New record of Late Cretaceous vertebrate tracks from the Yacoraite Formation (Juella, Quebrada de Humahuaca, north-western Argentina): aerial drone survey, preservation and sedimentary context. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103116 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103116>
- Dugès, A. (1894). Felis fósil de San Juan de los Lagos. *La Naturaleza: periódico científico del Museo Nacional de Historia Natural y de la Sociedad Mexicana de Historia Natural, 2ª serie*, 2, 421–423.
- Falkingham, P. L., Bates, K. T., Avanzini, M., Bennett, M., Bordy, E. M., Breithaupt, B. H., Castanera D., Citton, P., Díaz-Martínez, I., Farlow, J. O., Fiorillo, A. R., Gatesy, S. M., Getty, P., Hatala, K. G., Hornung, J. J., Hyatt, J. A., Klein, H., Lallensack, J. N., Martin, A. J., Marty, D., Matthews, N. A., Meyer, C. A., Milán, J., Minter, N. J., Razzolini, N. L., Romilio A., Salisbury, S. W., Sciscio, L., Tanaka, I., Wiseman, A. L. A., Xing, L. D., & Belvedere, M. (2017). A standard protocol for documenting modern and fossil ichnological data. *Palaeontology*, 61(4), 469–480. <https://doi.org/10.1111/pala.12373>
- Farlow, J. O., O'Brien, M., Kuban, G. J., Dattilo, B. F., Bates, K. T., Falkingham, P. L., Pinuela, L., Rose, A., Freels, A., Kumagai, C., Libben, C., Smith, J., & Whitcraft, J. (2012). Dinosaur Tracksites of the Paluxy River Valley (Glen Rose Formation, Lower Cretaceous), Dinosaur Valley State Park, Somervell County, Texas. In *Actas de V Jornadas Internacionales sobre Paleontología de Dinosaurios y su Entorno, Salas de los Infantes, Burgos*. 41–69.
- Ferrusquía-Villafranca, I., Jiménez-Hidalgo, E., & Bravo-Cuevas, V. M. (1995). Jurassic and Cretaceous dinosaur footprints from Mexico: Additions and Revision. *Journal of Vertebrate Paleontology, Abstracts of papers*, 15(3), 28A.
- Ferrusquía-Villafranca, I., Bravo-Cuevas, V. M., & Jiménez-Hidalgo, E. (2007). The Xochitlapilco dinosaur ichnofauna, Middle Jurassic of Oaxaca, southeastern Mexico: Description and paleontologic significance. *Contributions in Science, Natural History Museum of Los Angeles County*, 515, 1–40.
- Gaudiño-Maussán, J. L., Aguilar, F. J., & Hernández-Rivera, R. (2018). Aplicación de fotogrametría digital para el registro de las huellas de dinosaurio de la Formación Cerro del Pueblo (Campaniano tardío), Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 7(2), 307–324. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2018v70n2a3>
- Genise, J. F. (2017). *Ichnoentomology. Insect Traces in Soils and Paleosols*. Elsevier.
- Goldring, R. (1999). *Field Palaeontology*. Taylor and Francis.
- González-León, C. M., Serrano-Brañas, C. I., Villanueva-Amadoz, U., Scott, R. W., & Duarte-Bigurra, R. (2022). Estratigrafía y paleontología del Grupo Cabullona (Campaniano-Maastrichtiano), noreste de Sonora. Síntesis para una excursión a la Cuenca Cabullona. *Paleontología Mexicana*, 11(2), 87–110.
- González-Rodríguez, K. A., Bravo-Cuevas, V. M., Cuevas-Cardona, C., Cabral-Perdomo, M. A., & Ortiz-Caballero, E. (2023). The Hidden Faces of Paleontology: Some Case Studies in Central Mexico. *Geoheritage*, 15, 134. <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00902-0>
- Guerrero-Arenas, R., Jiménez-Hidalgo, E., & Genise, J. F. (2018). The oldest beetle and bee ichnofossils from Mexico and their paleoenvironmental implications. *Ichnos*, 25(4), 269–273. <https://doi.org/10.1080/10420940.2017.1386184>
- Guerrero-Arenas, R., Jiménez-Hidalgo, E., & Genise, J. F. (2020). Burrow systems evince nonsolitary geomyid rodents from the Paleogene of southern Mexico. *PLoS ONE*, 15(3), e0230040. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230040>
- Hasiotis, S. T. (2002) Continental Trace Fossils. SEPM Short Course Notes, n. 51. 132 pp. *SEPM Society for Sedimentary Geology*. <https://doi.org/10.2110/scn.06.51>
- Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). (2020). *Lineamientos para la investigación de vestigios fósiles de interés paleontológico en México*. <https://www.normateca.inah.gob.mx/pdf/01612485398.PDF>, consultado en Febrero 2024.
- Jasinski, L. E. (2009). *Dinosaur Highway: A History of Dinosaur Valley State Park*. Texas Christian University Press.
- Jiménez-Hidalgo, E., Smith, K. T., Guerrero-Arenas, R., & Alvarado-Ortega, J. (2015). The first Late Eocene continental faunal assemblage from tropical North America. *Journal of South*

- American Earth Sciences*, 57, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.12.001>
- Jiménez-Hidalgo, E., & Guerrero-Arenas, R. (2018). The oldest camel footprints from Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(2), 351–359. <https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n2a5>
- Jouy-Avantin, F., Debenath, A., Moigne, A. M., & Mone, H. (2003). A Standardized Method for the Description and the Study of Coprolites. *Journal of Archaeological Science*, 30, 367–372. <https://doi.org/10.1006/jasc.2002.0848>
- Lallensack, J. N., Buchwitz, N., & Romillo, A. (2022). Photogrammetry in Ichnology: 3D model generation, visualisation, and data extraction. *Journal of Paleontological Techniques*, 22, 1–18. <https://doi.org/10.31223/X5J30D>
- Lockley, M., & Hunt, A. P. (1995). *Dinosaur tracks and other fossil footprints of the western United States*. Columbia University Press.
- Melendí, D. L., Scafati, L., Volkheimer, W., & Chávez, R. F. (2009). Técnicas extractivas y preparativas en Paleontología. Aspectos ambientales y de seguridad laboral. *Revista Museo Argentino de Ciencias Naturales, nueva serie*, 11(1), 107–129.
- Meyer, C. A., Frey, E., & Thüring, B. (2008). The pitfalls of interpreting incomplete dinosaur trackways – an example of a dromeosaurid trackway from the Late Cretaceous of the Sierra Madre Oriental (Cerro del Pueblo Formation, Late Campanian; Parras Basin, Coahuila, NE Mexico). In Z. Krempaská (Ed.), *6th Meeting of the European Association of Vertebrate Paleontologists, Spišská Nová Ves, Slovak Republic* (Volume of Abstracts, pp. 69–73). Museum of Spiš, Spišská Nová Ves, Slovak Republic.
- Montero, A., & Diéguez, C. (2001). Colecta y conservación de fósiles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 9(2), 121–126.
- Mujal, E., Marchetti, L., Schoch, R. R., & Fortuny, J. (2020). Upper Paleozoic to Lower Mesozoic Tetrapod Ichnology Revisited: Photogrammetry and Relative Depth Pattern Inferences on Functional Prevalence of Autopodia. *Frontiers in Earth Science*, 8, 248. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00248>
- Pérez-Lorente, F. (2015). *Dinosaur footprints & trackways of La Rioja*. Indiana University Press.
- Rivera-Sylva, H. E., Frey, E., Schulp, A. S., Meyer, C., Thuring, B., Stinnesbeck, W., & Vanhecke, V. A. A. (2017). Late Campanian theropod trackways from Porvenir de Jalpa, Coahuila, Mexico. *Palaeovertebrata*, 41(2), e1. <https://doi.org/10.18563/pv.41.2.e1>
- Rodríguez-de la Rosa, R. A., & Guzmán-Gutiérrez, J. R. (2012). Huellas de aves y mamíferos del Neógeno de Jalisco, México. *Paleontología Mexicana*, 62, 147–158.
- Rodríguez de la Rosa, R. A., Cevallos-Ferriz, S. R. S., & Silva-Pineda, A. (1998). Paleobiological implications of Campanian coprolites. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 142(3–4), 231–254. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00052-2)
- Rodríguez de La Rosa, R. A., Eberth, D. A., Brinkman, D. B., Sampson, S. D., & López Espinoza, J. (2003). Dinosaur tracks from the late Campanian Las Aguilas locality, southeastern Coahuila, Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology, Abstracts of papers*, 23, 90A.
- Rodríguez-de la Rosa, R. A., Aguillón-Martínez, M. C., López-Espinosa, J., & Eberth, D. A. (2004). The fossil record of vertebrate tracks in Mexico. *Ichnos*, 11, 27–34. <https://doi.org/10.1080/10420940490428841>
- Rodríguez-de la Rosa, R. A., Bravo-Cuevas, V. M., Carrillo-Montiel, E., & Ortiz-Ubilla, A. (2012). Lower Cretaceous Dinosaur Tracks from Puebla, Mexico. *Journal of Geological Research*, Article ID 808729, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2012/808729>
- Serrano-Brañas, C. E., Espinosa-Chávez, B., & Maccracken, S. A. (2019). Insect damage in dinosaur bones from the Cerro del Pueblo Formation (Late Cretaceous, Campanian), Coahuila, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 86, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.07.002>
- Sheldon, S. (1994). Conservation of vertebrate paleontology collections. In: P. Leiggi & P. May (Eds.), *Vertebrate paleontological techniques* (Volume 1, pp. 3–33). Cambridge University Press.
- Shillito, L. M., Blonga, J. C., Green, E. J., Eline, N., & van Asperena, E. N. (2020). The what, how and why of archaeological coprolite analysis. *Earth Science Reviews*, 207, 103196. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103196>
- Venegas-Gómez, C., Estrada-Ruiz, E., Aguilar-Arellano, F. J., & Pérez-Crespo, V. A. (2023). Registro icnológico de dermestidos en huesos de dinosaurio en *Lala's Place* (Maastrichtiano), Ramos Arizpe, Coahuila, México y sus implicaciones tafonómicas. *Memorias del V Simposio Latinoamericano de Icnología SLIC 2023. Universidad del Mar, Puerto Escondido, Oaxaca, México*, 55.
- Yang, L., Zhang, X., Zhao, X., & Xiang, H. (2022). The Technological Advance and Application of Coprolite Analysis. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 797370. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.797370>