

## PROPUESTA DE MONITORIZACIÓN INSTRUMENTAL PARA LA GEOCONSERVACIÓN DEL LIG "ICNITAS DE REPTILES TRIÁSICOS" EN EL GEOPARQUE DE LA COMARCA DE MOLINA-ALTO TAJO (GUADALAJARA)

### **INSTRUMENTAL MONITORING PROPOSAL FOR THE GEOCONSERVATION OF THE GEOSITE "TRIASSIC REPTILE ICHNITES" AT THE MOLINA-ALTO TAJO GEOPARK (GUADALAJARA, CENTRAL SPAIN)**

A. Díez-Herrero<sup>1</sup>, J. Luengo<sup>1</sup>, J. Vegas<sup>1</sup>, M. Hernández<sup>1</sup>, L. Carcavilla<sup>1</sup>, A. Sopena<sup>2</sup>, Y. Sánchez-Moya<sup>2</sup>, J. Moratalla<sup>1</sup>, E. Baeza<sup>1</sup> y Á. García-Cortés<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. andres.diez@igme.es, j.luengo@igme.es, j.vegas@igme.es, m.hernandez@igme.es, l.carcavilla@igme.es, j.moratalla@igme.es, e.baeza@igme.es, garcia.cortes@igme.es

<sup>2</sup> Instituto de Geociencias (IGEO, CSIC) y Departamento de Estratigrafía (Facultad de Ciencias Geológicas, UCM), Avda. José Antonio Novais 12, 28040 Madrid. sopena@geo.ucm.es, yol@ucm.es

**Resumen:** Se presenta una propuesta de monitorización instrumental instalada en el LIG que forman los afloramientos de areniscas triásicas con icnitas de reptiles, situados en el Geoparque UNESCO de la Comarca de Molina-Alto Tajo (Señorío de Molina, Guadalajara). El sistema consta de: un pluviómetro de cazoletas basculantes con registro continuo en almacenador de datos digital; un termómetro con dos sensores (uno de temperatura del aire y otro de la temperatura de la superficie de la roca en diaclasa), que recogen datos con periodicidad quinceminutal; y un fisurómetro analógico de precisión con retícula milimetrada. La finalidad de este sistema y los datos que registra es aportar valores para la caracterización (frecuencia y magnitud) de los procesos activos que pueden degradar los valores patrimoniales del LIG; como la meteorización física-química de la roca soporte, por gelifracción o crioclastia efectiva; esto es, ciclos de hielo-deshielo que se producen cuando las diaclasas y poros de la roca se encuentran rellenos de agua, y que pueden agrandar las discontinuidades que limitan los bloques de las icnitas, produciendo su desprendimiento y rotura. Con ello se podrán establecer geoindicadores para el seguimiento del estado de conservación del LIG y su evolución temporal, que ayuden a la gestión por parte de las administraciones responsables.

**Palabras clave:** Geoconservación, geoindicador, Geoparque Molina-Alto Tajo, icnitas de reptiles, monitorización.

**Abstract:** A new instrumental monitoring proposal installed in the outcrops of Triassic sandstone with reptile ichnites geosite, located in the Molina- Alto Tajo UNESCO Geopark (Guadalajara, Central Spain), is presented. The system consists of: a continuous record tipping bucket rain gauge with digital datalogger; a dual sensor thermometer (to measure the air temperature and the temperature of the surface of the rock inside a rock-joint) that collect data every fifteen minutes; and a precision analogic jointmeter with millimeter dial. The purpose of this system and the data it registers, is to provide values for the characterization (frequency and magnitude) of the active processes that can degrade the heritage values of the geosite; such as the

*physic-chemical weathering of the rock holder by gelifraction; that is to say, freeze-thaw cycles occurring when the rock-joints and pores of the rock are filled with water what can enlarge the rock-joints that limit the blocks of the ichnites, producing their rockfall and rupture. This would allow to establish geoindicators to be used for monitoring the conservation status of the geosite and its temporal evolution, which will help the management by the competent administrations.*

**Key words:** Geoconservation, geoindicator, Molina-Alto Tajo Geopark, monitoring, reptile ichnites.

## INTRODUCCIÓN

En el complejo proceso de gestión del patrimonio geológico existen fases o elementos fundamentales: (1) el inventario y catalogación; (2) el uso público con fines científicos, didácticos, divulgativos y/o turísticos; (3) y la geoconservación, que garantiza la preservación del patrimonio y sus valores. Las acciones de geoconservación pueden ser tanto legislativas y jurídicas, como sistemas de protección física; pero todos ellos necesitan de geoindicadores que permitan tomar decisiones sobre las acciones a emprender y los elementos y zonas a priorizar (García-Cortés *et al.*, 2012). Para establecer geoindicadores resulta de enorme utilidad disponer de datos numéricos de variables que indiquen el estado y las alteraciones a las que está sometido el elemento patrimonial; y, para ello, los sistemas de monitorización instrumental se han demostrado muy eficaces (Díez-Herrero *et al.*, 2015).

Por todo ello, el objetivo de este estudio es mostrar una propuesta de diseño e instalación de un sistema de monitorización instrumental que permita obtener series temporales de datos sobre el estado y procesos a los que está sometido un lugar de interés geológico, que servirán para establecer geoindicadores que estimen su estado de conservación y contribuyan a su gestión.

## LUGAR DE INTERÉS GEOLÓGICO OBJETO DE ESTUDIO

El Geoparque UNESCO de la Comarca de Molina-Alto Tajo se encuentra ubicado en el sector centro-oriental de la Península Ibérica, dentro de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, abarcando parte del antiguo Señorío de Molina de Aragón y el Parque Natural del Alto Tajo (provincias de Guadalajara y Cuenca, Castilla-La Mancha) (Figura 1a). En el Geoparque se encuentran representadas rocas y estructuras del Paleozoico y de las Cuencas y Cordilleras Alpinas peninsulares; y más concretamente del llamado "Rift Mesozoico Ibérico". El comienzo de la secuencia sedimentaria mesozoica está constituida por materiales detríticos de origen continental, depositados en medios de abanicos aluviales y sistemas fluviales (Ramos, 1979; Muñoz *et al.*, 1992) (Figura 1b). En la sierra de Aragoncillo los sedimentos triásicos están constituidos por alternancias de conglomerados, areniscas y lutitas en cuerpos de dimensiones métricas, en las que se suceden facies canalizadas con depósitos de llanura de inundación (facies Buntsandstein; Figura 1c). Las icnitas fósiles de estas facies (*Chirotherium*, *Rhynchosauroides*, *Sinaptichnium*, etc.) protagonizaron el comienzo de la Paleocnología de vertebrados en España (Navás, 1906). Es muy frecuente la presencia de icnitas con hiporrelieve positivo en la base de algunos estratos de arenisca de las secuencias fluviales (Demathieu *et al.*, 1978; Figura 1d). Recientes revisiones (Díaz-Martínez *et al.*, 2015) así como nuevos hallazgos (Meléndez y Moratalla, 2014) sugieren una excepcional potencialidad de la región para futuros estudios. Este conjunto de improntas fósiles

constituye un testimonio clave para el conocimiento de las faunas continentales de Arcosauriformes y Arcosaurios durante las primeras etapas del Triásico. Así, la importancia histórica, paleontológica y patrimonial de este área es indudable y, por lo tanto, estos excepcionales yacimientos paleontológicos han sido catalogados como LIG por: el inventario del Parque Natural y del Geoparque; la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha; el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) para la Cordillera Ibérica; y forman parte de uno de los 149 *geosites* del Patrimonio Geológico español de relevancia mundial (García Cortés, 2008).

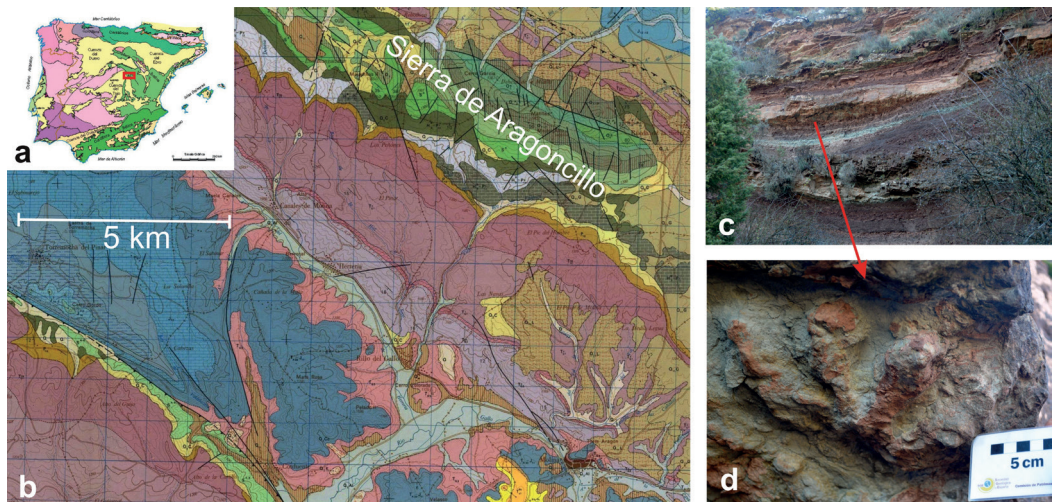


Figura 1. Situación geológica del lugar de interés geológico: a) Ubicación en la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica; b) Fragmento del mapa geológico 1:50.000 (MAGNA, IGME), con las formaciones triásicas en tonos rosados y magenta; c) Afloramiento de la alternancia de areniscas y lutitas; d) Icnita de reptil triásico en el muro de un estrato de areniscas.

En algunos de los afloramientos, la erosión diferencial de los estratos infrayacentes de lutitas, y los procesos de gravedad en las laderas, han ido dejando expuestas las icnitas en los muros de los estratos de areniscas más cementadas que resaltan en extraplomos y solapos; pero a la vez ha producido su pérdida o deterioro tanto por motivos naturales (desprendimiento y rotura de bloques, meteorización...), como antrópicos (expolio para coleccionismo o extracción para su exposición en museos). La situación actual es crítica, puesto que apenas se pueden localizar y reconocer media docena de icnitas *in situ*, lo que produjo la alarma de la comunidad científica y de los gestores del geoparque.

## PROPUESTA METODOLÓGICA DE MONITORIZACIÓN INSTRUMENTAL

El diseño del sistema instrumental (Figura 2a) parte del conocimiento de los afloramientos rocosos que forman el LIG y de la identificación de los procesos activos que potencialmente lo pueden estar degradando. Entre los diferentes procesos geomorfológicos activos, como la arroyada fluvial o la dinámica de laderas (desprendimientos, deslizamientos, reptación), parecen destacar las caídas de bloques ocasionadas por la meteorización física asociada a los ciclos hielo-deshielo, susceptibles de producir gelifracción o crioclastia

efectiva; esto es, congelación de agua disponible en poros y fisuras (diaclasas y superficies de estratificación o laminaciones; Figura 2a).

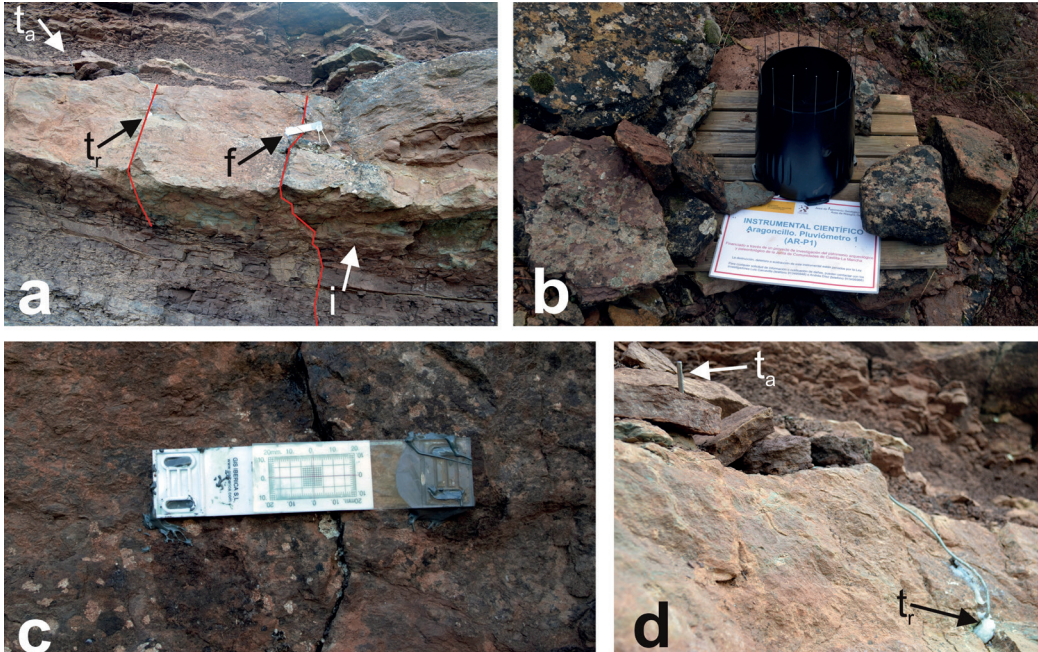


Figura 2. Sistema de monitorización instrumental instalado: a) afloramiento con icnita (i), donde se observan dos diaclasas (líneas rojas) en las que se ubican el fisurómetro (f) y el termómetro de medida en el interior de la roca ( $t_r$ ), ligeramente separados del termómetro ambiental ( $t_a$ ); b) pluviómetro sobre soporte; c) fisurómetro de precisión sobre la diaclasa; d) situación de los dos sensores del termómetro.

Por lo tanto, es fundamental conocer la disponibilidad de agua en el afloramiento, procedente de la precipitación (lluvia y nieve), para lo que se instaló: (1) un pluviómetro de registro continuo (pluviógrafo *Rain Collector* HOBO, de *Davis Instruments*) dotado de un sistema de cazoletas basculantes y con almacenador digital de datos ubicado a unos metros encima del estrato donde se encuentran las icnitas objeto del estudio (Figura 2b). No se colocó elevado como establecen los estándares de la Organización Meteorológica Mundial, porque en este estudio es necesario caracterizar la hidrología a nivel del suelo, con la permanencia de la cubierta nival y su fusión en superficie; (2) con el objetivo de disponer de medidas de la temperatura ambiental del aire y de la superficie de la roca se instaló un termómetro HOBO (*Davis Instruments*) con dos sensores: uno para medida de la temperatura ambiente, colocado a apenas 10 cm de la superficie de la roca, y otro insertado en una de las diaclasas semi-abiertas del banco de arenisca que contiene las icnitas (Figura 2d). Ambos sensores toman datos cada 15 minutos; (3) para caracterizar y medir los efectos de la potencial gelifracción efectiva sobre el estrato que contiene las icnitas, se instaló sobre una de las diaclasas que delimitan justo el bloque de roca dentro del estrato, un fisurómetro que mida los movimientos relativos a ambos lados de la diaclasa. Se trata de un fisurómetro recto analógico de precisión (modelo FI007 de G.I.S. Ibérica) (Figura

2c), que permite el control de desplazamientos horizontales y verticales, con retícula opaca y cruz filar transparente, con graduación mínima de 0,5 mm y rangos de medición de  $\pm 20$  mm en la horizontal y  $\pm 10$  mm en la vertical. El fisurómetro se montó mediante fijación de sus dos elementos usando un adhesivo epoxídico de curado rápido en frío (Nural 27, de Pattex), colocando la cruz filar sobre el punto (0,0) de la retícula; se hará el seguimiento de los posibles movimientos a través de macrofotografías ortogonales periódicas (cada 2 ó 3 meses). A todo ello se suma un registro de variaciones en el tiempo con fotografías seriadas, tanto del conjunto del afloramiento rocoso como de detalles del mismo (icnita, fisuras, huecos y cavidades, etc.), para detectar cualquier modificación, tanto natural como antrópica.

A partir de las series de datos de número de ciclos de gelificación efectiva que se registren anualmente, y de su comparación con el número en la serie meteorológica histórica de la estación de la AEMET en Molina de Aragón, se establecerá un geoindicador para estimar el estado de conservación. Si se detecta que la tendencia en el tiempo de este indicador es a aumentar el número de ciclos, y que además éstos tienen consecuencias en el LIG (observables con las medidas del fisurómetro), se propondrá a los gestores que adopten medidas de protección física de los afloramientos. Por ejemplo, ya que no se puede actuar sobre la temperatura ambiental, sí que se podría tratar de reducir la efectividad de los ciclos de hielo-deshielo, bien facilitando la insolación de la roca (p.e., eliminando vegetación que produzca sombras) para que aumente su temperatura e inercia térmica durante la noche; o bien creando cunetas de drenaje en cabecera y perimetrales para evitar que el agua de lluvia y arroyada superficial alcance el afloramiento con las icnitas.

## DISCUSIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

A modo de muestra del correcto funcionamiento de la propuesta metodológica, en el periodo de mes y medio monitorizado, ya se ha podido registrar las temperaturas y precipitación en el afloramiento de las icnitas (Figura 3). Los datos del fisurómetro no se muestran puesto que no se ha detectado movimiento alguno.

Como se observa en la Figura 3 se pueden detectar el número y duración de los ciclos de hielo-deshielo efectivos (con precipitación la víspera o el mismo día de helada en la roca), por lo que en el futuro se podrán hacer un seguimiento temporal de este geoindicador de interés en la geoconservación del LIG; cumpliéndose así el principal objetivo del sistema de monitorización.

Las únicas incertidumbres generadas son las propias de los errores inherentes al instrumental (según las características técnicas de los aparatos y sus rangos de medición, hasta el momento adecuados), las derivadas de la representatividad de los puntos de medición (todos ellos directamente sobre el elemento patrimonial), y de la manipulación de los datos por los técnicos (borrado involuntario de datos, tratamiento estadístico inadecuado, etc.).

Por ello, este sistema es perfectamente replicable para la monitorización de cualquier otro LIG de características similares (yacimientos de icnitas en clima continentalizado), con la precaución de diseñar y dimensionar la disposición y tipología del instrumental de manera acorde a la problemática de conservación (proceso activo que degrada el LIG) y la configuración del elemento patrimonial (posición topográfica, características petrológicas, disposición de las discontinuidades, etc.). Por ejemplo, la propuesta metodológica no es replicable tal cual, cuando el elemento está afectado por procesos litorales asociados a oleaje, o cuando las discontinuidades en las rocas son sistemas conjugados de diaclasas que requieren de análisis geomecánicos más complejos.

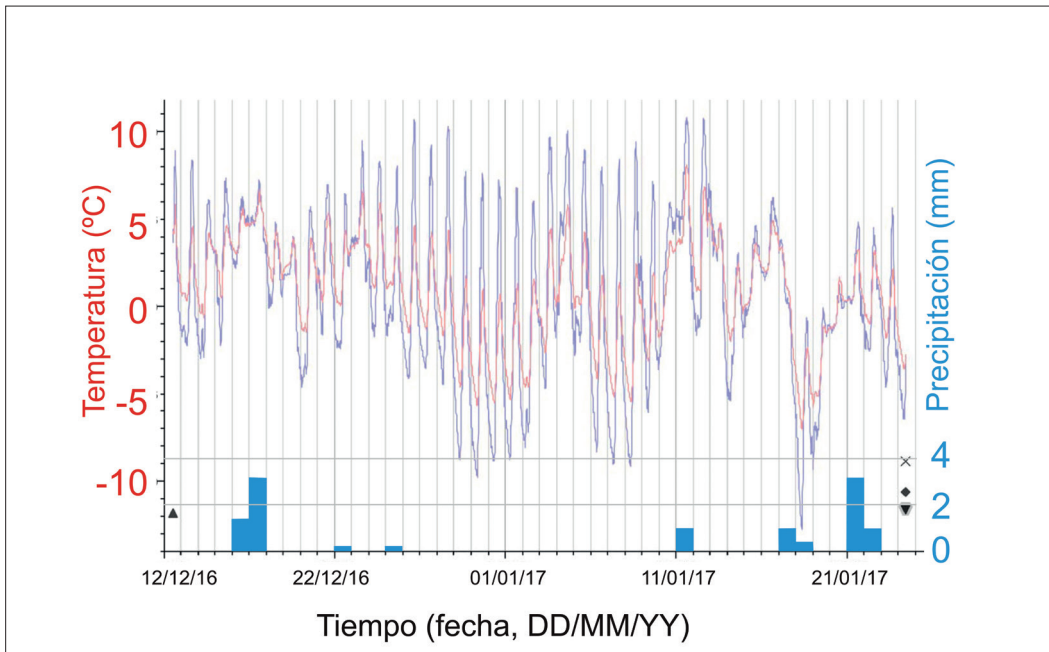


Figura 3. Datos de temperatura ambiente del aire (línea azul), temperatura de la roca (línea roja) y precipitación diaria (prismas azules) en el afloramiento monitorizado, donde se puede apreciar la amplitud de los ciclos diarios, algunos con fenómenos de hielo-deshielo efectivos, entre el 12-12-2016 y el 24-01-2017.

## AGRADECIMIENTOS

Proyecto de investigación "Cartografía digital y valoración de los yacimientos paleontológicos amenazados de la sierra de Aragoncillo" (SIFA), financiado en la convocatoria 2016 de proyectos de investigación del patrimonio arqueológico y paleontológico, de la Consejería de Educación, Cultura y Deportes, de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Agradecemos las facilidades dadas por el Geoparque de la Comarca de Molina-Alto Tajo, la guardería forestal y la colaboración en campo de Mar Génova y Jorge Gómez-Carrillo.

## REFERENCIAS

- Demathieu, G., Ramos, A. y Sopena, A. 1978. Fauna icnológica del Triásico del extremo noroccidental de la Cordillera Ibérica (Prov. de Guadalajara). *Estudios Geológicos*, 34, 175-186.
- Díaz-Martínez, I., Castanera, D., Gasca, J. M. y Canudo, J. I. 2015. A reappraisal of the Middle Triassic chirotheriid *Chirotherium ibericus* Navás, 1906 (Iberian Range NE Spain), with comments on the Triassic tetrapod track biochronology of the Iberian Peninsula. *PeerJ*, e1044.
- Díez-Herrero, A., Vegas, J., Carcavilla Urqui, L. García Cortés, A., Martín Serrano, A. Gutiérrez-Marco, J. C., Rábano, I., Baeza, E. y Gómez-Heras, M. 2015. Geoindicadores para la evaluación de los procesos geológicos que afectan al estado

- de conservación y uso público del patrimonio geológico. LIG Boquerón del Estena (P. N. de Cabañeros, Ciudad Real). En: Hilario, A., Mendia, M., Monge-Ganuzas, M., Fernández, E., Vegas, J. y Belmonte, A. (eds.), *Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos*. Cuadernos del Museo Geominero, 18, 227-232.
- García-Cortés, Á. (ed.). 2008. *Contextos geológicos españoles. Una aproximación al patrimonio geológico nacional de relevancia internacional*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 233 pp.
- García-Cortés, Á., Vegas, J., Carcavilla, L. y Díaz-Martínez, E. 2012. Un sistema de indicadores para la evaluación y seguimiento del estado de conservación del patrimonio geológico. *Geo-Temas*, 13, 1272-1275.
- Meléndez, N. y Moratalla, J. J. 2014. Los Arroturos: new reptile tracksite from the Muschelkalk (Middle Triassic) of Paredes de Sigüenza (Guadalajara province, Spain). En: *74<sup>th</sup> Annual Meeting of the Society of Vertebrate Paleontology*. Berlín (Germany), Abstracts book, 186.
- Muñoz, A., Ramos, A., Sánchez-Moya, Y. y Sopena, A. 1992. Envolving fluvial architecture during a marine transgression: Upper Buntsandstein, Triassic, central Spain. *Sedimentary Geology*, 75, 257-281.
- Navás, L. 1906. El *Chirosaurus ibericus* sp. nov. *Boletín de la Sociedad Aragonesa de Ciencias Naturales*, 3, 208-213.
- Ramos, A. 1979. Estratigrafía y Paleogeografía del Pérmico y Triásico al oeste de Molina de Aragón (prov. de Guadalajara). *Seminarios de Estratigrafía*, Serie Monografías, 6, 313 pp.