

Divulgando a lo grande fósiles diminutos: proyecto *foramsWORLD*

Big disclosure of tiny fossils: foramsWORLD project

IGNACIO FIERRO BANDERA¹, JESÚS M. SORIA MINGORANCE², AINARA ABERASTURI RODRÍGUEZ³, ALEJANDRO BADENES VITORIA¹ Y HUGO CORBÍ SEVILA²

¹ GeaLand Patrimonio S.L. C/Tibi, nº 3 3ª E1, 03010, Alicante. E-mail: fierro@gealandpatrimonio.com

² Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Apdo. Correos 99, San Vicente del Raspeig, 03080, Alicante. E-mails: jesus.soria@ua.es; hugo.corbi@ua.es

³ Museo Paleontológico de Elche, Plaza de San Juan s/n, 03203, Elche, Alicante. E-mail: ainara@cidarismpe.org

Resumen El grupo de los foraminíferos es uno de los más prolífico e interesante desde el punto de vista científico en las cuencas neógenas de la Cordillera Bética. En muchos casos representa uno de los escasos grupos fósiles presentes en las potentes unidades margosas y aporta una gran información paleoambiental. Además, es de sobra conocido el interés bioestratigráfico del grupo, permitiendo la datación precisa del sedimento. Cada vez disponemos de más recursos para la docencia y didáctica de las ciencias geológicas. En el caso de la paleontología (y de los bienes muebles) los fósiles originales siguen siendo elementos necesarios para la formación de nuestros estudiantes. Algunos grupos de reducido tamaño (microfósiles como polen, conodontos, foraminíferos, nanofósiles, etc.) siempre requerirán del uso de lupas y microscopios para su estudio y observación detallada. Sin embargo, las nuevas tecnologías están facilitando el acercamiento de estos fósiles a las recientes promociones de alumnos y alumnas, generando una nueva atracción sobre ellos. En este contexto surge el proyecto *foramsWORLD*, que prioriza el respeto sobre el patrimonio y su gestión con el uso docente de una colección de réplicas de foraminíferos que han sido modeladas artesanalmente. El proyecto se articula en base a la experiencia de la investigación desarrollada en la Universidad de Alicante, el compromiso con la divulgación del Museo Paleontológico de Elche y las estrategias en gestión patrimonial lideradas desde GeaLand Patrimonio.

Palabras clave: Docencia, foraminífero, Mioceno, réplica.

Abstract *The group of foraminifera is one of the most prolific and interesting from the scientific point of view in the Neogene basins of the Betic Cordillera. In many cases they represent one of the few fossil groups present in the powerful marly units and provide a great deal of paleoenvironmental information. In addition, the biostratigraphic interest of the group is well known, allowing precise dating of the sediment. At present, we have more and more resources for the teaching and didactics of geological sciences. In the case of paleontology (and movable heritage), the original fossils continue to be necessary elements for the training of our students. Some groups of reduced size (microfossils such as pollen, conodonts, foraminifera, nanofossils, etc.) will always require the use of magnifying glasses and microscopes for their study and detailed observation. However, new technologies are facilitating the approach of these fossils to the recent promotions of students, generating a new attraction for them. In this context, the *foramsWORLD* project arises, which prioritizes respect over heritage and its management with the educational use of a collection of replicas of foraminifera that have been modeled by hand. The project is based on the experience of the research carried out at the University of Alicante, the commitment to the dissemination of the Paleontological Museum of Elche and the heritage management strategies led by GeaLand Patrimonio.*

Keywords: *Teaching, foraminifera, Miocene, replica*

INTRODUCCIÓN

Los foraminíferos (del latín, “portadores de orificios”) son organismos acuáticos, protistas ameboides, que viven mayoritariamente en océanos y mares, y en mucha menor proporción en lagos y lagunas dentro de los continentes. Su estructura orgánica es muy simple, compuesta por un protoplasma y un esqueleto o concha mineralizada cuyo tamaño suele ser inferior a 1 milímetro. El ciclo de vida, incluyendo la reproducción, es muy corto (1 o 2 años), por lo que, tras su breve ciclo vital, continuamente se van depositando en el lecho del mar. Una vez acumulados, el protoplasma se descompone y solo queda preservada la concha como un microfósil dentro del sedimento marino. Desde el punto de vista del medio de vida, los foraminíferos actuales y fósiles se clasifican en dos grandes grupos: las especies planctónicas, que flotan en el seno de la columna de agua, principalmente cerca de la superficie, y las especies bentónicas, cuyo hábitat es el fondo del mar o el de otras cuencas, bien sobre el sedimento, bien en el interior del mismo.

Las características propias de este grupo de organismos hacen que actualmente su utilidad, desde el punto de vista paleoceanográfico, paleoclimatológico, paleoecológico, biocronológico, etc., sea ampliamente reconocida. Sin embargo, su pequeño tamaño hace que, tanto su uso docente, como divulgativo plantee la necesidad del desarrollo de estrategias que generen una primera atracción sobre el grupo.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer las principales herramientas y recursos del proyecto *foramsWORLD (FW)*, fundamentalmente destinado a la docencia y divulgación de los foraminíferos del Mioceno Superior y Plioceno a distintos niveles educativos. Al mismo tiempo, dicho proyecto tiene como objetivos:

- Acercar el mundo de la Paleontología a la sociedad, mediante un grupo de organismos que, aunque microscópicos, posee una gran relevancia en el campo de la investigación aplicada.
- Desarrollar materiales útiles para la docencia en diferentes niveles educativos, universidades, museos o empresas especializadas.
- Fomentar el interés por el patrimonio geológico y paleontológico, su conservación, su estudio y su rigurosa divulgación social.

DE LA INVESTIGACIÓN A LA DOCENCIA CON UN FÓSIL MICROSCÓPICO SINGULAR

Utilidad de los foraminíferos para la investigación

Tanto en la actualidad como en el pasado geológico los foraminíferos vivieron en todas las partes de los océanos; hay especies típicas de aguas frías en zonas polares, otras características de aguas templadas en latitudes medias y otras de aguas cálidas en zonas ecuatoriales. Así mismo también vivieron en un amplio rango de batimetrías, con especies adaptadas a aguas neríticas, batiales y aguas profundas (incluso abisales) y muy alejadas de los continentes. Ambos aspectos hacen que los foraminíferos fósiles sean extremadamente útiles en la

investigación paleoceanográfica, dado que permiten conocer la latitud y la profundidad de la cuenca marina donde se desarrollaron (p.ej. Gooday, 1994).

Otro aspecto también interesante es que estos organismos construyen su concha de carbonato cálcico incorporando los isótopos estables del oxígeno (O-16 y O-18) que hay en el mar, cuyos valores son altamente dependientes de la temperatura del agua. En momentos de enfriamiento global, como ocurre durante las glaciaciones, las aguas marinas y el carbonato de las conchas están enriquecidos en O-18. Al contrario, en periodos de calentamiento, el agua pasa a tener un mayor contenido en O-16. De ahí deriva el papel de los foraminíferos en el campo de la paleoclimatología, por su potencial para revelar los cambios climáticos que han acaecido en el planeta a escala de tiempo geológico (p.ej. Shackleton *et al.*, 1984).

Adicionalmente a lo expuesto, los foraminíferos que habitan el fondo del mar (los bentónicos) soportan en diferente grado el nivel de estrés ambiental causado por la escasez de oxígeno. En episodios de anoxia, cuando la estratificación de la columna de agua impide la difusión del oxígeno superficial hacia las partes profundas, el fondo está ocupado solamente por un limitado número de especies tolerantes al estrés. Al contrario, cuando hay circulación de agua superficial hacia el fondo, éste se oxigena y aumenta la diversidad de especies del ecosistema bentónico. Así pues, los cambios del estado de estratificación de la columna de agua marina determinan las condiciones ambientales del fondo y, en consecuencia, las comunidades bentónicas fósiles que allí vivieron. Esta línea de conocimiento forma una parte sustancial de los estudios dedicados a la paleoecología de los ambientes marinos (p.ej. Douglas, 1979).

Los foraminíferos fósiles son conocidos desde el Cámbrico Inferior (hace 600 millones de años; Ma), por lo que ofrecen una valiosa información acerca de la evolución de sus especies a lo largo de gran parte de la historia de la Tierra. El proceso evolutivo de los foraminíferos básicamente se caracteriza por eventos de aparición y desaparición de especies (cuyo estudio es objeto de la bioestratigrafía). Ambos sucesos definen su rango temporal de vida, que puede variar enormemente (desde más de 20 hasta 0,1 Ma) según se trate de una especie u otra. Estos eventos se pueden calibrar temporalmente (disciplina conocida como biocronología) mediante la combinación de procedimientos radiocronológicos (p.ej. dataciones absolutas basadas en isótopos radiactivos), magnetoestratigráficos (cambios de polaridad del campo magnético de la Tierra) y astrocronológicos (ciclicidad controlada por los diferentes movimientos orbitales del planeta, o ciclos de Milankovitch). Para los periodos Neógeno y Cuaternario, es decir, desde hace 23 Ma hasta la actualidad, la mayoría de las especies de foraminíferos planctónicos tienen su rango temporal calibrado con alta resolución, lo que ha permitido construir esquemas zonales ajustados a la moderna ATNTS2012 (*Astronomical Tuned Neogene Time Scale 2012*) (Lirer *et al.*, 2019). Así, los eventos de aparición y desaparición de algunas de estas especies han sido utilizados para proponer límites de pisos en la escala cronoestratigráfica global. Un límite de pisos oficial se define en una

única localidad de todo el planeta, donde su posición estratigráfica se ubica con muy alta precisión mediante un *Golden Spike*. Así, por ejemplo, ocurre con el límite Tortonense – Messiniense (Mioceno Superior), definido mediante foraminíferos planctónicos en la sección estratigráfica de Oued Akrech (Rabat, Marruecos). La edad de este *Golden Spike* se ha calculado astronómicamente en 7.246 Ma (Hilgen *et al.*, 2000).

Todas estas consideraciones, expuestas en los párrafos precedentes, son una pincelada de la utilidad de los foraminíferos fósiles en el conocimiento del mundo marino a lo largo de la historia de la Tierra. Pero hay que comenzar por el principio. La aplicación de los foraminíferos a cualquiera de las disciplinas antes comentadas (paleoceanografía, paleoclimatología, paleoecología, bioestratigrafía, biocronología y cronoestratigrafía) requiere necesariamente de una determinación taxonómica de los mismos. Para ello se atiende a sus rasgos morfológicos y se aplica el sistema de nomenclatura binomial de Linneo (género y especie). Los elementos morfológicos que definen un taxón de foraminíferos son muy variados y a veces difíciles de establecer de forma cuantitativa. Esta dificultad radica, entre otros factores, en la escala de observación, dado que son microfósiles cuyo tamaño habitual es del orden de 0.2 milímetros. A ello se unen dos factores adicionales, el estado de preservación del microfósil, que puede variar en función de los procesos tafonómicos que han intervenido desde su acumulación, y la variabilidad morfológica intraespecífica, que condiciona la determinación taxonómica a la comparación con lo que se conoce como forma central (o más representativa) de los ejemplares ilustrados para la definición del taxón.

Una larga historia de uso docente y divulgativo

Los foraminíferos combinan su utilidad en investigaciones geológicas aplicadas con una gran belleza estética cuando son observados bajo el microscopio. Esto ha fomentado que, en torno a este grupo, hayan surgido numerosos proyectos vinculados a su uso docente y divulgativo desde el siglo XIX. Algunos de ellos han presentado una clara vertiente empresarial o comercial.

Corbí (2019) enumera y sintetiza las tres razones por las que este grupo fósil es idóneo para fomentar el aprendizaje a través de talleres didácticos. Por un lado, los materiales de los que se pueden extraer los foraminíferos son un tipo de roca sedimentaria (marga) abundante en la superficie terrestre. Por otro lado, la extracción de los microfósiles se realiza con una técnica sencilla denominada “levigado”, de fácil ejecución en el laboratorio. Por último, el tamaño microscópico permite un trabajo con lupa binocular de carácter manipulativo y práctico.

Aunque el número de propuestas que desarrollan talleres o actividades didácticas con el grupo de los foraminíferos es muy amplia, de modo ilustrativo, queremos destacar cuatro, donde se tratan aspectos centrados en la reconstrucción de los ambientes del pasado. Arenillas *et al.* (2000), que proponen una actividad centrada en la distribución paleoceanográfica del tránsito Cretácico-Terciario. Hippensteel (2006), que expone el interés de los

foraminíferos para abordar la enseñanza de la interpretación paleoambiental en arqueología. Corbí *et al.* (2012), quienes emplean los microfósiles como recurso didáctico para divulgar la Crisis de Salinidad del Messiniense a través de un taller desarrollado en el laboratorio de ciencias en enseñanza secundaria. Y muy recientemente Giner-Baixauli *et al.* (2021), quienes presentan un taller de micropaleontología en bachillerato desarrollado íntegramente en un espacio al aire libre en el que además proponen también construir de forma artesanal portaobjetos para el almacenamiento de microfósiles (Phillips, 2011).

La historia del desarrollo de reproducciones a escala de foraminíferos elaboradas de forma artesanal comienza en el siglo XIX con diversas iniciativas desarrolladas principalmente a través de los Museos de Historia Natural británicos y estadounidenses. La mayor parte de estas maquetas fueron realizadas modelando escayola, pero también se han utilizado otros materiales como plástico, vidrio, cera, arena, granito, mármol, caliza y arenisca. Destacamos la colección de réplicas desarrollada de forma pionera por d’Orbigny en la década de 1820. Algunas maquetas a escala, utilizadas como herramientas didácticas, han sido distribuidas comercialmente y otros ejemplos son “piezas únicas”, expuestas en los Museos de Ciencias Naturales. Se recomienda la lectura de Miller (2013) para una exhaustiva revisión de las diversas iniciativas desarrolladas históricamente para la elaboración de modelos a escala de foraminíferos.

En la actualidad, las técnicas de modelado fotogramétrico e impresión 3D están abriendo un abanico de posibilidades muy amplio para divulgar, enseñar e investigar los foraminíferos. En el ámbito didáctico, la réplica inicial puede realizarse a través de técnicas de escultura tradicionales, modelando arcilla (Peco *et al.*, 2021), con foam, una espuma elaborada a base de polietileno (de Oliveira *et al.*, 2011), o bien obtenerse a través de microtomografía computerizada (Antonarakou *et al.*, 2019). Estos prototipos son posteriormente modelados fotogramétricamente para a continuación realizar impresiones 3D, que son utilizadas como recurso didáctico para la enseñanza o divulgación de este grupo de organismos. Mención especial requiere el micro-CT, un escáner de alta resolución que utiliza rayos X y que tiene multitud de aplicaciones en investigación geocientífica (p.ej. Cnudde *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2019). Esta novedosa metodología está permitiendo el avance del conocimiento en taxonomía de foraminíferos y en investigaciones de micropaleontología aplicada abriendo una nueva ventana al conocimiento científico a través de modelos 3D de alta resolución inalcanzables en el siglo pasado (p.ej. Shi *et al.*, 2019; Zarkogiannis *et al.*, 2020; Mouro *et al.*, 2021; Grădinaru *et al.*, 2022)

FORAMSWORLD: UN PROYECTO DESTINADO AL PROFESORADO

El proyecto *foramsWORLD* (*fw*) surge de la estrecha relación entre tres entidades muy diferentes: la universidad, el museo y la empresa privada. El área de Estratigrafía del Departamento de Ciencias



Fig. 1. Detalle del portaobjetos de foramsWORLD con los 10 ejemplares de foraminíferos fósiles. En la columna de la izquierda se encuentran los taxones planctónicos y en la derecha los bentónicos.

de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Alicante acumula una dilatada experiencia en el estudio de los fósiles de foraminíferos, especialmente vinculada a las cuencas neógenas béticas. El Museo Paleontológico de Elche (MUPE) desarrolla una labor didáctica con diferentes niveles educativos desde que abrió sus puertas en el año 2004. Por su parte, Gealand Patrimonio S.L. es una empresa especializada en la gestión del patrimonio geológico y paleontológico que desde el año 2012 desarrolla proyectos específicos de investigación, conservación y comunicación. Así, desde la triple visión de este grupo, nace el proyecto *fw* que tiene una tipología fundamentalmente didáctica y docente.

El nacimiento de un proyecto frecuentemente se relaciona con la existencia de un problema, siendo este el caso de *fw*. Los integrantes de nuestro equipo detectaron la dificultad que suponía el proceso docente y la divulgación de un grupo de fósiles que, por su pequeño tamaño, era muy difícil de manejar: los foraminíferos. La abundancia de este grupo en el registro fósil y su importancia científica requieren su presencia en los contenidos curriculares o, incluso, su uso divulgativo a nivel social. Sin embargo, su carácter microscópico, la dificultad de su manipulación y la abrumadora diversidad de especies existentes, junto a la dificultad de su determinación específica, eran elementos que tradicionalmente habían hecho prestar una menor atención al trabajo docente con este grupo respecto a otros, por ejemplo de macrofósiles. Es por ello que *fw*, como proyecto, también responde a una necesidad. Y, por último, también se trata de un proyecto de innovación docente que se basa en el uso de fósiles y en el desarrollo de réplicas, motivo por el que debe estudiarse adecuada-

Fig. 2. Vista general de las 10 réplicas de foraminíferos de foramsWORLD. En la fila superior las 5 especies planctónicas y en la fila inferior las 5 especies bentónicas.



mente su viabilidad legal y técnica, lo que responde, de alguna forma, a un reto y desafío.

Dado el interés científico y didáctico del proyecto *fw*, el público diana es bastante amplio (departamentos universitarios, centros de investigación, formación reglada, museos de ciencias, centros o aulas de interpretación), destacando su utilidad para los docentes.

El proyecto *foramsWORLD* se articula en base a cuatro herramientas cuyo uso docente y didáctico se complementan entre sí. Estas cuatro herramientas básicas sustentan el desarrollo de las actividades para el alumnado, siendo: una colección de ejemplares de foraminíferos fósiles originales, procedentes de diferentes cuencas de la Región de Murcia (A), una colección de réplicas en resina de los mismos fósiles a una escala aumentada (B), una guía didáctica con información de los ejemplares, fotos de los mismos y varias actividades (C) y, finalmente, un póster divulgativo del interés científico de los foraminíferos de la colección (D). Además, dentro del proyecto también se contempla una muestra de marga para poder realizar varios levigados y el residuo de la fracción 0.125 mm de un levigado para visualizar directamente bajo la lupa.

Respecto a la colección de ejemplares fósiles (A), se han seleccionado 10 taxones de foraminíferos diferentes, 5 de ellos planctónicos y otros 5 bentónicos, que se presentan montados en un portaobjetos con la identificación de cada ejemplar (Fig. 1). Las especies seleccionadas poseen un elevado interés bioestratigráfico y paleoambiental y es por ello que nos permiten su uso para la docencia y divulgación. Las 5 especies planctónicas, ordenadas según su edad de aparición en el registro son: *Neogloboquadrina acostaensis* BLOW, 1959; *Globigerinoides extremus* BOLL y BERMÚDEZ, 1965; *Globorotalia suterae* CATALANO y SPROVIERI, 1971; *Globorotalia mediterranea* CATALANO y SPROVIERI, 1969; y *Globorotalia margaritae* BOLL y BERMÚDEZ, 1965. Los 5 taxones bentónicos, ordenados de ambientes más profundos a otros más someros son: *Cibicides wuellerstorfi* SCHWAGER, 1866; *Uvigerina hispida* SCHWAGER, 1866; *Siphonina reticulata* CZJZEK, 1848; *Gyroïdina* sp. D'ORBIGNY, 1826; y *Ammonia* sp. LINNAEUS, 1758.

Otra de las herramientas esenciales del proyecto es la colección de réplicas de los fósiles a una escala aumentada (B). Esta propuesta pretende facilitar la identificación y el uso didáctico y docente de distintos taxones de foraminíferos mediante la reproducción de ejemplares de la forma central y sin modificación tafonómica a una escala 500x (Fig. 2). Ello significa que un microfósil de 0.2 mm se podrá observar *de visu* con un tamaño aproximado cercano a los 10 cm. Se trata de un conjunto de materiales de muy alta calidad y con una supervisión continua durante todo el proceso de su desarrollo que explicamos en el siguiente apartado.

Para el uso docente de las colecciones previamente indicadas, el proyecto cuenta con el diseño de distintas actividades que se presentan en forma de guía didáctica (C), un pequeño manual donde se exponen los rasgos fundamentales para la identificación de las distintas especies de foraminíferos de la colección (Fig. 3) y se acompañan de varios talleres o actividades que el profesorado puede desarro-

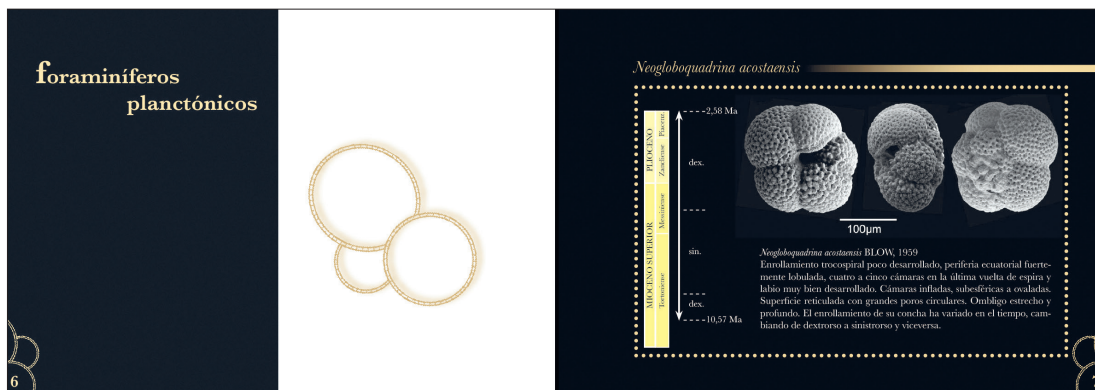


Fig. 3. Aspecto de una de las páginas del interior de la guía didáctica del proyecto foramsWORLD.

llar con el alumnado en el aula. Los títulos de algunas de estas actividades son: “¿cómo te enrollas?”, “¿eres profundo o superficial?” y “¿se ha colado alguien?”; y pretenden ahondar en el conocimiento de la determinación de los foraminíferos y su valor científico mediante la promoción del trabajo en grupo y la experimentación.

Por último, un póster divulgativo (D) presenta el interés científico de los foraminíferos de la colección. Su diseño aborda, desde un punto de vista muy visual, la divulgación del interés de los foraminíferos de la colección para la determinación de la edad y el ambiente sedimentario (condiciones batimétricas) de los sedimentos en los que aparecen estos organismos.

PASO A PASO, HACIENDO GRANDE LO DIMINUTO

El procedimiento para la obtención de estas herramientas didácticas y docentes que el proyecto *foramsWORLD* pone a disposición de los docentes tiene en cuenta un conjunto de actividades y tareas que requieren de la participación de distintos especialistas. Desde nuestro punto de vista, el proyecto ha contado con tres pasos fundamentales que nos han permitido “hacer grande lo diminuto”. El primero de ellos ha sido la participación de paleontólogos expertos en la materia. El segundo paso ha sido poder contar con profesionales vinculados al mundo de las bellas artes, para la talla en barro y la obtención de moldes y réplicas. El tercer paso, esencial, se relaciona con la viabilidad legal del proyecto, ya que se basa en el uso de restos fósiles, regulados por distintas normas.

El paso esencial: el conocimiento científico

Para la obtención de los ejemplares fósiles que forman parte de las colecciones se ha realizado un trabajo de campo con recogida de muestras, levigado de las mismas en laboratorio y selección de colecciones de ejemplares de interés bajo lupa binocular.

El trabajo de campo se ha realizado en diferentes cuencas sedimentarias de la Región de Murcia y ha contado con un permiso de prospección paleontológica. Respecto al tratamiento de las muestras recuperadas en campo, se ha procedido al levigado de las mismas para la separación de la fracción de 0.125 mm.

El levigado de los materiales recuperados en campo nos ha permitido contar con un residuo concentrado de distintos taxones de foraminíferos y otros microfósiles sobre el que hemos tenido que trabajar para la selección final de las especies que son de interés en el proyecto. La selección de las conchas de las distintas especies ha sido un trabajo meticuloso que tiene que realizarse manualmente, bajo la lupa, buscando y separando los ejemplares mejor conservados del conjunto (Fig. 4).

Con los distintos taxones fósiles separados hemos procedido al montaje de los mismos en platinas o portaobjetos específicamente seleccionados para el proyecto. Se han buscado entre distintas casas comerciales aquellos que estuvieran diseñados con 10 huecos para montar las 10 especies con las que cuenta el proyecto.

El conocimiento científico del grupo de foraminíferos seleccionado también nos ha permitido desarrollar unos contenidos didácticos que acompañan al resto de materiales. Estos contenidos se han desarrollado en colaboración con el equipo docente del Museo Paleontológico de Elche (MUPE) que, desde hace más de una década desarrolla distintas actividades y talleres para el profesorado de distintos niveles educativos.



Fig. 4. Proceso de selección y separación de los ejemplares de foraminíferos de los residuos levigados.



Fig. 5. Modelado de un ejemplar de *Globigerinoides* en barro. En segundo plano se observan las fotografías de microscopio electrónico de barrido como referencia durante el proceso. El asesoramiento científico fue continuo con el objetivo de conseguir la forma central de cada taxón.

Fig. 6. Detalle del encofrado para el vertido de silicona durante la aplicación de desmoldeante. El foraminífero a replicar es la pieza tallada en barro cocido.



El segundo paso: un producto artesano de gran calidad

Uno de los retos del proyecto *foramsWORLD* era generar reconstrucciones de foraminíferos, en tamaño muestra de mano, que pudieran reflejar fielmente todos los detalles de los microfósiles.

Actualmente, las nuevas tecnologías aplicadas al patrimonio paleontológico permiten obtener modelos tridimensionales fácilmente reproducibles en una impresora 3D a través de técnicas de fácil acceso, como es el caso de la fotogrametría (Mallison, 2014). En este proyecto se optó por emplear técnicas tradicionales de replicado.

El punto de partida fue la colección micropaleontológica con los 10 taxones seleccionados. De cada uno de los foraminíferos se realizaron fotografías con el microscopio electrónico de barrido (MEB). Este trabajo fue muy laborioso pues se tuvieron que fotografiar los mismos ejemplares en distintas posiciones o vistas.

En base a las fotografías realizadas y a la visualización repetida de cada uno de los ejemplares se realizó la reproducción o tallado manual, a escala

aumentada, de los mismos. Este trabajo se realizó en barro, de forma puramente artesanal, por un profesional en artes plásticas que se encontraba continuamente asesorado (Fig. 5). Estos modelos en barro fueron posteriormente cocidos en horno. El modelado de los ejemplares fue una de las fases más importantes del proyecto, ya que tenía que permitir obtener reproducciones muy fieles a los originales, donde una especie de sinergia entre la ciencia y el arte debían obrar un resultado a la altura del proyecto. Por ello, se realizaron correcciones en los modelos hasta obtener los finales, en los que era importante mantener la morfología y los detalles de las paredes de los microfósiles.

Sobre la base de estos modelos se procedió a la realización de moldes. Existen multitud de técnicas y productos para realizar réplicas (p.ej. Aberasturi y González, 2010) pero, en esta ocasión, se optó por realizar moldes bifaciales, consistentes en dos piezas, empleando silicona como producto de moldeo.

Cada uno de los modelos fue introducido en un lecho de plastilina, previa protección de los mismos con film transparente y teniendo clara las dos mitades por dónde se iba a realizar el molde. Sobre la base de plastilina se realizaron varias llaves (hendiduras) para encajar el otro molde, de igual manera se colocó un bebedero por donde verter posteriormente el material de replicado y un respiradero. Como segundo paso, se preparó un encofrado que sirviera de receptáculo para verter la silicona en su interior, previa aplicación de una capa de desmoldeante. Una vez catalizada la silicona, se elaboró un nuevo encofrado, esta vez sustituyendo el lecho de plastilina por la mitad del molde realizado (Fig. 6). Se vertió de nuevo silicona, previa aplicación de desmoldeante, y tras su vulcanizado se obtuvo el molde.

La réplica final se realizó mediante la técnica de reproducción por colada, en la que se vertió la resina en el interior del molde de silicona, aplicando, como paso previo, una capa de desmoldeante. Todo este trabajo permitió obtener una réplica maciza. Finalmente, las pequeñas rebabas o sobrantes de material catalizado se eliminaron manualmente mediante el uso de pequeñas limas, realizando una fina abrasión manual o mecánica.

Viabilidad legal del proyecto: un paso necesario

Una de las herramientas fundamentales para el trabajo con los alumnos que presenta el proyecto es una colección de ejemplares fósiles de foraminíferos. Fósiles y yacimientos paleontológicos se encuentran regulados legalmente desde hace muchos años en España. Aunque, no cabe duda que estos bienes (muebles e inmuebles) forman parte del patrimonio natural, la principal legislación implicada en su gestión los considera bienes culturales. Por otro lado, el marco normativo difiere entre distintas comunidades autónomas, lo que genera ciertas diferencias en la consideración de la importancia y, por lo tanto, en la regulación de estos bienes en distintos territorios.

Aunque parezca poco creíble, por la naturaleza microscópica y la abundancia de estos fósiles, los foraminíferos, el desarrollo de colecciones didácticas supone en la actualidad un desafío para la viabilidad del proyecto, ya que los fósiles son considera-

dos bienes de dominio público. En este sentido, es necesario entender que el uso docente y didáctico de los fósiles, en este caso microfósiles, forma parte de lo que se entendería como su “función pública”. De esta forma, como primer paso, con el objetivo de dar viabilidad legal a nuestras actividades dentro del proyecto planteamos la necesidad que todo el proceso, tanto la recogida de sedimento en la cuenca, como el procesamiento de la roca y la selección de los fósiles y, finalmente, el montaje de las colecciones, fuera avalada por la administración competente.

Las series geológicas sobre las que se ha trabajado pertenecen a las cuencas neógenas de Lorca, Fortuna, sector Sur del Bajo-Segura y Mula, todas ellas de la Región de Murcia. Para este trabajo se ha contado con un permiso de prospección paleontológica otorgado por el Servicio de Patrimonio Histórico de la Dirección General de Bienes Culturales de la Consejería de Educación, Cultura y Universidades de la Región de Murcia, con número de expediente EXC 22/2015, así como una ampliación del mismo concedido durante el año 2017.

EXPERIENCIAS DOCENTES Y DIVULGATIVAS: PUESTA A PRUEBA Y RESULTADOS

Hasta la fecha, el proyecto se ha puesto en marcha en diferentes ámbitos, en el que han participado públicos muy diversos, poniendo de manifiesto el carácter plural del mismo. En el marco de la enseñanza reglada la actividad ha sido desarrollada íntegramente en el aula, trabajando con alumnos y alumnas de educación secundaria de tres institutos, dos en Alicante y otro en Elche (Fig. 7). A nivel universitario, su uso docente ha sido aplicado en asignaturas como “Cartografía Geológica I”, dentro del Grado de Geología de la Universidad de Alicante, donde se han utilizado los diferentes materiales para exponer la utilidad de los foraminíferos en la datación de las unidades geológicas.

Fuera del contexto educativo se ha empleado para la divulgación de la Geología, dirigida, en esta ocasión, a un público general. Así, se han realizado talleres y/o actividades con las herramientas didácticas de *fW* en distintas ediciones del Geolodía (Alcoy 2015, Agost 2016 y Mazarrón 2016) o en itinerarios geológicos de formato similar como la actividad “GeoLorca: Geología en Familia”, desarrollada en la cuenca de Lorca en 2015 (Fig. 8). Para un público más específico se han realizado talleres en el II Campus Científico, organizado en Alicante en el 2017 por la ONCE (Aberasturi *et al.*, 2018).

En ambos casos, la metodología general seguida ha sido similar, diferenciando claramente una primera parte de la actividad más teórica y una segunda parte, más práctica y participativa. Con el objetivo de introducir a los participantes en el mundo de la micropaleontología se partieron de conceptos básicos de su utilidad, la importancia de distintas especies o la identificación de las mismas. Posteriormente, en una segunda parte, se comienza a mostrar el material y las herramientas que habitualmente se emplean en la investigación micropaleontológica. Si se dispone de tiempo y de medios, la realización



de un levigado siempre ha sido muy bien acogida por los grupos. Posteriormente puede realizarse la identificación de los fósiles bajo la lupa, momento en el que juega un papel relevante la presencia de las réplicas de las distintas especies en muestra de mano y la colección paleontológica real de los distintos taxones.

Las muestras de mano resultan un recurso extraordinario, ya que si se parte por ejemplo de manipular los ejemplares y posteriormente intentar identificarlos en una muestra real bajo la lupa es mucho más sencillo para el alumnado. Además, el proyecto se puede completar con una salida de campo para mostrar al alumnado los diferentes tipos de rocas y contextualizar las margas, que son las rocas a partir de las cuales se obtienen los foraminíferos mediante levigado.

La propuesta de actividades desarrollada para *foramsWORLD* se basa en la estrategia de gestión patrimonial del proyecto FOPALI (Sánchez-Ferris *et al.*, 2019), estando enfocada y trabajando específicamente aspectos de respeto hacia el medio ambiente y el patrimonio geológico, relacionando todo

Fig. 7. Desarrollo de talleres didácticos con alumnos de ESO. El docente hace uso de la réplica aumentada de un foraminífero para explicar su importancia científica en el estudio de las cuencas sedimentarias.

Fig. 8. Talleres didácticos con *foramsWORLD* abiertos a todo el público en “GeoLorca”. El taller se realiza sobre los afloramientos de las margas de la Formación Hondo, en la cuenca de Lorca, un enclave en el que divulgar los foraminíferos se convierte en necesario.



ello con la investigación y la utilidad de los foraminíferos en el conocimiento del clima y los ambientes del pasado.

PROPUESTA DIDÁCTICA

Tomando como punto de partida la experiencia obtenida tras el desarrollo del proyecto con distintos grupos, planteamos una propuesta didáctica para alumnos del primer ciclo de la ESO (Tabla I).

Desde el punto de vista de la micropaleontología, una de las actividades didácticas más interesantes que un profesor puede realizar en el aula se basa en el propio desarrollo del procedimiento de levigado como forma de estudio de las rocas sedimentarias disgregables. Esta puede ser unida, dentro de la unidad didáctica, al repaso teórico-práctico de los tipos de rocas sedimentarias. En nuestra propuesta, ambas actividades (actividad 1) las consideramos como previas o introductorias a la actividad propiamente dicha con foraminíferos. Sobre el desarrollo de la técnica de levigado con los alumnos y su uso docente existen numerosas publicaciones de ayuda para el profesorado, destacamos Caracuel *et al.* (2004) o Corbí (2019).

En *fW* se presenta una muestra de marga para realizar un levigado, así como el resultado de un levigado tras pasar por un tamiz de 0.125 mm. Con este último, el alumnado podrá acceder directamente a su estudio bajo la lupa, iniciando así la actividad 2. De forma autónoma, el profesor puede plantear la recogida de la marga en el campo y el desarrollo del levigado en el laboratorio, pero deberá considerar el marco normativo relacionado con la paleontología y el patrimonio existente en la Comunidad Autónoma en el que realice la actividad. Alternativamente puede disponer de fotografías de detalle, realizadas bajo la lupa, de distintos levigados que puedan ser obtenidas de páginas especializadas de internet o de publicaciones científicas. Estos recursos (artículos, libros, páginas web y vídeos) fueron objeto de recopilación en Corbí *et al.* (2012).

El elemento clave de nuestra propuesta didáctica es que el alumno trabaje directamente con la lupa binocular, familiarizándose con el tamaño microscópico de los foraminíferos. Para el trabajo con este

grupo de microfósiles será necesario el desarrollo de tareas a distintos niveles. Planteamos una primera descripción general de la muestra (color, tipos de granos, tipos de fósiles presentes, forma y alteración de los fósiles,...). Será necesario que practique la forma de trabajo bajo la lupa, seleccionando uno de los foraminíferos que encuentre, separándolo del resto y procediendo a realizar un continuo cambio de posición del ejemplar en la bandeja mediante el uso de un pincel fino, mientras procede continuamente el ajuste del enfoque. Solo de esta forma comenzará a visualizar el aspecto tridimensional del ejemplar seleccionado. Esta sería, por lo tanto, la actividad 2 dentro de la propuesta didáctica.

La actividad 3 se basa en el uso combinado de los foraminíferos, que el alumnado ha separado de la muestra levigada, y de los modelos tridimensionales a escala aumentada de diferentes ejemplares. Evidentemente lo ideal sería que la misma especie visualizada bajo la lupa fuera la que el alumno y alumna pudieran tener en muestra de mano. Esto permitiría, durante este momento del taller didáctico, dar el paso del uso de la lupa a la réplica aumentada a tamaño de mano y seguir trabajando con los foraminíferos en una nueva dimensión. Durante la actividad 3 el alumnado comparará ambos ejemplares, el fósil real bajo la lupa y la réplica aumentada del mismo en su propia mano. Girará y moverá uno y otro, verificando si se tratan de la misma especie. Con la ayuda del profesorado se determinarán los caracteres diagnósticos que intervienen en su clasificación. Para esta tarea proponemos el uso del artículo divulgativo de Corbí y Soria (2012) que analiza los rasgos diagnósticos para la determinación de foraminíferos del Mioceno Superior y Plioceno.

Por último, pasaríamos al desarrollo de la actividad 4, que hemos denominado “*¡Cómo te enrollas!*”. La concha de los foraminíferos puede estar formada por una sola cámara (unilocular) o por varias (plurilocular). Además, en base a la disposición de las cámaras se pueden distinguir distintas formas sin enrollamiento (uniseriadas, biseriadas y triseriadas) o con enrollamiento (planispirales y trocospirales). Para el desarrollo de esta actividad se contaría exclusivamente con las diferentes réplicas aumentadas de foraminíferos planctónicos y bentónicos, en muestra de mano. La actividad tiene como base

Tabla I. Propuesta didáctica para alumnos del primer ciclo de la ESO, basada en el proyecto *fW*, que incluye contenidos, desarrollo teórico y práctico, necesidades y alternativas.

ACTIVIDADES	CONTENIDOS / OBJETIVOS	DESARROLLO TEÓRICO	DESARROLLO PRÁCTICO	NECESIDADES	ALTERNATIVAS
1 Levigado de margas	Repaso tipos de rocas sedimentarias y procedimiento de levigado	Sí	Opcional, en función de la disponibilidad de materiales	Margas, tamices, estufa, vasos de precipitados, agua	Visualización de vídeos que expliquen el proceso
2 Estudio general del levigado	Descripción general muestra y trabajo manual de separación y visualización de ejemplares	Reducido a aspectos metodológicos	Sí	Levigado de 0.125 mm, pinces, bandejas de muestras, lupas binoculares	Uso de fotografías de levigados
3 Comparación de formas	Estudio a distintas escalas de los rasgos que determinan las distintas especies	Sí, rasgos morfológicos que intervienen en la taxonomía	Sí, trabajo con fósiles y réplicas	Microfósiles originales, réplicas a escala	Fotografías y modelos 3D digitales disponibles en la web
4 ¡Cómo te enrollas!	Estudio de la organización de las cámaras en los foraminíferos	Reducido al trabajo con claves dicotómicas	Sí	Réplicas a escala	Modelos 3D digitales disponibles en la web

determinar el tipo de disposición de las cámaras de un foraminífero. Esto puede ser acompañado de una descripción del tipo de textura de la pared, la forma general de la concha o del margen de misma, la disposición de la abertura o aberturas presentes y la forma de las suturas.

CONSIDERACIONES FINALES

Disponer de la reconstrucción de un foraminífero en muestra de mano facilita de forma inmediata la apreciación de su morfología tridimensional, siendo un complemento a la posibilidad de poder ver los ejemplares originales bajo la lupa.

Los modelos reconstruidos se presentan como un gran recurso didáctico al poder experimentar de una manera visual directa los ejemplares, además resultan muy útiles para trabajar mediante el tacto con personas con ceguera o restos de visión parcial.

Nuestra experiencia en el desarrollo de talleres con microforaminíferos es muy gratificante cuando se incorporan las réplicas a tamaño aumentado, lo que permite una mayor facilidad para posteriormente reconocer la especie entre el conjunto de granos de un levigado.

Como microfósiles, el uso de colecciones de foraminíferos desde el punto de vista docente y didáctico es de gran utilidad e importancia, así como su obtención de las rocas sedimentarias. Como paso previo, deben contemplarse los diferentes marcos legales existentes en las distintas comunidades autónomas.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido mejorado gracias a las aportaciones y comentarios de varios revisores como Juan Usera Mata y Alicia Giner Baixauli. Agradecemos también los comentarios críticos constructivos de Carlos Martínez Pérez, que nos han permitido afianzar el modelo de gestión patrimonial liderado por la Fundación Cidarís. Los apuntes de Gregorio Romero Sánchez nos han permitido reflexionar y mejorar el manuscrito respecto a las cuestiones legales asociadas al proyecto, aspecto que agradecemos sinceramente.

BIBLIOGRAFÍA

Aberasturi, A. y González, A. (2010). Taller de replicado paleontológico-falsificadores. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.2, 210-215.

Aberasturi, A., Alfaro, P., Andreu, J.M., Coma, R., Corbí, H., Cuevas, J., Díez-Canseco, D., Durán, M.V., Domènech, C., González, J., Jaúregui, P., Muñoz, J. y Villar, J.M. (2018). *Geología para todos: Campus de ciencias para alumnos con discapacidad visual*. En Duque-Macías, J. y Pascual Bernal, A.J. (eds.): Libro de actas del XX Simposio sobre Enseñanza de la Geología, Menorca, 135-146.

Antonarakou, A., Lyras, G., Smyrniou, Z., Besiou, E., Nikolopoulos, A., Zarkogiannis, S. y Gramba, A. (2019). Using 3D-printed models to improve pupil comprehension of fossil foraminifera. 15th International Congress of the

Geological Society of Greece Athens, Harokopio University of Athens, *Greece Bulletin of the Geological Society of Greece*, Sp. Pub. 7.

Arenillas, I., Alegret, L., Arz, J.A. y Molina, E. (2000). El uso didáctico de los foraminíferos en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra: Su distribución paleoceanográfica en el tránsito Cretácico/Terciario. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 8.2, 108-118.

Caracuel, J.E., Corbí, H., Pina, J.A. y Soria, J.M. (2004). Geología en la costa: técnicas de análisis de sedimentos e interpretación de ambientes sedimentarios. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12.1: 77-82 pp.

Cnudde, V., Masschaele, B., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Van Hoorebeke, L., y Jacobs, P. (2006). Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. *Applied Geochemistry*, 21(5), 826-832.

Corbí, H. (2019). Para ver el mundo en un grano de arena. Microfósiles bajo la lupa. *Alambique Didáctica de las Ciencias Experimentales*, nº 96, 24-32.

Corbí, H., Giannetti, A., Baeza-Carratalá, J.F. y Falces Delgado, S. (2012). Los microfósiles y la Crisis de Salinidad del Mediterráneo como recurso didáctico en Ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, núm. 20 (3), 249-261.

Corbí, H. y Soria, J.M. (2012). Guía ilustrada de los géneros de foraminíferos planctónicos del Mioceno Superior y Plioceno: ejemplos de la cuenca del Bajo Segura (sureste de España). *Cidarís*, 31: 31-38 pp.

Douglas, R.G. (1979). Benthic foraminiferal ecology and paleoecology: a review of concepts and methods. *Soc. Economic Paleontologist and Mineralogist (SEPM)*, Short Course, 6: 21-53.

Giner-Baixauli, A., Mayoral, O. y Corbí, H. (2021). Propuesta de taller de micropaleontología en Bachillerato: Una experiencia didáctica al aire libre. XXXVI Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología (Universidad de Zaragoza).

Gooday, A.J. (1994). The biology of deep-sea foraminifera: a review of some advances and their applications in paleoceanography. *Palaios*, 14-31.

Grădinaru, E., Marinšek, M., Korat, I. y Gale, L. (2022). Use of X-ray micro-computed tomography on selected upper Triassic (Rhaetian) foraminifera from the western black sea shelf, offshore Romania. *Italiana di Paleontologia e Stratigrafia (Research in Paleontology and Stratigraphy)*, vol. 128(1): 267-282.

Hilgen, F.J., Iaccarino, S., Krijgsman, W., Villa, G., Langereis, C.G. y Zachariasse, W.J., (2000). The Global boundary Stratotype and Point (GSSP) of the Messinian Stage (Uppermost Miocene). *Episodes*, 23, 1-6.

Hippensteel, S.C. (2006). Using Foraminifera to teach Paleoenvironmental interpretation and Geoarchaeology: A Case study from Folly Island, South Carolina. *Journal of Geoscience Education*, 54 (4), 526-553.

Lirer, F., Foresi, M., Iaccarino, S., Salvatorini, G., Turco, E., Cosentino, C., Sierro, F.J. y Caruso, A. (2019). Mediterranean Neogene planktonic foraminifer biozonation and biochronology. *Earth-Science Reviews*, 196: 102869.

Mallison, H., Wings, O. (2014). Photogrammetry in paleontology - A practical guide. *Journal of Paleontological Techniques*, 12 (12), 1-31.

Miller, C.G. (2013). A brief history of modeling Foraminifera: From d'Orbigny to Zheng Shouyi. *Landmarks in Foraminiferal Micropalaeontology: History and Development: The Micropalaeontological Society Special Publications, London, UK*, 337-49.

Mouro, L.D., Vieira, L.D., Moreira, A.C., Piovesan, E.K., Fernandes, C.P., Fauth, G., ... y da Silva, M. S. (2021). Tes-

ting the X-ray computed microtomography on microfossil identification: An example from Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103074.

Obrador, Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. y Fan, J.-X. (2013; updated). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36, 199-204. <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2022-02.pdf>

de Oliveira Machado Filho, H., Ferreira, A.C.M. y Soares, D.R. (2011). Replicação de fósseis de foraminifera utilizando reaproveitamento de "Isopor" com alunos do ifpb-cg. *Holos*, 4, 159-170.

Peco, V.G., Garzón-Arenas, N., Espinel, J. C. y Herrero, C. (2021). Sculpture and New Technologies in Scientific Educational Outreach: 3D Foraminiferal Models as a Referent of Ocean Acidification and Climate Change. *Artnodes*, (28).

Pillips, J. (2011). Make Your Own Micropaleontology Slides. *Micscape Magazine*. August, 1-7. Disponible en: <http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artaug11/Micro-paleo-Slides.pdf>.

Sánchez-Ferris, E.J., Fierro-Bandera, I., Aberasturi-Rodríguez, A., Navarro-Pedreño, J. y Montoya-Belló, P. (2019).

La valoración del patrimonio geológico y paleontológico como herramienta de gestión: el Modelo FOPALI. *Spanish Journal of Palaeontology*, 34 (1), 35-56.

Shackleton, N.J., Backman, J., Zimmerman, H., Kent, D.V., Hall, M.A., Robers, D.G., Schnitker, D. y Baldauf, J. (1984). Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature*, 307, 620-623.

Shi, Y. K., Huang, H. y Shen, Z. H. (2019). New insights for ancient foraminifera through 3D visuals of fusulinids. *Palaeoworld*, 28(4), 478-486.

Zarkogiannis, S. D., Fernandez, V., Greaves, M., Mortyn, P. G., Kontakiotis, G., y Antonarakou, A. (2020). X-ray tomographic data of planktonic foraminifera species *Globigerina bulloides* from the Eastern Tropical Atlantic across Termination II. *Gigabyte*, 2020, 1-10.

Zhang, P., Lee, Y. I. y Zhang, J. (2019). A review of high-resolution X-ray computed tomography applied to petroleum geology and a case study. *Micron*, 124, 102702. ■

Este artículo fue recibido el día 17 de enero de 2021 y aceptado definitivamente para su publicación el 15 de marzo de 2021.