

# FUNDAMENTAL



paleonturología

Reconstruyendo el esqueleto de un  
coral tabulado del Carbonífero

# **RECONSTRUYENDO EL ESQUELETO DE UN CORAL TABULADO DEL CARBONÍFERO**

---

**ISMAEL CORONADO, ALBERTO PÉREZ-HUERTA Y SERGIO RODRÍGUEZ**

**Coronado, I., Pérez-Huerta, A. y Rodríguez, S.** (2015). Reconstruyendo el esqueleto de un coral tabulado del Carbonífero. *¡Fundamental!* 28, 1–46.

Este número se ha editado en el marco del 12º Premio Internacional de Investigación en Paleontología **pALEONTUROLOGÍA 14**, convocado por la Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel–Dinópolis, la Fundación Teruel Siglo XXI y Dinópolis.

Esta publicación forma parte de los proyectos de investigación en Paleontología subvencionados por: Departamento de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de Aragón; Departamento de Innovación, Investigación y Universidad (Grupo de Investigación Consolidado E–62 FOCONTUR) del Gobierno de Aragón y Fondo Social Europeo; Instituto Aragonés de Fomento; Dinópolis.

**EDICIÓN:** © Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel – Dinópolis

**AUTORES:** Ismael Coronado, Alberto Pérez-Huerta y Sergio Rodríguez

**COORDINACIÓN:** Luis Alcalá

**DISEÑO Y MAQUETA:** © EKIX Soluciones Gráficas

**DEPÓSITO LEGAL:** TE–183–2015

**ISBN–13:** 978–84–944167–1–2

*Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización escrita de los autores y del editor, bajo las sanciones establecidas en la ley, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático. Todos los derechos reservados.*

# 12° PREMIO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN PALEONTOLOGÍA



paLeonturoLogía 14

En la ciudad de Teruel, siendo las 21:30 horas del día 11 de diciembre de 2014, se reúnen en calidad de miembros del jurado los doctores Jorge Civis Llovera (Catedrático de Paleontología de la Universidad de Salamanca y Director del Instituto Geológico y Minero de España), Francisco Javier Rodríguez Tovar (Catedrático de Paleontología y Director del Departamento de Estratigrafía y Paleontología de la Universidad de Granada) y José Ignacio Valenzuela Ríos (Profesor Titular de Paleontología de la Universidad de Valencia y Presidente del Comité Nacional Español de los Proyectos Internacionales de Ciencias Geológicas de la UNESCO) y, en calidad de secretario, el doctor Luis Alcalá (Director Gerente de la Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis).

Después de examinar los 23 artículos científicos participantes en la fase final del Duodécimo Premio Internacional de Investigación en Paleontología **paLeonturoLogía 14** (convocado por la Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis, la Fundación Teruel Siglo XXI y Dinópolis) y tras las oportunas deliberaciones,

acuerdan conceder el Premio **paLeonturoLogía 14**, dotado con 4.500 euros y una edición divulgativa del trabajo premiado, al artículo:

## **Primary biogenic skeletal structures in *Multithecopora* (Tabulata, Pennsylvanian)**

cuyos autores son

**Ismael Coronado, Alberto Pérez-Huerta y Sergio Rodríguez**

Universidad Complutense de Madrid, Instituto de Geociencias  
(IGEO, CSIC-UCM) y University of Alabama, Tuscaloosa

publicado en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386: 286-299. 2013.

El jurado ha valorado la integración de distintas técnicas paleontológicas para el estudio de unos fósiles especialmente difíciles de analizar, como son los corales tabulados de una antigüedad de unos 310 millones de años.

Cabe destacar el carácter innovador de este estudio en la identificación de estructuras biogénicas primarias de corales paleozoicos y la ampliación del potencial de este grupo para estudios geológicos, así como para proponer implicaciones paleoambientales y paleobiológicas. Posiblemente este trabajo, realizado con fósiles de la Cordillera Cantábrica, constituirá un referente para estudios posteriores acerca de estructuras biogénicas primarias.

De todo lo cual doy constancia a las 00:23 horas del día 12 de diciembre de 2014.

El Secretario  
Luis Alcalá



# Ismael Coronado Vila

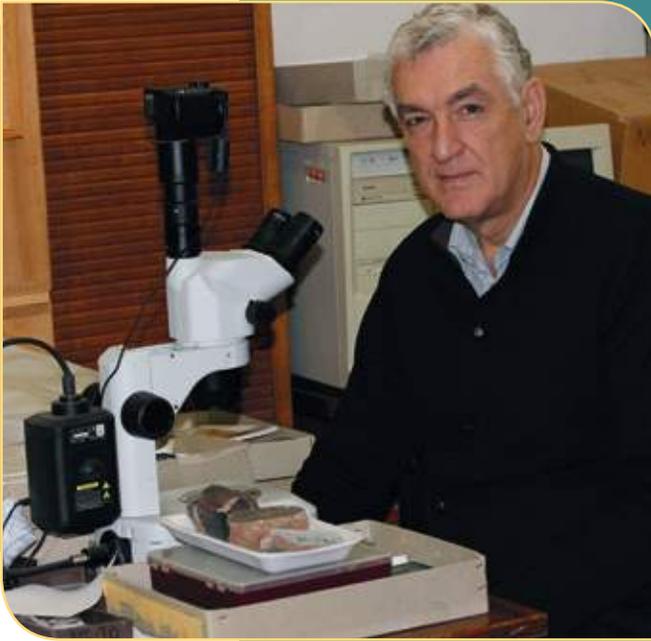


**Ismael Coronado Vila** es paleontólogo y colaborador honorífico de cátedra en la Universidad Complutense de Madrid (UCM). En 2008 se licenció con honores en Geología por la Universidad Complutense, en 2009 obtuvo un máster en Paleontología y en 2015 el doctorado en Geología e Ingeniería Geológica por la misma universidad. Es especialista en técnicas de microscopía y espectrometría empleadas en el estudio de biominerales actuales y fósiles y ha implementado técnicas de microscopía aplicadas al estudio de biominerales. Durante su investigación se ha especializado en biomineralización de cnidarios y organismos con esqueleto carbonático. Sus líneas de investigación actuales se centran en el estudio de la estructura, composición química y cristalografía de biominerales actuales y fósiles, comparando ambos sistemas con el fin resolver problemas actuales y establecer analogías con los del registro fósil. Actualmente colabora con diferentes grupos de investigación, nacionales e internacionales, en diferentes líneas de trabajo, desde el estudio de la evolución de la biomineralización en cnidarios hasta determinar cómo la acidificación de los océanos afecta a los organismos carbonáticos.

# Alberto Pérez-Huerta

**Alberto Pérez-Huerta** es Profesor Titular de paleontología y biomineralización en la Universidad de Alabama, EEUU. Comenzó su carrera estudiando Geología en la Universidad de Oviedo, donde se licenció en el año 2000, y continuó sus estudios en la Universidad de Oregón (EEUU), donde obtuvo un doctorado en Paleontología en el año 2004. Después de su paso por Tailandia, trabajó como investigador posdoctoral en la Universidad de Glasgow (Reino Unido) hasta su contratación en 2009 como docente e investigador en Alabama, en cuyo Museo de Historia Natural ejerce, además, como paleontólogo experto en invertebrados. Su experiencia investigadora se centra en el estudio de la biomineralización y biogeoquímica de invertebrados marinos actuales y fósiles, especialmente de braquiópodos y moluscos, y en aspectos de paleoecología. Financiado por la *National Science Foundation* (NSF), sus estudios más recientes se centran en análisis cristalográfico de biominerales en fósiles carbonatados, geoquímica de fósiles para estudios de paleoclimatología y desarrollo de técnicas de microscopía para el estudio de biominerales.





# Sergio Rodríguez García

**Sergio Rodríguez García** es Catedrático de Paleontología en la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Estudió Geología consiguiendo un premio extraordinario (1977) y defendió su Tesis Doctoral en la misma universidad (1982). Ha sido becario de la Fundación A.v. Humboldt en la Universidad de Tübingen durante los años 1984 y 1985, Profesor Titular desde 1986 y es Catedrático desde 2009. Ha impartido e imparte 15 asignaturas diferentes de temática geológica y paleontológica en las licenciaturas de Geología y Biología, en los grados de Geología, Ingeniería Geológica y Biología, y en el máster de Paleontología de la UCM. Está especializado en el estudio de los corales y en la sedimentología de los medios arrecifales paleozoicos. Ha dirigido 12 proyectos de investigación y participado en otros 12. Ha publicado 140 artículos en revistas científicas y 75 resúmenes de congresos, ha escrito 9 libros o capítulos de libros y ha sido editor de otros 3 libros y de la revista *Coloquios de Paleontología* entre 1986 y 1996. Ha sido Presidente de la *International Society for the study of Fossil Cnidaria and Porifera* (1995-1999), miembro de la Junta Directiva de la Sociedad Española de Paleontología (2002-2012) y Presidente de la misma entre 2009 y 2012. Actualmente es Vicepresidente de la Real Sociedad Española de Historia Natural.





## Reconstruyendo el esqueleto de un coral tabulado del Carbonífero

*Ismael Coronado, Alberto Pérez-Huerta y Sergio Rodríguez*

Eón	Era	Sistema	Serie	
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0,0117 Ma
			Pleistoceno	2,58 Ma
		Neógeno	Plioceno	5,33 Ma
			Mioceno	23,03 Ma
		Paleógeno	Oligoceno	33,9 Ma
			Eoceno	55,8 Ma
	Paleoceno		65,5 Ma	
	Mesozoico	Cretácico	145,5 Ma	
		Jurásico	199,6 Ma	
		Triásico	251 Ma	
		Pérmico	299 Ma	
	Paleozoico	Carbonífero	369,2 Ma	
		Devónico	416 Ma	
		Silúrico	443,7 Ma	
Ordovícico		488,3 Ma		
Cámbrico		542 Ma		
Proterozoico			2500 Ma	
Arcaico		4000 Ma		
Hádico		4600 Ma		

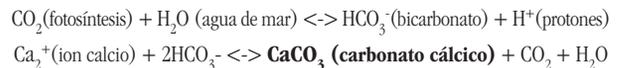
Serie	Piso	
Superior	Gzheliense	299 Ma
	Kasimoviense	303,7 Ma
	Moscoviense	307,2 Ma
	Bashkiriense	311,7 Ma
Inferior	Serpukhoviense	318,1 Ma
	Viseense	328,3 Ma
	Tournasiense	345,3 Ma
		359,2 Ma

## Introducción

El origen de la Tierra se establece hace 4.600 millones de años y la vida surgió en el mar hace aproximadamente 3.800 millones de años. Independientemente de su origen (ya que no hay un consenso claro entre la comunidad científica), la Tierra y la vida enlazan desde su comienzo los sistemas bióticos (vivos) y abióticos (inorgánicos) hasta niveles inesperados, formando complejos ciclos biogeoquímicos (Bashkin, 2002). Los ciclos biogeoquímicos (*bio-vida*, *geo-* tierra) son los movimientos cíclicos que experimentan ciertos elementos (como el oxígeno, el carbono, el nitrógeno, el calcio, el azufre, el fósforo...). Estos elementos son esenciales para el desarrollo de la vida y están presentes en la Tierra formando parte de sus tres geoesferas (atmósfera: *atmos*-gas, litosfera: *litos*-roca e hidrosfera: *hidro*-agua). La particularidad de estos ciclos es que los elementos se reciclan y se incorporan tanto en los organismos (biosfera) como en las tres geoesferas. Un ejemplo de ello es el carbono, que está presente en las tres geoesferas y es el elemento en el cual se basa la vida en nuestro planeta.

La historia de nuestro planeta está repleta de grandes hitos, donde cambios en la vida generaron cambios en la Tierra. Un ejemplo de ello ocurrió hace aproximadamente unos 2.600 millones de años en el momento en que las bacterias (primeros organismos vivos sobre la Tierra) comenzaron a sintetizar clorofila (realizaron la fotosíntesis), exhalando oxígeno a la atmósfera. El oxígeno libre en la atmósfera comenzó a oxidar ciertos minerales y elementos, formando nuevos minerales nunca antes vistos en nuestro planeta y transformándolo hasta crear una atmósfera oxidante.

Con la llegada de la vida aparecieron los primeros organismos que generan minerales, (biomineralizan) de la mano de cianobacterias fotosintéticas, hace unos 3.500 millones de años. Estas bacterias indujeron la mineralización, de manera “fortuita”, de partículas de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), siendo su máxima expresión los estromatolitos. La biomineralización inducida (o “fortuita”) se produjo por la interacción de elementos del metabolismo de los organismos (respiración, nutrición, excreción) y del ambiente que los rodea (alguna de las tres geoesferas). Por ejemplo, algunas algas verdes exhalan  $\text{CO}_2$  durante la fotosíntesis y producen la precipitación de ciertos minerales carbonáticos siguiendo el siguiente equilibrio químico:



Una de las mayores revoluciones en la historia de la vida en la Tierra surgió en el instante en el que los organismos fueron capaces de controlar la biomineralización (biomineralización controlada), aunque su aparición es difícil de precisar en el registro geológico. Los primeros ejemplos de protistas mineralizadores se registran en las pizarras negras del Gran Cañón (Arizona, EEUU) de hace 742 millones de años y, coetáneamente, aparecen las primeras posibles algas calcificantes en dolomías silicificadas del Valle de la Muerte (California, EEUU), aunque los primeros metazoos (animales) mineralizadores no surgieron hasta el Ediacárico (543 millones de años). La gran revolución esquelética se produce durante la llamada “Explosión Cámbrica”, hace unos 520 millones de años, cuando aparecen por primera vez muchos filos con esqueleto (braquiópodos, artrópodos, moluscos, poríferos, equinodermos y los precursores de los cnidarios esqueléticos), que han llegado a nuestros días. Así mismo aparece una

gran diversidad de estructuras mineralizadas que forman esqueletos o partes del mismo como placas, espinas, espículas, escleritos y conchas (Fig. 1), que a su vez están formados por diversos minerales (silicatos, fosfatos, carbonatos), reconociéndose más de 60 especies minerales formadas por organismos. Esta revolución se produce por la toma de iones disueltos en el agua marina y su posterior transformación en partes esqueléticas, que cumplen una determinada función biológica (protección contra depredadores, soporte, movilidad, alimentación, sensores espaciales, sensores ópticos, sensores magnéticos, flotabilidad,

almacén de elementos). Este tipo de biomineralización está controlada mediante mecanismos orgánicos (determinadas células, tejidos u órganos especializados en la formación de esqueletos) y, sin lugar a dudas, es uno de los mayores avances evolutivos de la historia de la vida. Con este despliegue de estructuras, como espinas, mandíbulas, ojos, sensores magnéticos, exoesqueletos y conchas, entre otras, los metazoos comienzan a diversificarse muy rápidamente, a colonizar nuevos nichos vacíos y a expandirse en un planeta acuático prácticamente desocupado.

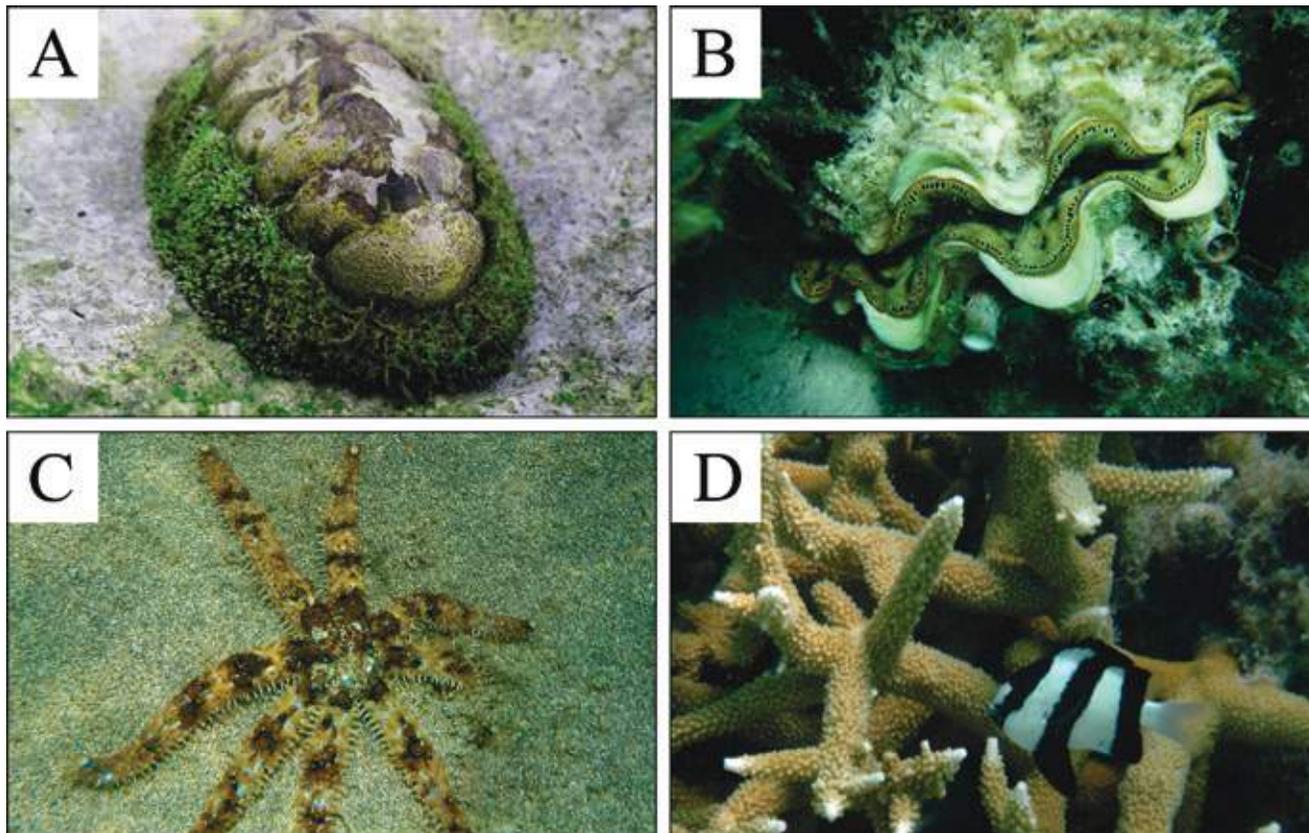
## ¿Sabías que...?

En ciencia cuando hablamos de esqueleto, o parte esquelética de un organismo, nos referimos a un conjunto de piezas articuladas o fusionadas que dan consistencia al cuerpo de los animales y que cumplen una función biológica. Un ejemplo es nuestro esqueleto, que nos sirve de soporte y está formado por cada uno de los huesos y dientes que, además, están articulados. Pero ¿sabías que estos huesos y dientes están formados por el mineral apatito y que cada hueso está formado por miles de cristallitos unidos entre sí mediante fibras de proteína (colágeno)? Esto mismo ocurre en las conchas de mejillón (*Mytilus edulis*). Aunque aparentemente la concha del mejillón es sólida (porque está formada por carbonato cálcico), está constituida por dos valvas articuladas entre sí, de una manera similar a la de nuestros huesos. Si observamos esta concha al microscopio con muchos aumentos observaremos que está formada por miles de cristales muy pequeños unidos por un tejido orgánico que recuerda a las fibras de colágeno de nuestros huesos. Esta unión entre cristales y materia orgánica (fibras de colágeno en nuestros huesos) proporciona a los minerales que forman nuestro esqueleto, o a las conchas de mejillón, unas propiedades únicas (por ejemplo, la concha se hace más dúctil, es decir, se deforma sin llegar a romperse). Este material le proporciona protección al mejillón, porque cuando las aves que viven en la costa intentan abrir o romper

la concha, ésta no se rompe con tanta facilidad. Lo mismo ocurre con nuestros huesos, esa unión entre mineral y materia orgánica hace que nuestros huesos sean más flexibles, nos permiten correr y saltar, soportar nuestro peso o levantar objetos pesados. Los biomateriales que forman los esqueletos y que nos permiten hacer cosas tan increíbles como nadar, volar, trepar, excavar o, como se verá más adelante, generar pequeñas islas, son una verdadera obra de ingeniería.



Ejemplo de dos tipos de esqueletos (*Canis lupus* y *Mytilus edulis*).



**Figura 1.** Algunos ejemplos de esqueletos. A) La concha formada por placas del quitón *Acanthopleura gemmata*, un molusco que se fija a las rocas. Gran Barrera de coral Australiana. B) La concha del bivalvo *Tridacna gigas*, el molusco más grande del mundo, que puede alcanzar 1,4 m y que vive entre corales. Gran Barrera de coral Australiana. C) El esqueleto formado por cientos de pequeñas placas de las estrellas de mar, como *Marthasterias glacialis* (estrella picuda) de las costas de Tenerife. D) Colonia de coral *Acropora formosa* y un pez *Dascyllus aruanus* (damisela de tres bandas) nadando en la Gran Barrera de coral Australiana.

## La fosilización y la diagénesis

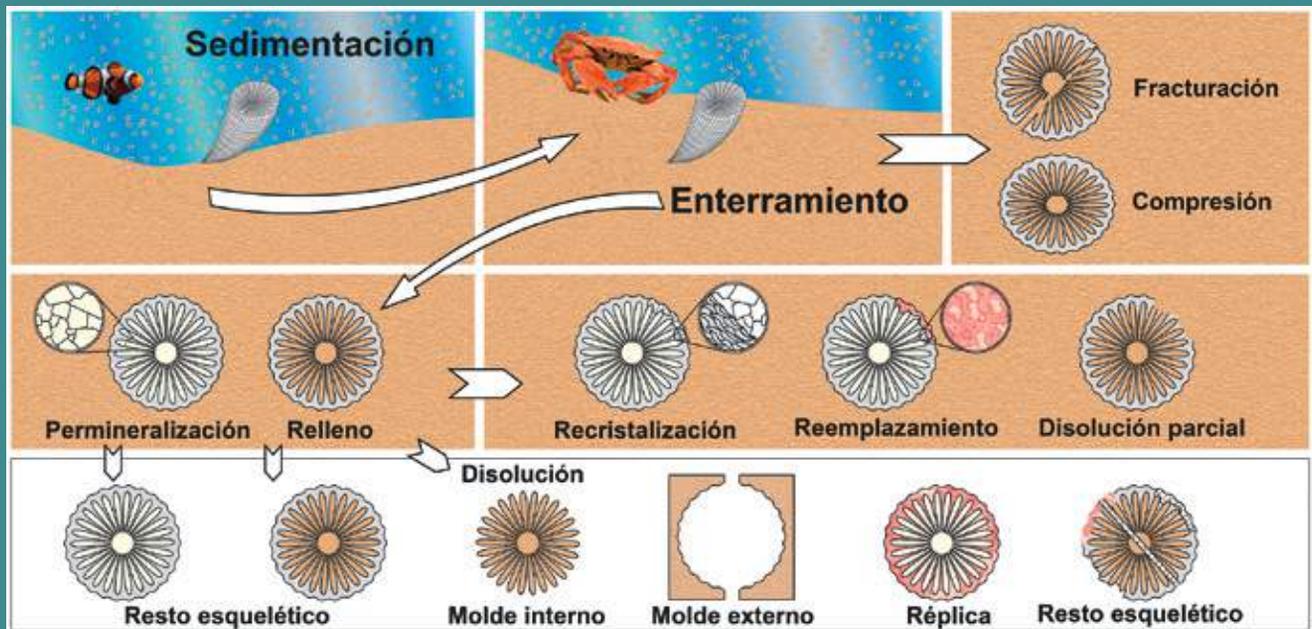
Un fósil es el resto de un ser vivo o de su actividad biológica que ha quedado incluido en la litosfera (ya sea en un sedimento o en una roca) y tiene una edad superior a 10.000 años. Durante el proceso de fosilización (transición de los restos orgánicos de la biosfera a la litosfera) se producen muchos cambios en los organismos y en sus

esqueletos. Es inusual que los organismos se preserven completos o sin transformar y lo mismo ocurre con sus partes esqueléticas. Las partes blandas (tejidos orgánicos) se descomponen, degradan o sirven de alimento para otros organismos y las partes duras (esqueletos o partes esqueléticas) sufren modificaciones. Algunas modificaciones

se refieren al proceso anterior al enterramiento (como desarticulación, fracturación o disolución). Durante el enterramiento se pueden producir procesos de compactación y fracturación de los fósiles debido al peso de los sedimentos que hay sobre ellos o a la deformación de las rocas de la corteza terrestre (pliegues y fallas). Por otra parte, pueden precipitar minerales en las cavidades de los fósiles (permineralización) como, por ejemplo, en el interior de poros en huesos o el interior de conchas. Así mismo los esqueletos fósiles pueden ser disueltos parcial o totalmente (disolución) y posteriormente, en algunos casos, pueden precipitar nuevos minerales en esos huecos (recristalización) con una composición bastante similar o una composición completamente diferente (reemplazamiento). Cuando encontramos un resto fósil que aún conserva su esqueleto (no es un molde) hablamos de resto esquelético y éste puede estar parcialmente o totalmente degradado (recristalizado, permineralizado, comprimido, fracturado e incluso todo a la vez).

Todos los cambios físicos y químicos que tienen lugar en los sedimentos y rocas, incluyendo a los restos esqueléticos o fósiles

que contienen, hasta que alcanzan presiones y temperaturas propias del metamorfismo (transformación de las rocas) se conoce como diagénesis (dia- cambio, génesis- origen). De esta manera todos estos procesos que referimos anteriormente como parte de la fosilización (recristalización, permineralización, compresión, fracturación, disolución...) son parte de la diagénesis y otros más específicos, de la formación de las rocas (como compactación y cementación). Como se verá posteriormente estos procesos diagenéticos son importantes a la hora de estudiar los esqueletos de organismos fósiles y es importante aprender a distinguirlos. Esto es debido a que, en ocasiones, ciertos procesos de alteración diagenética producidos durante la fosilización alteran la composición química y la estructura de los restos esqueléticos fósiles (y podrían ser identificados como originales) y, al contrario, algunas propiedades originales podrían ser identificadas como diagenéticas. Por esa razón en las últimas décadas se están desarrollando y aplicando nuevas técnicas en paleontología que ayudan a los paleontólogos a identificar estructuras primarias y secundarias o diagenéticas.



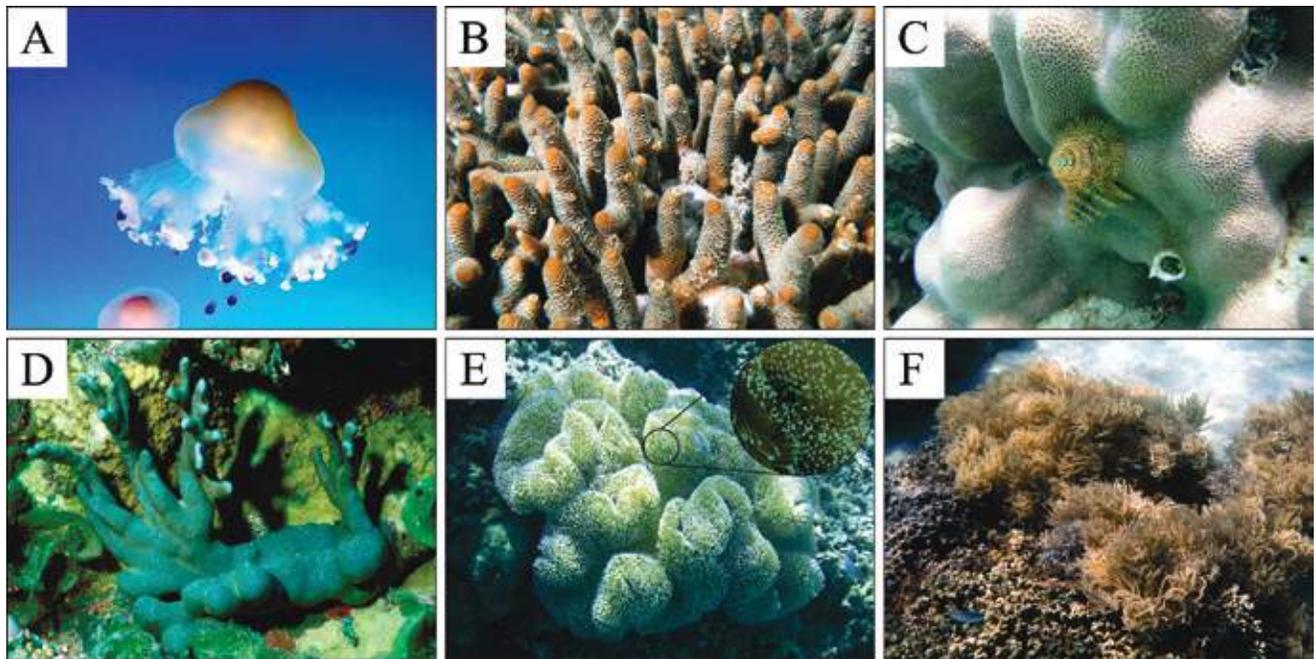
Esquema que agrupa los procesos de fosilización y diagénesis.

Con este aumento de la diversidad de la vida que se produjo hace 520 millones de años, y la formación de elementos esqueléticos, se produce una masiva contribución de los organismos mineralizadores al registro sedimentario (se encuentran más fósiles en el Cámbrico que en todas las rocas más antiguas). En muchas ocasiones, tras la muerte de los organismos mineralizadores se desarticulan sus partes esqueléticas y se incorporan a los sedimentos. A veces, otros organismos se alimentan de estas partes, lo que favorece su desintegración, generando partes aún más pequeñas que se comportan como partículas sedimentarias. Otras veces se produce la disolución de estas partes esqueléticas y partículas sedimentarias. De esta manera, los iones o moléculas que formaban esos esqueletos se reciclan e introducen de nuevo en la litosfera e hidrosfera, realimentando

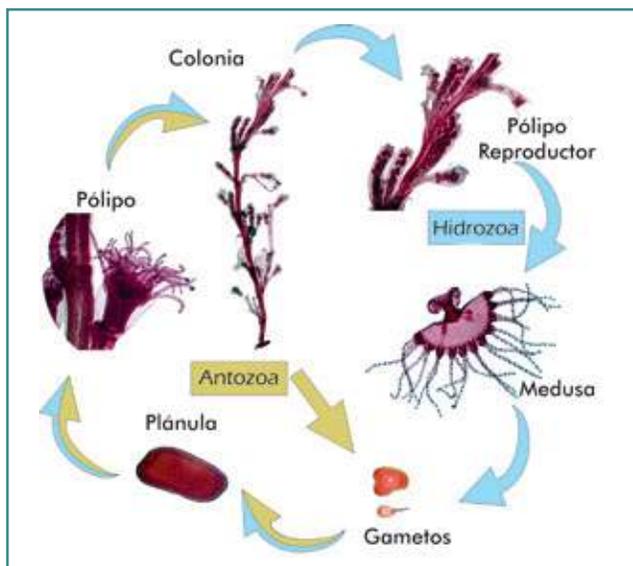
los ciclos biogeoquímicos de la Tierra. Ocasionalmente, tanto los esqueletos como los restos esqueléticos generan fósiles con el paso del tiempo tras incorporarse al ciclo sedimentario.

### Principales tipos de corales. Los cnidarios y los cnidarios esqueléticos

El grupo de los cnidarios (filo Cnidaria) presenta una alta y diversa asociación de organismos, principalmente marinos (aunque algunos viven en agua dulce) que incluye a medusas, anémonas, corales, abanicos de mar, hidras, sifonóforos, zoantarios y myxozoos (Fig. 2). Existen en la actualidad aproximadamente 11.000 especies



**Figura 2.** Distintos tipos de cnidarios. A) Hidrozoo tipo medusa de la especie *Cotylorhiza tuberculata*, también conocida como medusa huevo frito del mar Mediterráneo. B) Coral escleractinio de la especie *Acropora millepora* de la Gran Barrera de coral Australiana. C) Coral escleractinio de la especie *Porites* sp. junto a un gusano árbol de navidad (*Spirobranchus giganteus*) de la Gran Barrera de coral Australiana. D) El octocoral de la especie *Heliopora coerulea* también conocido como coral azul de las Islas Marshall. E) Coral alcionario de la especie *Sarcophyton* sp. de la Gran Barrera de coral Australiana. F) Anémonas de la especie *Anemonia sulcata* de la Gran Barrera de coral Australiana.



**Figura 3.** Ciclo reproductivo de los cnidarios basado en el ciclo reproductivo del hidrozoo *Obelia*.

de cnidarios, que están subdivididos en cinco Superclases: Hydrozoa (medusas), Anthozoa (corales), Cubozoa, Scyphozoa y Polypodiozoa (Brusca & Brusca, 2003). A pesar de su gran variedad de formas, tamaños y modos de vida (*sésil* o fijado al sustrato y *vágil* o de movimiento libre), los cnidarios son metazoos diblásticos (formados por dos capas diferenciadas de tejido, endodermo y ectodermo) que poseen una simetría radial, una boca (blastoporo) recubierta por tentáculos, una capa externa epidérmica, una cavidad gástrica (celenterón) y una capa media, llamada mesoglea, que deriva del ectodermo. Los cnidarios pueden moverse, doblarse, expulsar sustancias no digeribles y activar los tentáculos para atrapar alimento a partir de células musculares y son hábiles depredadores que se alimentan de organismos marinos microscópicos, como el plancton y pequeños peces que atrapan con sus tentáculos, así como filtradores. Muchos de ellos tienen algas verdes (zooxantelas) en el interior de sus células, que viven como simbioses y les proveen de nutrientes, mientras ellas se alimentan a partir de la fotosíntesis y están protegidas en el interior del cnidario.

Una característica importante de los cnidarios es que tienden a formar colonias por reproducción asexual a partir de un único individuo, o lo que es lo mismo, todos los individuos que forman la colonia son clones. Estas colonias pueden llegar a alcanzar tamaños enormes, incluso de decenas de metros. Por otra parte, muchas especies de cnidarios tienen un ciclo vital dimórfico (presentan dos formas): una forma pólipo (*sésil*) y otra medusa (*vágil*). En este ciclo vital los pólipos se reproducen de forma asexual mientras que las medusas se reproducen de forma sexual. Este ciclo produce una alternancia de generaciones como se puede observar en la figura 3.

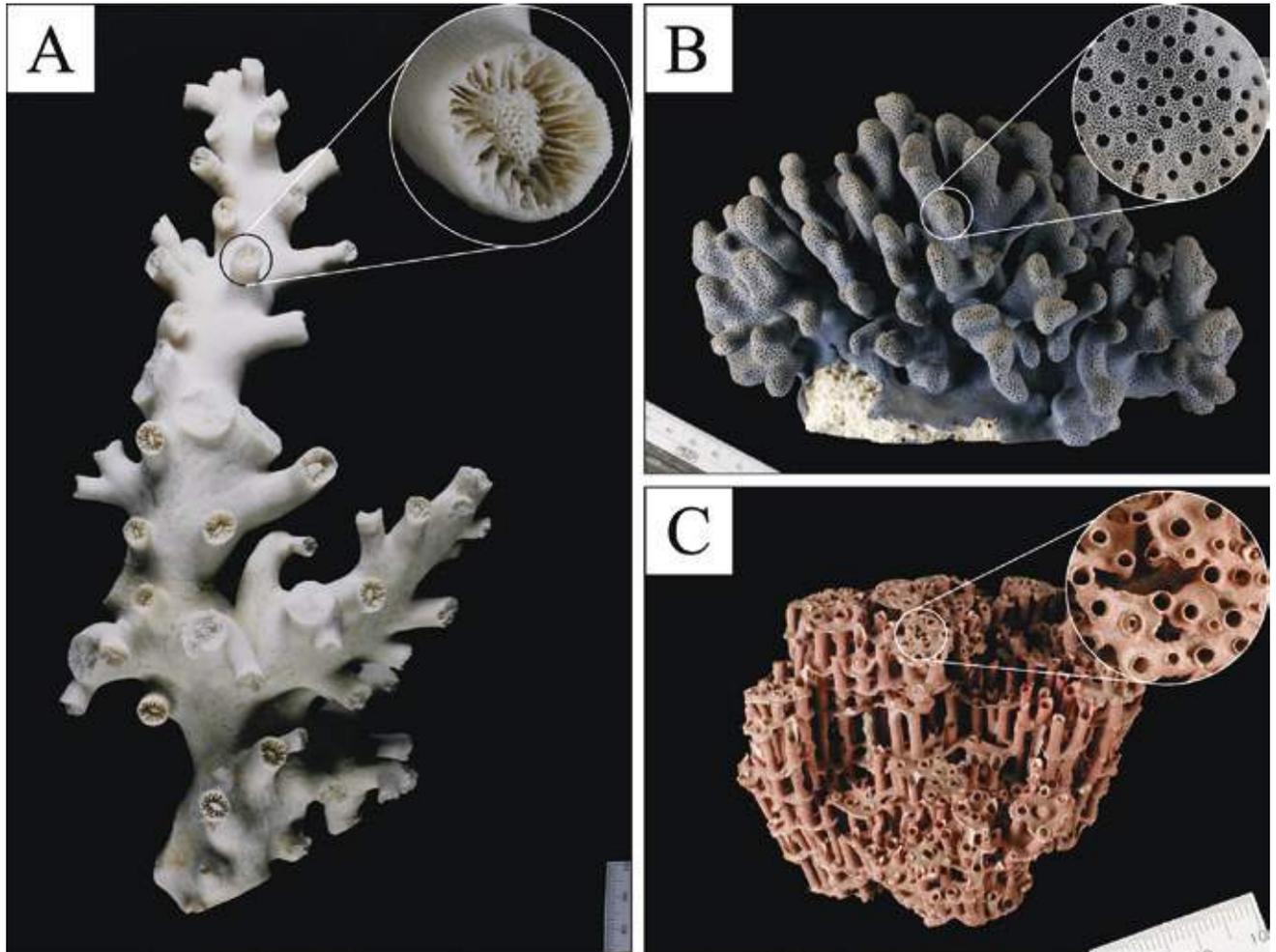
Los cnidarios poseen una de las historias más largas e inciertas de entre todos los filos de metazoos que se conocen en el registro geológico. Posiblemente esto es debido a dos problemas, 1) los cnidarios presentan morfologías y estructuras muy simples, por lo que los cnidarios fósiles son difíciles de identificar y de diferenciar de otros organismos como las esponjas; 2) solo unos pocos cnidarios presentan esqueletos mineralizados, los cuales se concentran principalmente en la Superclase Anthozoa y se conocen comúnmente como corales.

Los primeros supuestos fósiles de cnidarios aparecen hace 2.000 millones de años y corresponden a organismos similares a las medusas, y algo similar ocurre en la antigua fauna de Ediacara (Ediacárico, 543 millones de años) donde aparecen impresiones en las rocas de organismos de cuerpo blando que también recuerdan a medusas. Hasta el Cámbrico no se conocen los primeros cnidarios con esqueleto.

El término coral hace referencia a un grupo de organismos con forma coralina y aunque no necesariamente tienen un esqueleto mineralizado, en su mayoría sí que lo tienen o al menos partes esqueléticas mineralizadas (como espículas o escleritos, que son pequeñas fibras cristalinas que ayudan a dar consistencia al cuerpo de organismos blandos como las esponjas). Algunos grupos solo poseen un esqueleto córneo (quitinoso) que los sostiene verticalmente en los lechos marinos y favorece su alimentación.

Los tipos de esqueletos de los corales son variados, tanto internos, como en ciertos octocorales, como externos en escleractinios (corales actuales, Fig. 4) y otros octocorales (como Heliopóridos y Tubipóridos, Fig. 4). Su composición puede ser orgánica, como se comentó anteriormente, o mineral, formada principalmente por carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ).

El registro más continuo de los cnidarios que han encontrado los paleontólogos se extiende desde el Ediacárico (543 millones de años) a la actualidad. Los cnidarios se encuentran principalmente en rocas sedimentarias marinas y han contribuido de manera eficiente a la formación de rocas, especialmente de arrecifes desde el Ordovícico Inferior (a principios del Paleozoico) hasta la actualidad.



**Figura 4.** Esqueletos de cnidarios actuales. A) Esqueleto de aragonito del coral escleractinio *Dendrophyllia ramea*. B) Esqueleto de aragonito del octocoral *Heliopora coerulea*. C) Esqueleto de calcita del octocoral *Tubipora musica*.

## “En busca de corales”

El profesor Sergio Rodríguez nos cuenta las desventuras del paleontólogo que busca arrecifes fósiles en las montañas de medio mundo.

*Entre los muchos atractivos que tiene la profesión del paleontólogo, uno de los más importantes es la diversidad de tareas que se abordan, que hacen que muy raramente se convierta en un trabajo aburrido o tedioso. El paleontólogo trabaja en prospecciones y excavaciones en el campo, en el laboratorio preparando las muestras y someténdolas a todo tipo de análisis, en la biblioteca consultando algunos volúmenes antiquísimos pero otras veces tan recientes que todavía no están en papel, sino solo accesibles a través de internet, trabajando en el ordenador con programas de corrección fotográfica para buscar en los fósiles los detalles que el ojo no ve, con programas estadísticos...*

*Pero quedémonos con la tarea más excitante, la búsqueda de restos fósiles en el campo. El paleontólogo debe acercarse a los lugares donde puedan encontrarse los fósiles que busca. Para ello debe tener información detallada de dónde vivían los organismos que han dado lugar a los fósiles y dónde hay rocas que puedan contener los fósiles que busca, teniendo en cuenta la época y el ambiente en que vivieron (por ejemplo si son marinos o terrestres). Así, para un paleontólogo especializado en arrecifes y en fósiles de corales del Paleozoico superior (Carbonífero y Pérmico), la búsqueda se concentra en las zonas que en aquella época estaban en los trópicos (que es donde se desarrolla la mayor parte de los arrecifes en la actualidad) y que no tienen nada que ver con la posición de las zonas tropicales de hoy día. Esto se debe a que la deriva continental ha reconfigurado el planeta en varias ocasiones. Observando el mapa se puede ver cómo la posición de los continentes en el Carbonífero era muy diferente al mapamundi actual. Además, el conocimiento a fondo del tema implica la visita a arrecifes actuales para informarse y comparar con lo que nosotros estudiamos.*

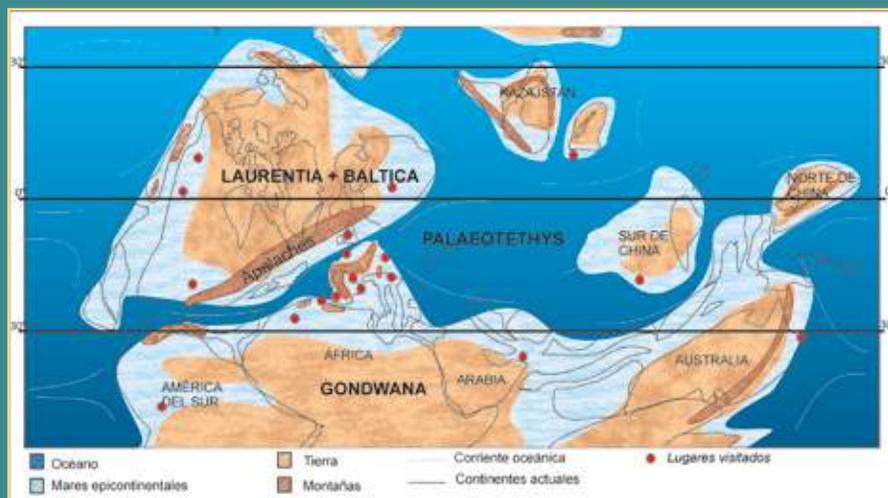
*En el mapa adjunto se reflejan las zonas tropicales en el Carbonífero y se marcan algunos de los lugares visitados por este humilde relator. Desde luego, los paleontólogos no somos como Indiana Jones (él era arqueólogo, no paleontólogo) pero también tenemos nuestras pequeñas aventuras de andar por casa. En los viajes de investigación paleontológica he pasado por incidentes como bañarme rodeado de tiburones en las aguas de la Gran Barrera de coral Australiana, un desagradable encuentro con una cobra en Hunan (China), sufrir de mal de altura en los Andes bolivianos, encontrarme con campos minados en el desierto fronterizo entre Marruecos y Argelia o tener que ir equipado de un spray anti-grizzlies en las Montañas Rocosas canadienses. En este último caso no tuve que hacer uso del spray ya que los temidos osos se abstuvieron de acercarse a nosotros pero sí que tuve un encuentro con un alce, animal si cabe más peligroso que el feroz grizzly.*

*Sin embargo, algunas de las anécdotas más llamativas suceden donde uno menos se lo espera y en nuestro propio país. Posiblemente mi experiencia más curiosa como paleontólogo en el campo sucedió en los Picos de Europa hace ya muchos años. Las inmensas masas de calizas de estas montañas son de edad carbonífera y tienen muchos fósiles marinos, entre ellos corales que son allí no muy abundantes, pero por ello muy valiosos científicamente. Esto sucedió en las cercanías de un pueblo llamado Dobres (Cantabria), rodeado de espectaculares riscos calcáreos, hasta el que sube una empinada carretera entre túneles que salvan grandes crestas de calizas. Buscando fósiles de corales pasé todo un día en una empinada ladera, ascendiendo fuertes pendientes en difíciles condiciones. Mi sistemática búsqueda y persistencia fue premiada con el hallazgo de unos niveles con algunos corales. El trabajo de extracción fue laborioso en la dura roca caliza, pero uno ya está acostumbrado a esto cuando trabaja con fósiles de corales. El premio al esfuerzo fue la obtención de unos cuantos espléndidos ejemplares que se marcaron*

con cuidado y se introdujeron en bolsas de plástico preparadas al efecto. Luego llegó la dura tarea de transportar las bolsas (unos 15 kilos) en la mochila hasta la carretera donde había dejado el coche. Tampoco eso es ningún obstáculo para el entusiasta paleontólogo. Al llegar a la carretera, decidí que ya era suficiente el esfuerzo realizado y que en vez de acarrear las bolsas hasta el coche, aparcado a unos dos kilómetros carretera arriba, las dejaría cuidadosamente en la cuneta y traería el coche hasta el lugar en el que había accedido a la carretera. Así lo hice. Durante mi camino de vuelta al coche, me crucé con un simpático paisano que conducía una carretilla. Como es habitual en estos casos, le saludé e incluso hicimos algún comentario sobre el magnífico tiempo del que disponíamos y sobre las bellezas del paisaje que desde aquellas alturas se observaba.

Cuando llegué hasta el coche, repuse fuerzas e inmediatamente me dirigí a recoger mi preciado tesoro paleontológico. Al llegar al

lugar donde esperaba encontrar las bolsas, no hallé nada. Recorrí la carretera arriba y abajo pensando que me podría haber equivocado de lugar, pero no... tenía varias claras referencias en el terreno, que siempre hay que tomar en estos casos, y todas me indicaban que estaba en el lugar correcto. Estaba preguntándome qué podría haber pasado con las bolsas cuando vi volver carretera arriba al paisano de la carretilla. Asaltado por una siniestra premonición, le pregunté si había visto las bolsas. Me respondió. "Claro que sí. Mi labor es quitar de la cuneta todos los cantos que caen desde esos riscos y no se me escapa ninguno. Como eran piedras, he hecho lo que con todas las que encuentro, tirarlas al barranco". Me asomé al abismo sólo para constatar la imposibilidad de encontrar las muestras cien metros más abajo en una pedrera salpicada con millones de fragmentos calizos de todos los tamaños. Pero lo que más me dolió fue el consuelo del paisano: "No se preocupe, si quiere unas piedras, por aquí las tiene a montones, yo todos los días tiro ahí abajo unos cientos".



Mapa de la distribución de los continentes durante el Misisípico. En rojo, los diferentes puntos donde el profesor Sergio Rodríguez ha muestreado corales, que se concentran en zonas tropicales.

Los corales tienen una organización muy básica, sin órganos propiamente dichos, y grupos muy distintos presentan repetición de formas externas por adaptación a los mismos ambientes. A esto se le llama homomorfismo. Por ello, el estudio de los corales hay que hacerlo tanto con el análisis de su morfología externa como, más frecuentemente, estudiando su estructura interna. Los principales caracteres que se utilizan para diferenciar unos corales de otros son:

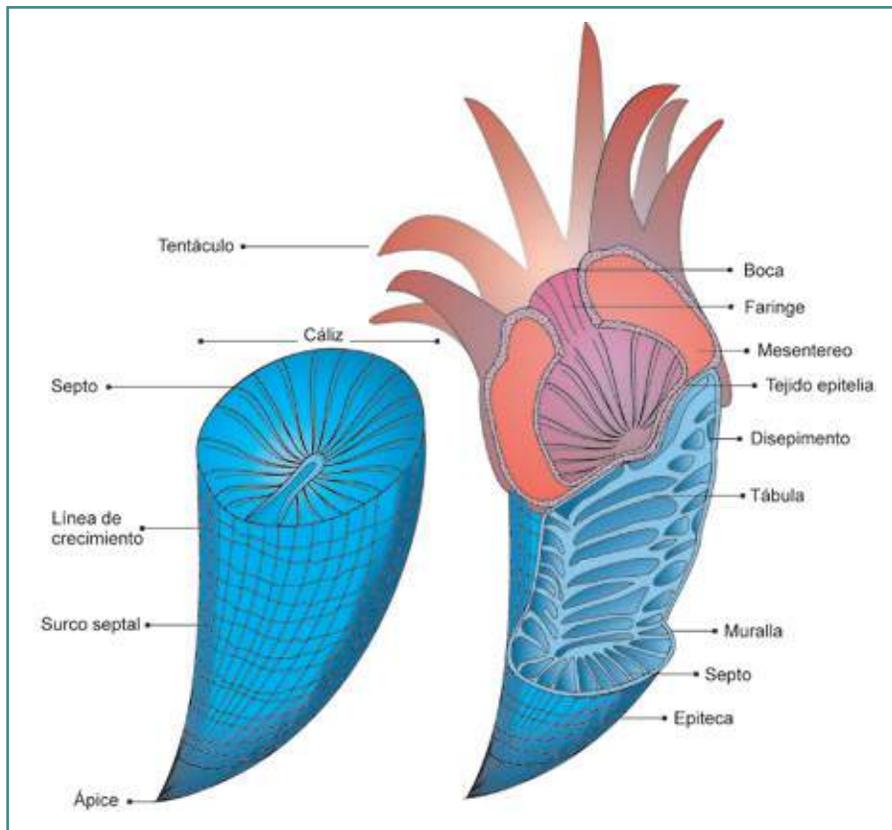
### *Forma externa*

Los corales pueden ser solitarios o coloniales. Si son solitarios predominan las formas cónicas invertidas (Figura 5)

que se diferencian básicamente por el ángulo inferior del cono. Los coloniales tienen diferentes denominaciones según el grado de integración de los individuos en la colonia. Así, se diferencian formas fasciculadas, donde los individuos, aunque derivan unos de otros, están más o menos separados entre sí (Figura 6D), y formas masivas, cuando los individuos de la colonia están en completo contacto unos con otros (Figura 6B, D).

### *Muralla*

Bordea todo el coral externamente y protege los flancos de los pólipos. En los corales tabulados puede llegar a ser muy gruesa, incluso más que la propia cavidad interior donde se aloja el pólipo.



**Figura 5.** Características internas y externas de los esqueletos de corales y vista interna de un pólipo.

## Septos

Así se denomina a los tabiques radiales que dividen el coral en secciones verticales y que sirven de soporte a los músculos que permiten el movimiento de los tentáculos. Cuando se estudian internamente o cuando observamos el coral desde arriba es lo más destacado del coral. Curiosamente, en los corales tabulados están muy poco o nada desarrollados.

## Tábulas

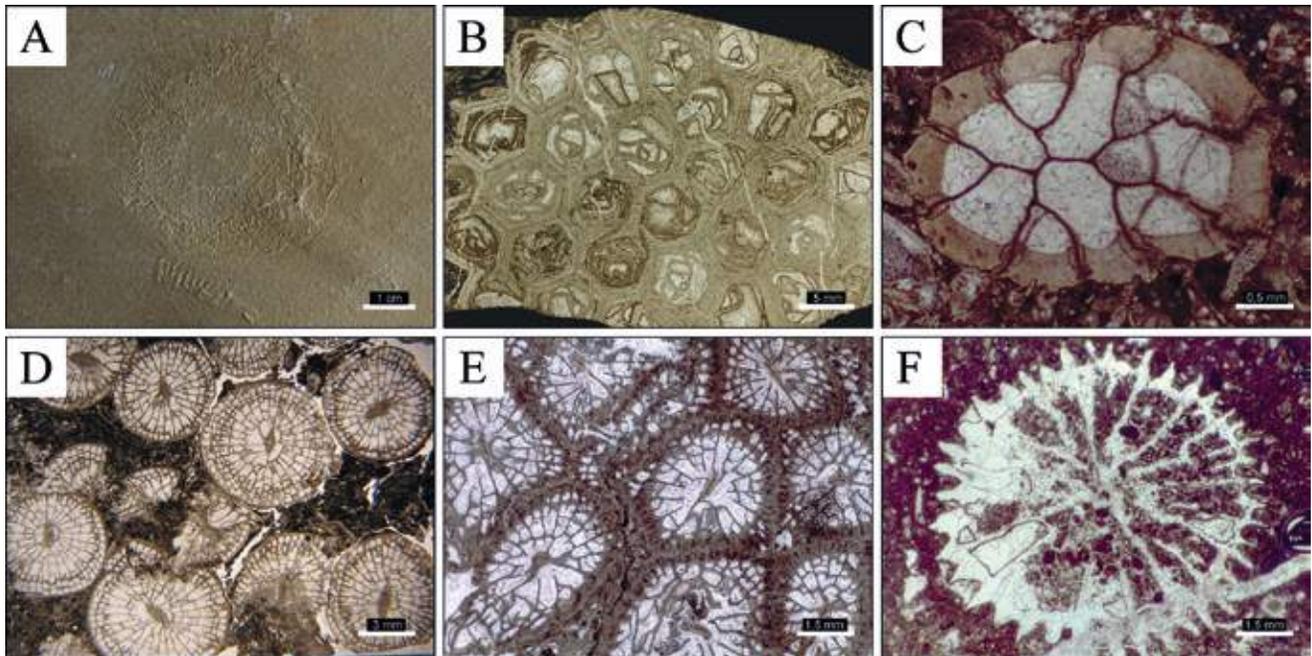
Son unas láminas más o menos espaciadas que dividen horizontalmente la cavidad interior. Sirven de sostén al pólipo, que se apoya sobre ellas. Pueden ser horizontales pero más frecuentemente tienen formas cóncavas, convexas o de cono invertido.

## Disepimentos

Son unas laminillas curvas que se encuentran próximas a la muralla externa y, junto a las tábulas, sirven para el apoyo del pólipo. En los corales tabulados no existen pero suelen ser muy abundantes en los corales rugosos.

## Los corales del Paleozoico

Dentro de los corales que aparecen en el Paleozoico (Ordovícico a Pérmico) destacan tres clases, debido a la abundancia de los fósiles que se encuentran en rocas del Paleozoico: rugosos, tabulados y heterocorales, siendo rugosos y tabulados los más comunes.



**Figura 6.** Algunos ejemplos de cnidarios fósiles. A) Impresión de una medusa fósil, *Palaequorea rygoly* del Jurásico (Kimmeridgiense) de Solhofen (Alemania). B) Coral tabulado masivo, *Michelinia gigantea* de una localidad situada 3 km al oeste de Khenifra (Marruecos), Carbonífero Inferior (Viseense inferior). C) Heterocoral, *Heterophyllia* sp., de la Sierra del Castillo, Córdoba (España), Carbonífero Inferior (Viseense superior). D) Coral rugoso fasciculado, *Siphonodendron martini*, del Carbonífero inferior (Viseense superior) de Peñarroya, Córdoba (España). E) Coral rugoso masivo, *Petalaxispera pertuensis* de Pendueles, Asturias (España), Carbonífero superior (Bashkiriense superior-Moscoviense inferior). F) Coral escleractinio no identificado procedente de Llanes, Asturias (España), Cretácico Superior.

Cada grupo tiene características que los distinguen de los demás grupos. Así, los tabulados son exclusivamente coloniales, sus individuos suelen ser de pequeño tamaño (no suelen superar 1 cm de diámetro y lo más habitual es que su diámetro sea de 1 a 3 mm) y tienen poco desarrollados los septos o tabiques radiales pero muy desarrolladas las tábulas, de ahí su nombre. Los rugosos pueden ser solitarios o coloniales y tienen bien desarrollados los septos, las tábulas y los disepimientos. El tamaño de los individuos varía entre unos pocos milímetros y 10 cm en los coloniales y algunos solitarios pueden alcanzar hasta 20 cm de diámetro (Fig. 6). Los escleractinios, como los rugosos, pueden ser solitarios o coloniales y tienen bien desarrollados los septos, pero las tábulas y disepimientos son más irregulares; sus septos se desarrollan en ciclos de seis (o múltiplo de seis) y cada uno de estos ciclos suele tener una longitud diferente. Finalmente, los heterocorales son solitarios y tienen septos que se dividen desde el centro hacia el exterior, tienen tábulas simples y carecen de disepimientos; su diámetro es muy pequeño, pues apenas pasan de unos pocos milímetros, pero pueden alcanzar longitudes de varias decenas de centímetros (Fig. 6).

Los tabulados son el grupo más antiguo de corales, que evolucionó a partir de anémonas de mar (cnidarios sin esqueleto mineralizado) (Fig. 6). Los primeros que conocemos proceden del Ordovícico inferior. En el Ordovícico medio, unos pocos millones de años más tarde, se encuentran los rugosos. Estos dos grupos de corales fueron diversos y abundantes durante casi todo el Paleozoico y sólo desaparecieron en la extinción ocurrida al final del Pérmico (hace 245 millones de años). Los heterocorales son mucho menos abundantes y vivieron solo a finales del Devónico y principios del Carbonífero.

### Los corales y su esqueleto. Importancia en el registro fósil

Los cnidarios pueden formar biominerales de tres grupos químicos diferentes (Lowenstan & Weiner, 1989): fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), aunque la mayor parte de los cnidarios

no genera esqueletos mineralizados. Cabe destacar que los esqueletos son muy variados en este filo; lo más común es que los pólipos sésiles produzcan partes mineralizadas (elementos esqueléticos o esqueletos completos), como espículas, agregados de espículas o esqueletos masivos, cuya función es el soporte de la colonia, mientras que las medusas generan órganos del equilibrio mineralizados que les ayudan a mantenerse en posición vertical mientras flotan en el agua.

Los carbonatos son muy abundantes en los corales (Anthozoa), tanto en la actualidad como a lo largo del registro geológico (Sorauf, 1980). Los dos minerales más comunes de carbonato cálcico son la calcita y el aragonito: ambos tienen la misma composición ( $\text{CaCO}_3$ ) pero diferente estructura cristalina.

Los corales pertenecientes a la Clase Escleractinia (como los actuales) precipitan esqueletos masivos de aragonito, al igual que algunos hidrozoos (como los Milleporidae y Stylasteridae; Lowenstan & Weiner, 1989; Cuif *et al.*, 2011). Por otra parte, los octocorales generan espículas de calcita con alto contenido en magnesio y/o aragonito, aunque también pueden generar algunas de fosfato cálcico (apatito). En el caso de los corales fósiles que no tienen especies representantes (o supervivientes) en la actualidad, como ocurre con los corales del Paleozoico pertenecientes a las clases Rugosa, Tabulata y Heterocorallia, los paleontólogos mantienen una fuerte discusión sobre la mineralogía original de su esqueleto (aragonito o calcita). Un hecho llamativo es que todos los corales paleozoicos tienen esqueletos mineralizados en calcita y la calcita es un mineral mucho más estable y resistente a la alteración que el aragonito, por lo que la estructura interna de los corales paleozoicos está frecuentemente bien preservada, al contrario que la de los escleractinios fósiles, que suele estar muy alterada y transformada de aragonito a calcita.

### Creando un esqueleto

Para entender la forma en la cual los corales generan su esqueleto nos vamos a centrar en los mecanismos que emplean los corales escleractinios.

## ¿Cómo se estudian los corales?

Como hemos mencionado en la enumeración de los elementos más característicos de los corales, las formas externas son poco representativas en los corales. Dos corales pertenecientes a grupos muy separados evolutivamente (como rugosos y escleractinios) pueden tener formas externas muy similares si se han adaptado a un mismo ambiente. Por ello, para estudiar los corales es necesario analizar las estructuras internas (septos, tábulas, diseipimentos). Esas estructuras internas se estudian mediante secciones pulidas, láminas delgadas, réplicas de acetato y láminas ultrafinas.

### Secciones pulidas

Consisten en cortes que se hacen al fósil y luego se pulen y se preservan con una laca o barniz y que permiten observar la estructura interna con lupa o microscopio de reflexión.

### Láminas delgadas

Secciones de los corales que se pulen por ambas caras y cuyo espesor se reduce a unas pocas micras (normalmente entre 30 y 50), de forma que las estructuras internas pueden verse



Realización de láminas delgadas. A) Se corta la roca que contiene los corales a estudiar con un disco de diamante. B) Se recortan en poliedros y se pule la cara que nos interesa. C) Se pega esta cara a un cristal delgado. D) Se desbasta la roca con una cortadora, eliminando el sobrante y dejando solo unas pocas micras de grosor. E) Se pule otra vez hasta que se observa perfectamente lo que se quiere estudiar. F) Imagen del coral al microscopio de luz transmitida.

por transparencia en microscopio de transmisión; permiten la observación de muchos más detalles que las secciones pulidas. Es la técnica más habitual para el estudio de los corales.

### **Réplicas de acetato**

Secciones de corales a las que se aplica una capa de ácido clorhídrico (HCl) diluido y otra de acetona para "disolver" la superficie del fósil y, aplicando una película de acetato, obtener un

negativo de la superficie. Permiten una mejor observación que las secciones pulidas y destruyen menos parte del fósil que las láminas delgadas, por lo que a veces se utilizan alternativamente a éstas.

### **Secciones ultrafinas**

Son como las láminas delgadas pero alcanzando espesores de la lámina de menos de 5 micras. Sirven para analizar la microestructura de los fósiles.

La formación del esqueleto de los corales se realiza a partir del tejido epitelial de los pólipos. Estos poseen unas células especializadas del ectodermo, que se denominan calcioblastos, que se encargan de la precipitación de los cristales de aragonito. El lugar de reacción, donde se produce la precipitación, es un pequeño espacio acuoso entre el tejido del pólipo y el esqueleto, donde el coral deposita una capa rica en compuestos orgánicos, como azúcares, lípidos y proteínas. Esta capa, o matriz orgánica, favorece la precipitación de las moléculas de carbonato cálcico por procesos químicos. Para ello, primeramente el pólipo bombea agua de mar desde el exterior del pólipo a la zona basal, o de precipitación, donde se ancla al esqueleto. Los iones disueltos en el agua de mar ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{CO}_3^{3+}$ ) que son bombeados por el coral se combinan siguiendo las reacciones químicas que se han descrito anteriormente y que son las reacciones necesarias para que precipite el  $\text{CaCO}_3$  en cualquiera de sus polimorfos en equilibrio (calcita, aragonito o vaterita). Las moléculas de carbonato cálcico se unen por adición a la matriz orgánica, seguramente a las proteínas, formando pequeños nanocristales (cristales de tamaño nanométrico, nm, una millonésima parte de un mm). Estos nanocristales se agrupan entre sí, formando capas micrométricas (tamaño micrómetro,  $\mu\text{m}$ , una milésima parte de un mm) y solidifican por la pérdida de agua que hay en la estructura, por lo que se convierten en un sólido tridimensional con una morfología muy concreta (un microcristal). Este sólido formado por nanocristales, que alcanza un tamaño de varias micras (0,3-1,5  $\mu\text{m}$  de ancho a 8-15  $\mu\text{m}$  de largo) tiene forma de aguja (acícula), una fibra muy alargada

con un extremo puntiagudo. Seguidamente, estos microcristales también se agrupan entre sí formando abanicos tridimensionales micrométricos (que se conocen como esclerodermis). Todos los cristales que forman un esclerodermito crecen a la vez. Los paquetes de fibras, o esclerodermis, están enlazados entre sí, formando el conjunto global del esqueleto. Dependiendo de la zona del esqueleto en la que hayan crecido, los microcristales y los esclerodermis tienen unas orientaciones diferentes e incluso pueden tener unas pequeñas variaciones morfológicas.

Al grupo de cristales con unas morfologías y tamaños comunes y que están interrelacionados entre sí se le conoce como textura. Esta textura, dependiendo de la escala a la que se observa (nanométrica o micrométrica), recibe el nombre de nanoestructura o microestructura. En el ejemplo del coral de la figura 7 (*Dendrophyllia ramea*) la microestructura es acicular (formada por fibras o agujas) y ésta a su vez está ordenada en paquetes. Los microcristales apuntan hacia el exterior del coral, mientras que la nanoestructura del coral es granular (forma de grano) y se observa que todos los nanocristales tienen la misma orientación (apuntan hacia el extremo de la acícula).

Durante años la microestructura se ha empleado como ayuda para la clasificación de los corales (Stolarski, 2000). Pero no solo de los corales, también de algunos moluscos (como bivalvos, Esteban-Delgado *et al.*, 2008).

El profesor de química de la Universidad de Bristol, Steve Mann recoge en un libro las principales características que debe tener un esqueleto producido por un organismo y que, sin duda, ayudan a reconocer los esqueletos que aún presentan cristales originales. Un esqueleto debe tener (según Mann, 2001):

- Tamaño uniforme de los cristales que lo forman.
- Cristales bien definidos y con composición química similar.
- Un alto grado de organización espacial de los cristales que lo forman: organizado en capas o paquetes.
- Cristales con morfologías complejas: los cristales curvos son raros en el mundo inorgánico, mientras que el orgánico genera muchos cristales con caras curvas.

- Textura y agregación de los cristales controlada: microestructura y nanoestructura ordenada.
- Cristales con orientación cristalográfica controlada: esto quiere decir que al menos el eje de crecimiento del cristal (el eje *c*) muestre una orientación similar en todos los cristales.
- Organización en estructuras jerárquicas. Las estructuras jerárquicas son ordenaciones que se crean para sostener una idea central o meta como, por ejemplo, una pirámide. Pero quizás el ejemplo que más se asemeja a un esqueleto es un edificio, donde un conjunto de ladrillos forma una pared y cuatro paredes forman el edificio. Entonces, para formar el edificio es necesario disponer de los otros dos factores: primero ladrillos y luego paredes, y estos dependen

## *La estructura cristalina de los carbonatos de calcio, $\text{CaCO}_3$*

Todo mineral, ya sea formado de manera inorgánica por procesos puramente naturales o bien por algún organismo, tiene unas propiedades distintivas que lo hace identificable, como dureza, hábito, composición, brillo, color, exfoliación, fractura y peso específico. Pero todos los minerales (incluidos los biominerales) son sólidos que tienen una estructura cristalina (una estructura interna formada por átomos y moléculas ordenadas) por la cual adquieren sus propiedades. La estructura cristalina y la composición química son las dos propiedades que mejor ayudan a identificar a los minerales. Los minerales de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) presentan polimorfos; esto quiere decir que, aunque presenten una composición química similar, basada en el  $\text{CaCO}_3$ , pueden tener diferentes simetrías y morfologías (hábitos de crecimiento), derivadas de su estructura cristalina. Por ejemplo, en la naturaleza es común que el  $\text{CaCO}_3$  precipite formando cristales de calcita, aragonito o vaterita. Estos polimorfos tienen una composición

basada en el  $\text{CaCO}_3$  pero, como raramente es completamente pura, incluye normalmente pequeñas cantidades de ciertos elementos, solo detectables con potentes técnicas de análisis. La composición de estos cristales en los biominerales tiene diferentes elementos, dependiendo de su polimorfo (estructura cristalina), aunque lo común es que haya magnesio (Mg), estroncio (Sr) y también pueden contener azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb), bario (Ba) y sodio (Na), entre otros. Dependiendo de la estructura cristalina y de la disposición de los átomos, algunos polimorfos aceptan más fácilmente unos elementos u otros. Por ejemplo, la calcita tiene más proporción de Mg, Fe o Mn que el aragonito, que admite más Sr, Pb o Ba.

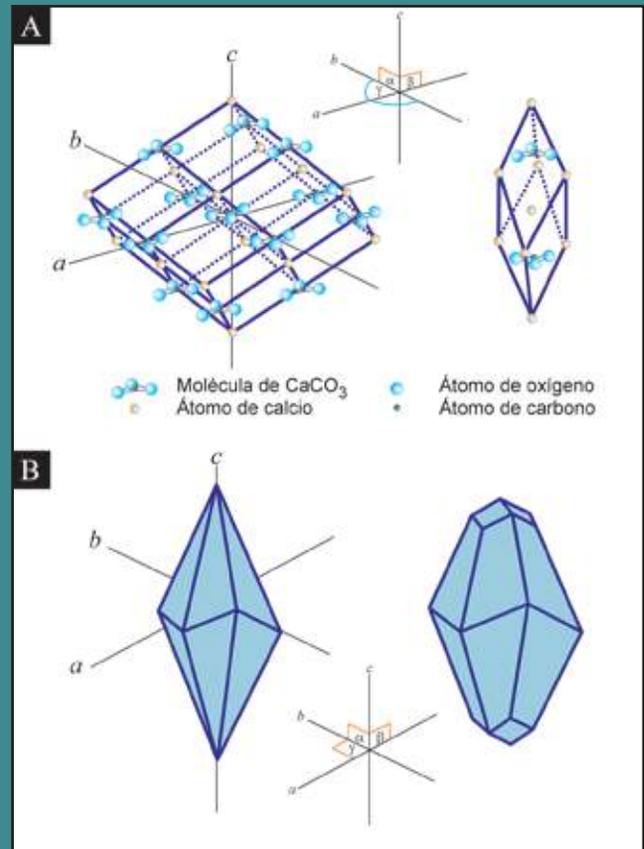
Como se explicaba anteriormente, la estructura cristalina es la forma en la que se ordenan y empaquetan los átomos y moléculas que forman un mineral (y depende de la composición química también).

En ocasiones incluimos en el término “mineral” a ciertas sustancias de la naturaleza que presentan una estructura cristalina no ordenada y que son amorfas, no cristalinas. Algunos biominerales también pueden serlo, como las espículas de esponjas o los esqueletos de algunas microalgas con flagelos (dinoflagelados). Pero los esqueletos de coral, que están formados por calcita y aragonito, tienen una estructura cristalina muy ordenada y reconocible.

El estudio de los cristales, tanto de sus formas y simetría, como de sus hábitos, se denomina cristalografía. Para ello se emplean ciertos aparatos analíticos que nos revelan la estructura cristalina del mineral a estudiar. La estructura cristalina se basa en la ordenación periódica (repetitiva) de los átomos, formando caras pulidas cristalinas y éstas forman, a su vez, un cristal tridimensional, que tiene una simetría característica. Los cristales pueden situarse en un sistema de referencia basado en ejes ( $a$ ,  $b$  y  $c$ ), que se conoce como cruz axial. Los tres ejes se cortan en el centro geométrico del cristal y limitan las caras, vértices y aristas del mismo. Las relaciones entre los ejes se miden en ángulos ( $\alpha$  —entre  $b$  y  $c$ ,  $\beta$  —entre  $a$  y  $c$ ,  $\gamma$  —entre  $a$  y  $b$ ). De esta manera existen siete sistemas de ejes de referencia que tienen unas relaciones angulares y de longitud características (triclínico, monoclinico, ortorrómbico, tetragonal, cúbico, trigonal y hexagonal). La calcita y el aragonito tienen sistemas diferentes: hexagonal para la calcita ( $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ ) y ortorrómbico para el aragonito ( $a \neq b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ), por lo cual se identifican fácilmente mediante técnicas de análisis cristalográfico.

Aunque ambos minerales tengan la misma composición química, la estructura cristalina del aragonito lo convierte en un mineral metaestable (*meta-* posterior). Esto quiere decir que a diferentes temperaturas o presiones a las que se formó, como sucede durante el enterramiento o la exhumación de las rocas, el aragonito tiende a disolverse en contacto con el agua. Por esa razón, los fósiles formados por aragonito son raros en la naturaleza y muy valiosos.

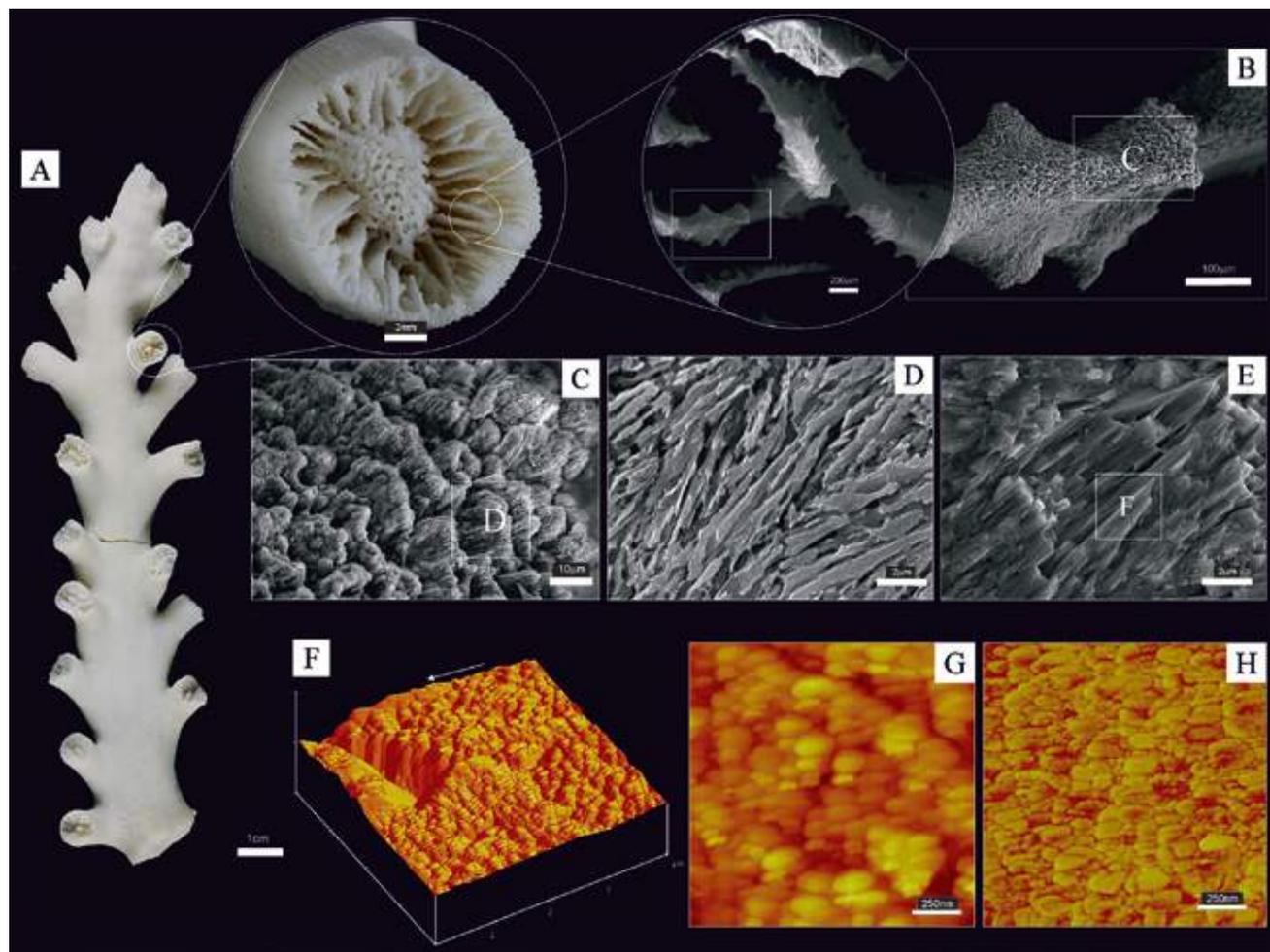
Normalmente, el aragonito se disuelve y, empleando esas mismas moléculas ( $\text{Ca}$  y  $\text{CO}_3$ ), precipita un mineral más estable, como es la calcita. La calcita, a ciertas temperaturas y presiones durante el enterramiento, también puede disolverse en contacto con el agua. Por esa razón es difícil encontrar fósiles que presenten partes de su esqueleto con la composición y estructura original.



A) Estructura molecular de dos cristales de calcita. Los ejes ( $a$ ,  $b$  y  $c$ ) ayudan a describir su simetría y sus relaciones angulares. B) Los cristales de aragonito tienen diferentes relaciones angulares y morfologías derivadas de su simetría.

el uno del otro. Por ello, en la base de la pirámide estarían los ladrillos (los nano y microcristales del esqueleto) que se unen formando una pared (con agujas y paquetes de agujas) y, por último, la unión de las cuatro paredes forma un edificio (la unión de los paquetes forma el esqueleto).

Como se verá más adelante, para que los paleontólogos puedan reconocer un esqueleto biogénico (*bio-* vida, *génico-* formado por), éste debe cumplir las propiedades descritas por Mann (2001) y, en ocasiones, la diagénesis no nos permite reconocerlas porque al disolver los cristales y precipitar unos nuevos estos no mantienen



**Figura 7.** Elementos biominerales en el coral actual *Dendrophyllia ramea*, Mar de Alborán (España). A) Vista externa de la colonia y detalle de un cáliz y de sus septos, observado con microscopio electrónico de barrido. B-C) El esqueleto está formado por paquetes de fibras. D-E) Detalle de la forma acicular de las fibras. F-H) Imágenes de microscopio de fuerza atómica, donde se observa que los nanocristales que forman las fibras están orientados en la misma dirección y que tienen una envuelta oscura alrededor de ellos, lo que indica que la composición es heterogénea (H).

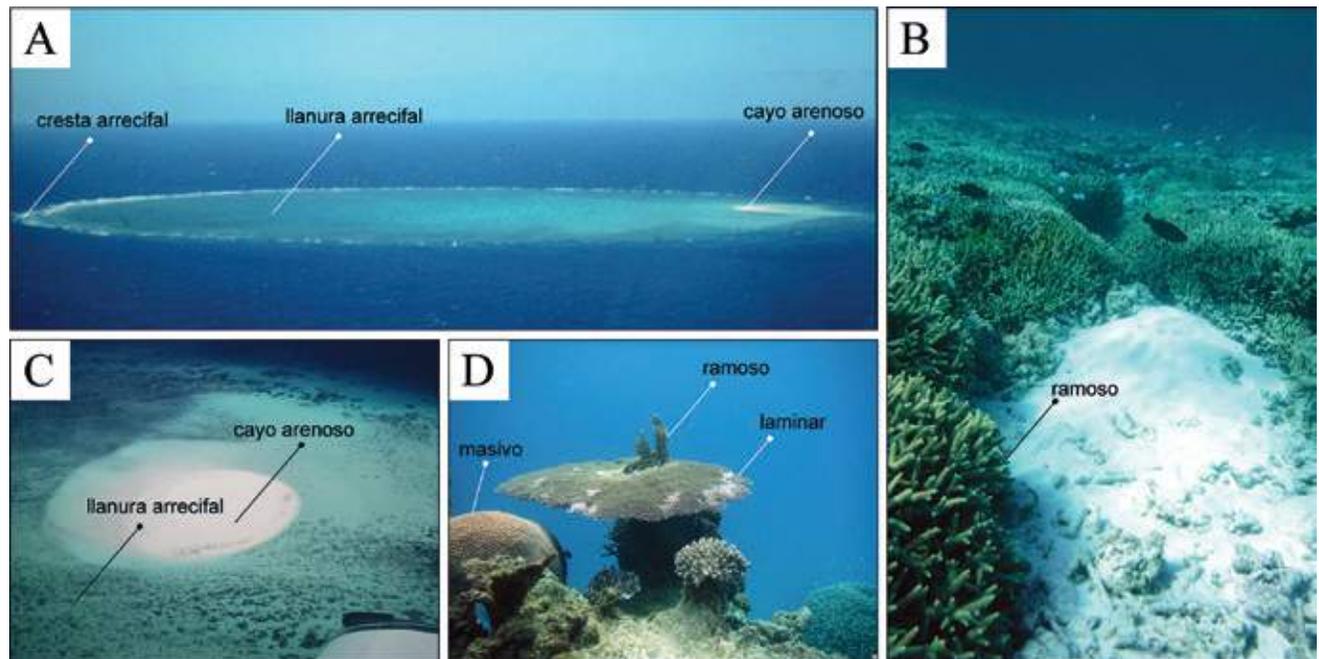
por ejemplo, las microestructuras o nanoestructuras originales ni su composición química original ni la forma original de los cristales.

Un ejemplo de ello es el caso de los corales escleractinios fósiles, que en su mayoría están alterados por la diagénesis. Durante la alteración, los cristales de aragonito son disueltos y posteriormente recrystalizados en calcita, lo que conlleva la pérdida de la micro y nanoestructura y de la composición química original.

### La importancia de los corales como bioconstructores

Como se ha visto anteriormente, los corales forman sus esqueletos con minerales y la aglomeración de estos esqueletos tras

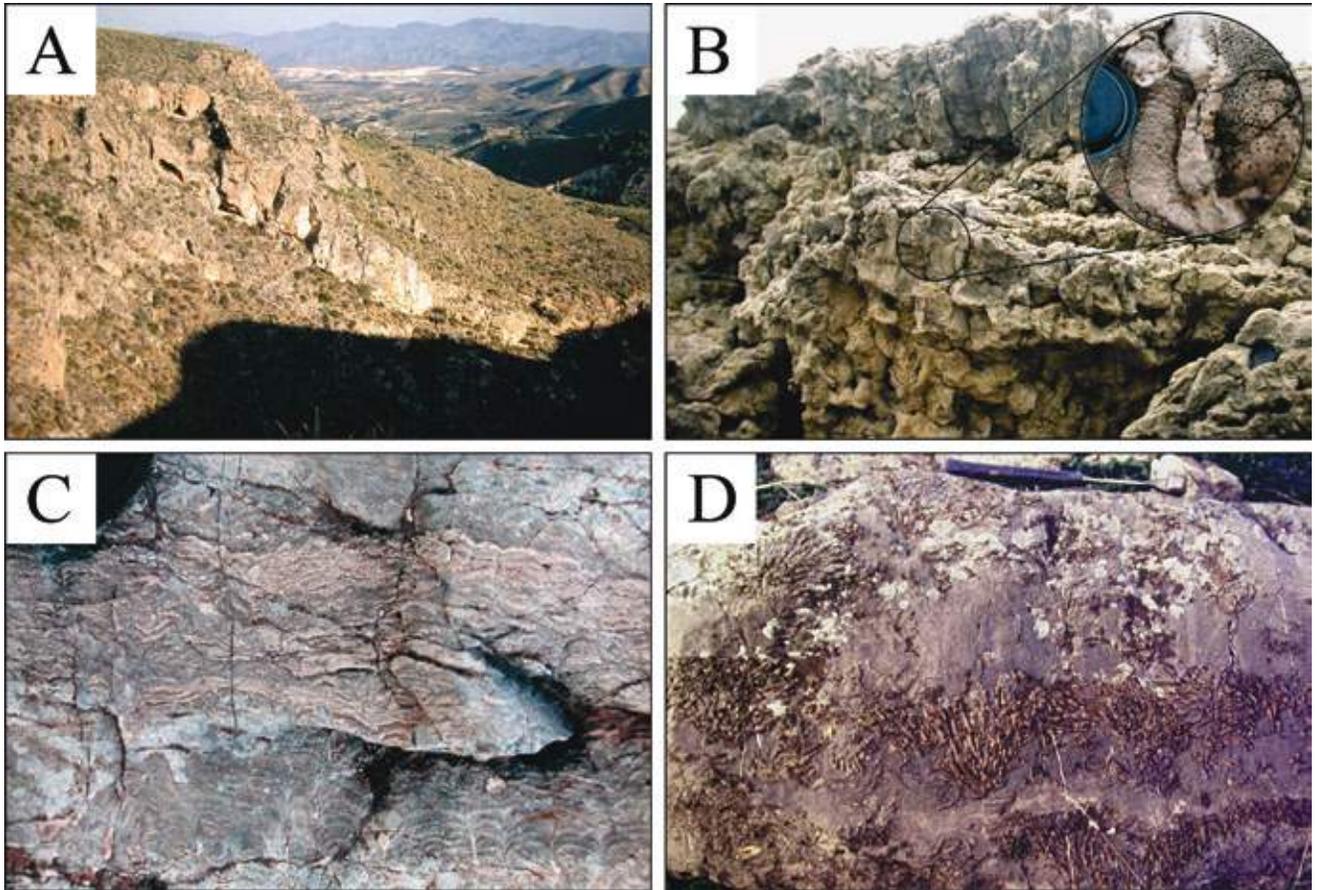
generaciones en el fondo marino, así como de otros organismos que construyen sus esqueletos y conchas de carbonato cálcico, produce edificios marinos que se conocen como arrecifes. Este proceso de construcción de edificios por parte de organismos se conoce como bioconstrucción. Los arrecifes son uno de los puntos de mayor diversidad de la vida en la Tierra y también lo fueron en el pasado. Los corales actuales y fósiles, tanto de la clase Rugosa, Tabulata como Escleractinia juegan, y han jugado, un papel importante en la formación de arrecifes a partir del desarrollo de colonias de coral de diversas formas (laminar, esférica, ramificada), junto con otros organismos como esponjas, bivalvos, crustáceos, braquiópodos, equinodermos (erizos y estrellas), anélidos (gusanos), briozoos, algas, bacterias calcáreas e incluso vertebrados (como peces), formando un sensible e intrincado sistema ecológico. Actualmente los arrecifes de coral se



concentran en mares someros de áreas tropicales, donde el agua es más cálida y la producción de nutrientes (alimento) es muy alta. Existen otros corales que viven en áreas templadas e incluso frías, y en aguas moderadas y profundas, pero estos no forman arrecifes.

Los arrecifes pueden presentar diferentes formas y características: parche arrecifal, arrecife en pináculo, en barrera, en orla y en

atolón (Fig. 8). Algunos elementos son esenciales en el desarrollo de los arrecifes (como la llanura arrecifal, la cresta arrecifal, el talud) y otros son accesorios (como el lagoón y la barra arrecifal). Pero todos ellos presentan diferentes corales y organismos asociados que habitan cada una de las partes. Por ejemplo, es común que en las zonas protegidas del arrecife, como en la llanura arrecifal, los corales que allí crecen sean más delicados (de formas ramosas, como *Acropora*, Fig. 8B), mientras que en la cresta arrecifal las colonias



**Figura 9.** A) A la izquierda el núcleo (cresta) arrecifal, a la derecha el talud arrecifal. Arrecife de Cariátiz, Almería (Mioceno). B) Corales masivos en la cresta arrecifal del arrecife de Cariátiz (Almería, Mioceno). C) Corales laminares incrustantes en un arrecife del Carbonífero (Reino Unido). D) Colonias de corales en posición de crecimiento (parte inferior y media) y removilizadas (parte superior), Santos de Maimona, Badajoz (Carbonífero).

son más masivas y soportan mejor el oleaje, como *Montastrea* (Fig. 8D). Los paleontólogos que trabajan con arrecifes fósiles consideran que estos han crecido en ambientes similares a los actuales (mares tropicales-cálidos) y presentan formas y desarrollos idénticos, ya que se pueden identificar los diferentes elementos que forman el arrecife tanto en fósiles como actuales (Fig. 9) y están asociados a diversas formas de crecimiento de los corales.

A lo largo del Fanerozoico (*fanero-* visible, *zoico-* vida) en diversos periodos geológicos de la Tierra las condiciones ambientales han favorecido el desarrollo de arrecifes, como durante el Silúrico, Devónico, Triásico, Jurásico, Cretácico y, en el Cenozoico, desde el Paleoceno al Mioceno. Actualmente el número de arrecifes es mucho menor que en esos periodos y esto se debe principalmente a que durante el Cuaternario la Tierra ha pasado por un periodo frío, con numerosas glaciaciones (avance de las masas glaciares por temperaturas globales muy frías). En nuestros días la Tierra se encuentra en un periodo interglacial (un periodo entre glaciaciones), con un clima algo más templado (menos frío) y sin el avance de las masas glaciares, pero no lo suficientemente cálido como para que aumenten las masas arrecifales. Esto también se debe a otros factores, como el aumento de la contaminación de los océanos, la producción de gases de efecto invernadero en la atmósfera y la consiguiente acidificación de los océanos.

### Importancia en estudios paleoclimáticos

Una de las características más importantes de los corales es que producen colonias muy grandes que pueden crecer durante cientos de años. Esto es debido a que la tasa de crecimiento de los corales tropicales puede rondar entre los 6 y 20 mm al año (de tal manera que una colonia de varios metros puede representar varios siglos de crecimiento). La esclerocronología, que es la ciencia que estudia las variaciones químicas y físicas de los esqueletos calcáreos de invertebrados y algas, determina cómo los corales registran periodos fríos y cálidos en la química de su esqueleto, por ejemplo. Empleando la química de los corales como una aproximación se

pueden realizar estudios del clima del pasado (paleoclimatología). En paleoclimatología no solo se emplean los corales como sistemas de aproximación al clima del pasado, también se emplean los anillos de los árboles, sondeos en el hielo, sedimentos, espeleotemas (estalagmitas) y los esqueletos de otros organismos como bivalvos o foraminíferos.

Para entender cómo los corales registran estos periodos cálidos y fríos, debemos recordar que la química de los esqueletos de coral no es totalmente pura ( $\text{CaCO}_3$ ). En ocasiones los corales incorporan más cantidad de ciertos elementos (como por ejemplo Mg o Sr) e isótopos (variedades de un elemento químico en las que su peso atómico es diferente porque tienen diferente número de neutrones). Por ejemplo, los isótopos ligeros se mueven más rápido en el agua cuando la temperatura de ésta es mayor (más cálida) y se incorporan fácilmente en la estructura de los minerales. Por el contrario, cuando la temperatura es más baja (fría) el isótopo ligero se mueve más lentamente y el isótopo pesado se incorpora en mayor proporción en la estructura de los minerales que forman los esqueletos. Un ejemplo son los isótopos del oxígeno. El oxígeno tiene tres isótopos ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ ) y todos ellos tienen el mismo número atómico (mismo número de protones y de electrones) pero diferente número de neutrones y por eso tienen un peso diferente. En los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) los isótopos del oxígeno que aparecen son el  $^{16}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$  y su relación es muy importante ( $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ). Cuando analizamos los esqueletos de coral y encontramos más proporción del isótopo ligero que del pesado, eso nos indica un periodo cálido, mientras que cuando hay más proporción del pesado que del ligero nos muestra un periodo más frío, y así podemos extrapolar la temperatura del agua de mar en ese momento.

Como los arrecifes tropicales cubren un área de 284.000 km<sup>2</sup> y registran eventos de cambios climáticos que se producen a escala anual e incluso semanal, se han convertido en una herramienta importante en el análisis de los climas del pasado. En la actualidad paleontólogos, geólogos, químicos, oceanógrafos, físicos y biólogos estudian el clima del pasado a través de corales fósiles y actuales, aunque nunca se han empleado corales fósiles del Paleozoico.

## Los corales paleozoicos y la discusión sobre la mineralogía de su esqueleto

Durante décadas, los paleontólogos y geólogos han empleado diversos fósiles del Paleozoico (Cámbrico - Pérmico) en los estudios paleoclimáticos, como conchas de braquiópodos formadas por calcita, elementos dentales de conodontos y escamas de peces formados por apatito. Pero salvo en ocasiones puntuales, apenas se han empleado esqueletos de corales paleozoicos (Rugosa o Tabulata). Esto es debido a la fuerte controversia que han mantenido ciertas escuelas de pensamiento sobre el mineral original que formó los corales del Paleozoico, ¿calcita o aragonito?

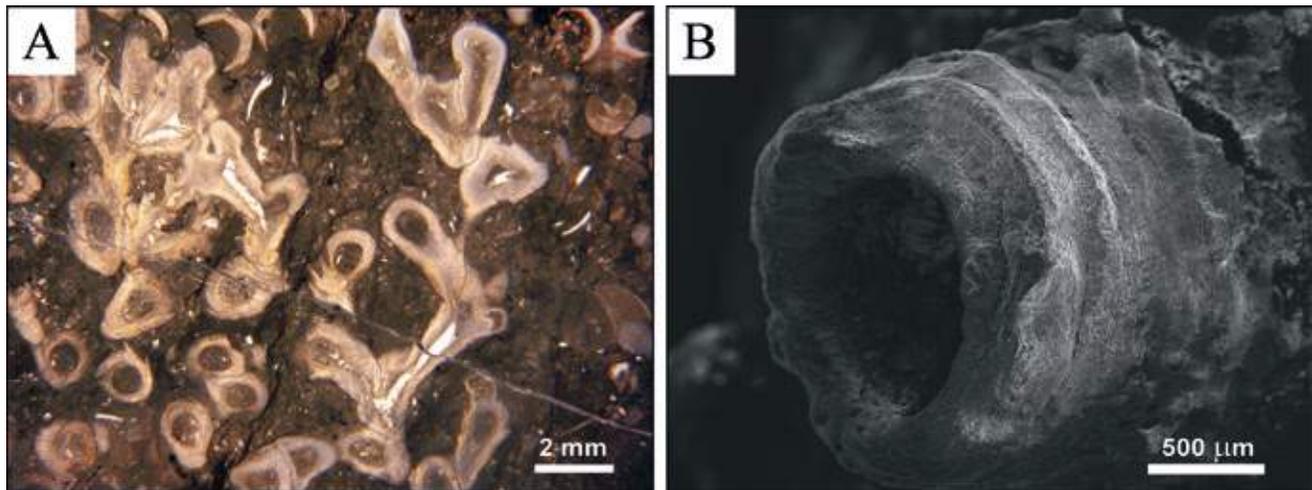
En el trabajo en paleontología es habitual comparar los fósiles con los organismos actuales para entender qué estructuras o morfologías son semejantes, análogas o diferentes. Es lo que se denomina anatomía comparada, o comparar sus modos de vida y relaciones ecológicas, aplicando el actualismo. Emplear la anatomía comparada en los cnidarios fósiles para comparar sus esqueletos con los actuales ha generado una terrible discusión y esto se debe a que no se tuvieron en cuenta ciertas consideraciones por parte de algunas escuelas, que relataremos a continuación. Primeramente se debe tener en cuenta que los corales paleozoicos se extinguieron en el Pérmico y que hasta 5 millones de años después, en el Triásico medio, no aparecen los primeros corales escleractinios con sus esqueletos formados por aragonito, generando una importante pregunta que aún está sin resolver ¿qué ocurrió con los corales mineralizados durante ese intervalo de tiempo? Existen innumerables tipos de cnidarios, tanto mineralizadores como no mineralizadores, pero no todos ellos mineralizan aragonito, siendo común que algunos corales precipiten sus esqueletos de calcita, como las espículas de algunos alcionarios (Octocorallia). Hay evidentes diferencias entre la simetría, número de tentáculos y ciertos aspectos de la formación de las estructuras esqueléticas, como la formación de septos, que difieren entre los corales paleozoicos y los escleractinios. Pero en lo que al esqueleto se refiere, la más evidente de todas está

relacionada con el tipo de cristales que generan. Los corales escleractinios solo generan un tipo de cristal, el acicular o fibroso de aragonito, mientras que se han identificado tres tipos de cristales en los esqueletos de corales paleozoicos (Struve, 1898): gránulos, fibras y lamelas de calcita. El hallazgo de estos tres tipos de cristales junto con la analogía que realizaron con corales escleractinios fue lo que generó la controversia.

De esta manera se establecen las tres escuelas de pensamiento:

- 1) Aquella que considera que las microestructuras de los corales paleozoicos son “biogénicas” y están formadas por calcita con bajo contenido en magnesio, aunque reconocen que las microestructuras están subordinadas a la alteración diagenética. Este grupo ha empleado la microestructura como carácter para identificar los corales y distinguir especies y géneros (Wang, 1950; Lafuste, 1983; Lafuste & Plusquellec, 1985; Rodríguez, 1989; Tourneur, 1989; Falces, 1997; Fernández-Martínez, 2002).
- 2) Aquella que establece que solo las fibras son originales, debido a su analogía con los corales escleractinios, y que posiblemente la mineralogía original de los corales paleozoicos fue en origen calcita magnesianas, que se altera más fácilmente que la calcita con bajo contenido en magnesio. Esto supondría que las microestructuras lamelar y granular fueron producidas por la diagénesis (Sorauf, 1971, 1978, 1983, 1996; Webb & Sorauf, 2002).
- 3) Aquella que establece que la mineralogía original era aragonito y que las microestructuras encontradas en corales paleozoicos son siempre un producto diagenético, independientemente de la forma de los cristales (Oekentorp, 1980, 1984; Wendt, 1990; Brühl, 1997).

Con el fin de establecer aquellos criterios que ayuden a reconocer estructuras esqueléticas biogénicas y diagenéticas en sus esqueletos surgió la necesidad de realizar un estudio de detalle de la estructura y composición de algunos corales paleozoicos bien preservados. Para ello empleamos colonias y fragmentos de



**Figura 10.** A) Imagen de lámina delgada donde se observa el crecimiento arborescente de *Multithecopora hontoriense*. B) Imagen de microscopio electrónico de barrido donde se observa la sección cilíndrica y las estrías de crecimiento del coral.

colonias del coral tabulado *Multithecopora hontoriense* (Rodríguez & Ramírez, 1987). Este coral fue escogido entre otros muchos debido a que el profesor Sergio Rodríguez ya había trabajado con él clasificando la especie en 1987. Durante su trabajo taxonómico constató, después de haber visto miles de corales al microscopio, que especialmente las colonias de ese coral parecían preservar mucho mejor la microestructura.

### ***Multithecopora hontoriense* y las rocas donde se encuentra**

*Multithecopora* es un coral que forma colonias fasciculadas, creciendo de manera reptante en su origen, y que posteriormente desarrolla colonias arbustivas ramificadas (Fig. 10). Los coralitos son cilíndricos, con paredes muy gruesas y una cavidad interior (lumen) relativamente estrecha. Muy raramente tienen estructuras que conectan coralitos, como tubos conectantes, poros o estolones. Presentan espinas septales con poco desarrollo hacia el interior y tábulas finas, principalmente horizontales o curvadas. *Multithecopora* habitó los mares paleozoicos desde el

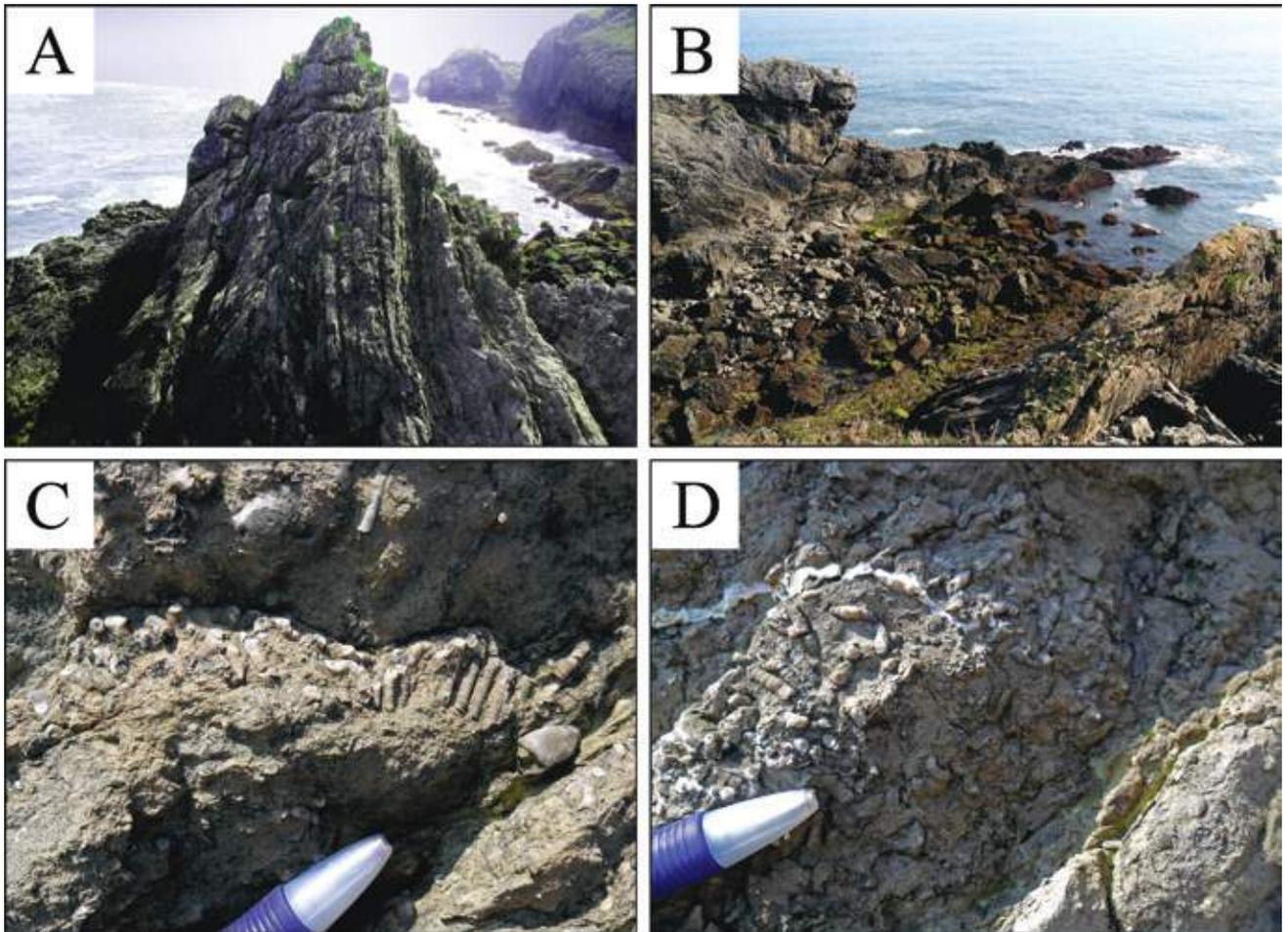
Silúrico Inferior al Pérmico y es muy común en bioconstrucciones. La especie que hemos estudiado, *Multithecopora hontoriense*, vivió en el Carbonífero Superior (Pensilvánico) en un intervalo del Moscoviense (309-311 millones de años), que es un piso del Carbonífero.

Para este estudio se visitaron los afloramientos donde se han encontrado fósiles de *Multithecopora hontoriense*, como son las rocas que forman los acantilados de la Playa de la Huelga en la bahía de Hontoria (Asturias). Estos acantilados que recorren la bahía desde la playa de San Antolín hasta el pueblo de Hontoria y están formados por más de 1.500 metros de rocas calcáreas y siliciclásticas del Carbonífero, muy fosilíferas y que tienen una edad entre el Tournaisiense y el Moscoviense superior. Pertenecen a la formación geológica llamada Calizas del Cuera (Fig. 11).

Las rocas donde aparece *Multithecopora* son calizas arrecifales, intercaladas con margas muy litificadas, que formaron parte de montículos arrecifales. Junto con *Multithecopora* también aparecen otros corales rugosos y tabulados, así como briozoos,

algas, braquiópodos, ostrácodos y moluscos. Estos afloramientos han sido muy estudiados durante décadas por sedimentólogos y paleontólogos de las universidades de Madrid, Oviedo y Salamanca. Pero también han sido objeto de estudios paleoclimatológicos llevados a cabo por científicos estadounidenses que determinaron la temperatura del agua de mar del Carbonífero a partir de conchas de braquiópodos por su excepcional preservación.

Durante nuestro estudio se muestrearon las rocas con *Multithecopora* ayudados por el martillo de geólogo y un cincel, rescatando entre 5 y 10 colonias (y fragmentos de colonia). Al observar las rocas en el campo nos dimos cuenta de que estas colonias se encontraban en su mayoría en la posición de vida del organismo, no estaban tumbadas ni rotadas, y se encontraban junto a conchas de braquiópodos (Fig. 11).



**Figura 11.** A-B) Acantilados de la playa de La Huelga, donde se observan las capas de calizas y margas dispuestas casi verticalmente. C-D) Detalles de las colonias de *Multithecopora hontoriense* en las rocas calizas junto con braquiópodos y otros bioclastos.

## Observando más allá de lo que el ojo ve

Estudiar la estructura y composición química de esqueletos fósiles no es una tarea fácil. Lo primero que uno se plantea es ¿cómo puedo observar lo que el ojo no ve? Para ello, los científicos empleamos microscopios y otros aparatos científicos de alta precisión y complejidad que ayudan en esta tarea. Pero para introducir nuestros fósiles en estos complejos aparatos primero debemos preparar nuestros fósiles adecuadamente. Dependiendo de la técnica que empleemos, nuestros fósiles deben tener unos requerimientos específicos.

### Observando la estructura del esqueleto

En primer lugar se realizaron láminas delgadas para poder observar los fósiles con el microscopio de luz transmitida y distinguir fácilmente sus caracteres internos.

Por otra parte, algunos corales se cortaron en finas rodajas de roca o se embutieron en resina sintética y se cortaron en finas rodajas. Pulimos la superficie del coral que queríamos estudiar hasta alcanzar un brillo óptimo, ya que estas técnicas requieren de superficies casi perfectas. Tras esto se realizó el estudio estructural de los esqueletos a escala micrométrica y nanométrica (microestructura y nanoestructura). Para ello se empleó el microscopio electrónico de barrido, el microscopio de fuerza atómica y el estudio con difracción de electrones retrodispersados (*electron backscatter-diffraction*, EBSD). Así mismo se realizaron láminas ultrafinas para observar la microestructura con el microscopio de luz transmitida.

Varias técnicas nos aportan una información similar, son complementarias, como por ejemplo el microscopio de luz transmitida nos permite observar la microestructura, al igual que microscopio electrónico de barrido; la diferencia es que este último nos permite tener mayor resolución (observar cosas aún más pequeñas, de pocas micras de tamaño). Si queremos estudiar la nanoestructura debemos



Figura 12. Ismael Coronado usando el microscopio de fuerza atómica (AFM).

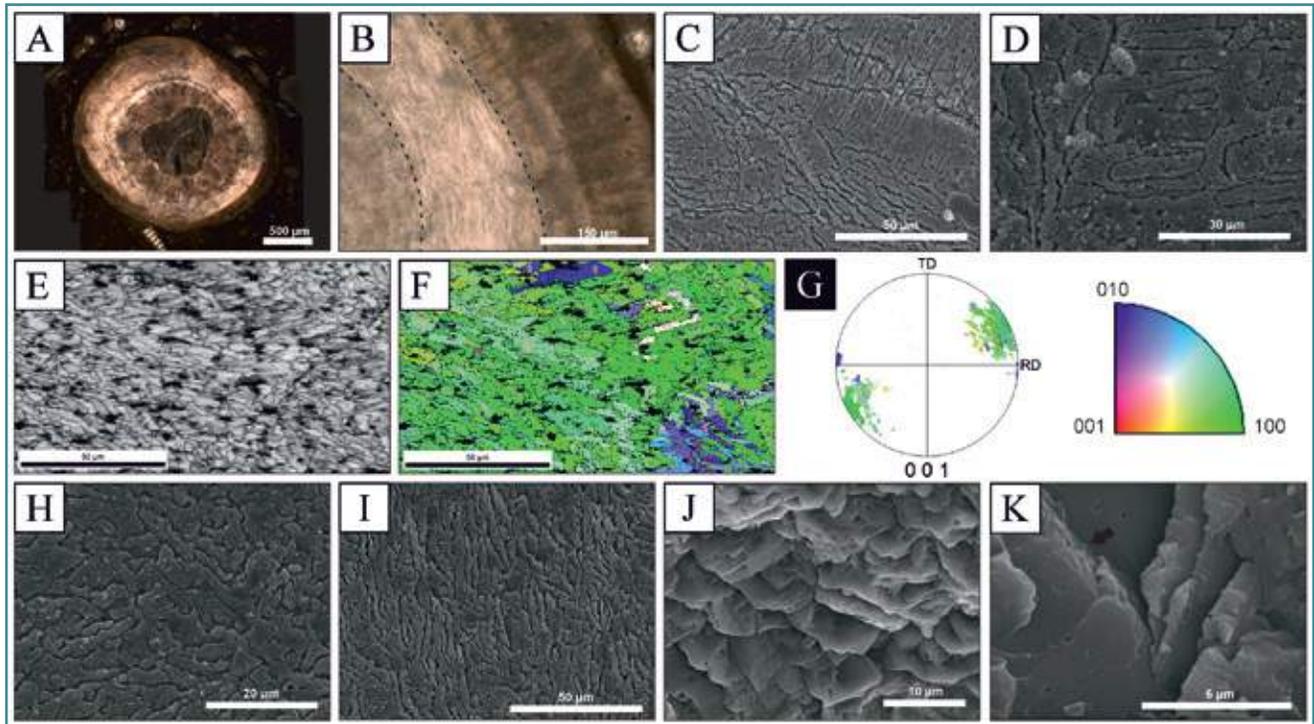
emplear microscopios con una resolución espacial aún mayor, casi atómica, como el microscopio de fuerza atómica (Fig. 12). Este microscopio no es un microscopio clásico donde se observa con métodos ópticos (lentes) el interior o la superficie de una muestra. Este microscopio escanea la muestra muy lentamente, como un escáner, con una punta de pocos nanómetros. Lo que hace es escanear el relieve de la muestra y reconstruirla como si se tratara de un mapa a partir de un *software* específico. También nos permite ver si la composición de la muestra es homogénea (presenta la misma composición) o heterogénea (diferente composición).

A su vez, la difracción de electrones retrodispersados (EBSD), que es una técnica cristalográfica, nos permite observar la microestructura de la muestra pero su principal utilidad reside en la capacidad de analizar la orientación de los cristales que forman la muestra. Para ello mide la orientación de los cristales entre sí. La orientación de los cristales, como comentamos anteriormente, se puede analizar respecto a sus ejes de referencia (*a*, *b*, y *c*). Representando planos cristalográficos que contienen esos ejes de referencia, como por ejemplo el plano (001), el cual contiene el eje *c*, observaremos si los cristales muestran una orientación preferente o si están desordenados. Este índice es un índice de

Miller y nos ayuda a catalogar los diferentes planos cristalográficos. Representar el plano que contiene el eje  $c$  es muy útil, porque los cristales producidos y controlados por organismos presentan orientaciones preferentes (la mayoría están orientados en la misma dirección), mientras que los producidos por reacciones naturales en la naturaleza, pero de manera inorgánica, no presentan estas orientaciones tan marcadas (están desordenados).

### Analizando la composición química del esqueleto

Utilizando las láminas delgadas se estudió la composición química a partir de la microsonda de electrones y la luminiscencia emitida por los fósiles bajo una sonda de catodoluminiscencia. La microsonda de electrones es una potente técnica analítica que nos permite medir de manera puntual numerosos elementos químicos.



**Figura 13.** Características de la microestructura de *Multithecopora hontoriense*. A) Imagen de microscopio de luz transmitida donde se observan las diferentes bandas alternantes de cristales que forman la microestructura del coral. B) Detalle de las bandas separadas por una línea discontinua. C-D) Detalle de las lamelas y las fibras de la banda fibrosa externa (entre las fibras y las lamelas hay cristales curvos con forma de U). E-G) Mapas y figura de polos donde se observan las orientaciones cristalográficas. En el mapa de intensidad de difracción (E) se distinguen perfectamente las lamelas y las fibras que forman la microestructura; por la coloración homogénea del mapa de orientaciones de ambos elementos (F) se observa que tienen una orientación cristalográfica similar, centrada en la dirección del eje  $c$ . La figura de polos que representa con puntos todos los cristales (y en este caso representa el plano (001) que es perpendicular al eje  $c$ ) muestra que todos los cristales están orientados en la misma dirección. Se observa la leyenda de colores en formato RGB que corresponde con cada uno de los planos cristalográficos. H-I) Imágenes de detalle de microscopio electrónico de las diferentes morfologías de lamelas que se encuentran en *Multithecopora hontoriense*. J-K) Imágenes de detalle de estas lamelas, donde se observa su aspecto ondulado (J) y que están formados por intralaminación (K).

Nosotros medimos  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{S}^{6+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ . Realizamos medidas en línea a lo largo de los corales para ver su composición desde dentro hacia afuera del coral. Esta técnica cuantifica la composición de estos elementos en la estructura del  $\text{CaCO}_3$  (en ppm, partes por millón).

Por otra parte, la catodoluminiscencia nos revela la luminiscencia que produce la muestra al ser sometida a un chorro de electrones. Esta luminiscencia se genera por la excitación de los electrones de la superficie de la muestra y por la emisión de los fotones derivados de esta excitación.

La luminiscencia producida por los carbonatos cálcicos marinos es un buen indicador de alteración diagenética debido a procesos de recristalización por enterramiento (Rosales *et al.*, 2004; Boggs & Krinsley, 2006), principalmente en calcita. Esto se debe a que si el coral se disuelve durante el enterramiento y precipita de nuevo calcita (recristaliza), durante esta recristalización puede incorporar nuevos iones en la estructura, como por ejemplo Mn y Fe. El Mn es un ion luminiscente y en catodoluminiscencia produce brillos muy intensos, sobre todo en la calcita. De esta manera, y a modo de síntesis, se considera que las calcitas no luminiscentes no están afectadas por diagénesis sino que son originales y aquellas que son luminiscentes están afectadas por la diagénesis. La combinación de la catodoluminiscencia y de la microsonda de electrones nos permite ver qué áreas pueden estar recristalizadas ya que mostrarán luminiscencia y una composición química diferente al resto del coral.

### Microestructura de *Multithecopora*

Los datos proporcionados por los diferentes microscopios nos revelan que la microestructura de *Multithecopora hontoriense* está compuesta por bandas alternantes de cristales. Estas bandas están formadas por miles de cristales con dos formas muy concretas: lamelas y fibras, siendo más abundantes las lamelas. Hay tres bandas fibrosas: una en los bordes externo e interno del coral y otra en la parte media (Fig. 13).

Las lamelas son cristales planos, con forma de escudo, que en sección recuerdan a un copo de cereal de desayuno. Estos cristales están ligeramente curvados siempre hacia la parte interna. Sus dimensiones varían entre 5-35  $\mu\text{m}$  de longitud y 2-5  $\mu\text{m}$  de anchura. Cuando observamos estos cristales sin seccionar, podemos ver que son ligeramente ondulados y que internamente están formados por pequeñas láminas de menos de 1  $\mu\text{m}$  de tamaño (Fig. 13).

Por otra parte las fibras son cristales alargados que ocasionalmente forman agujas. Sus dimensiones varían entre 15-33  $\mu\text{m}$  de longitud y 2-5  $\mu\text{m}$  de anchura. Una característica muy interesante en estos esqueletos es que las bandas de cristales no están aisladas sino que los cristales cambian de forma progresivamente entre las lamelas y las fibras (Fig. 13).

Los datos cristalográficos confirman que la mineralogía del coral es totalmente calcita, sin trazas de aragonito u otro carbonato. Los mapas de difracción nos muestran cristales bien definidos, tanto en las lamelas como en las fibras y nos indican que cada cristal se comporta como una estructura individual (Fig. 13). Una característica curiosa es que el eje *c*, eje de crecimiento del cristal, es perpendicular en las lamelas y paralelo en las fibras, lo cual muestra que este esqueleto tiene una orientación muy marcada hacia el interior del coral.

### Nanoestructura

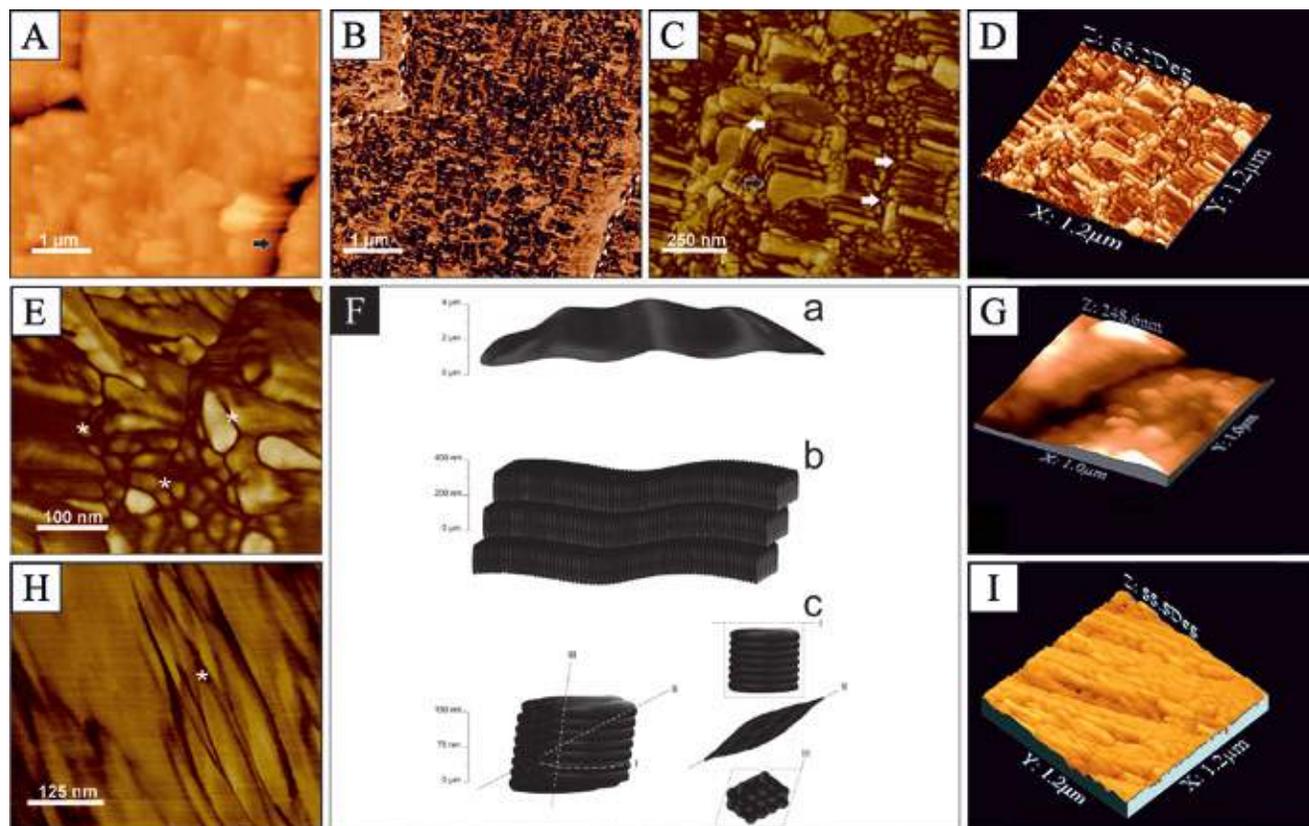
Las imágenes del microscopio de fuerza atómica nos revelan que los fósiles estudiados tienen una nanoestructura muy compleja. Se observa que está formada por nanocristales con forma de barra, agregados entre sí y orientados en la misma dirección. En ocasiones se observa que estos cristales muestran una distribución ondulada lateralmente y que entre ellos aparecen cristales granulares. Cuando observamos estas estructuras con más aumentos, vemos que no solo aparecen cristales con forma de barra, sino que también aparecen con forma de semilla. Esto es debido a que los microcristales (por ejemplo las lamelas) son ondulados y estas variaciones en

la morfología no son más que secciones de estos paquetes de nanocristales con forma de barra (Fig. 14).

El tamaño de los nanocristales también es variado y depende mucho de la sección de estos paquetes de nanocristales. Los cristales con forma de barra tienen una longitud entre 117 y 254 nm y una anchura entre 23 y 69 nm. Los cristales con forma de semilla tienen una longitud

entre 72 y 352 nm y una anchura entre 21 y 81 nm y, por último, los nanocristales granulares tienen unas dimensiones entre 19 y 50 nm.

Una característica curiosa es que en las imágenes de fase, que nos muestran si la composición química es homogénea, podemos observar que los bordes de los cristales tienen una envoltura oscura indicándonos que la composición no es homogénea.

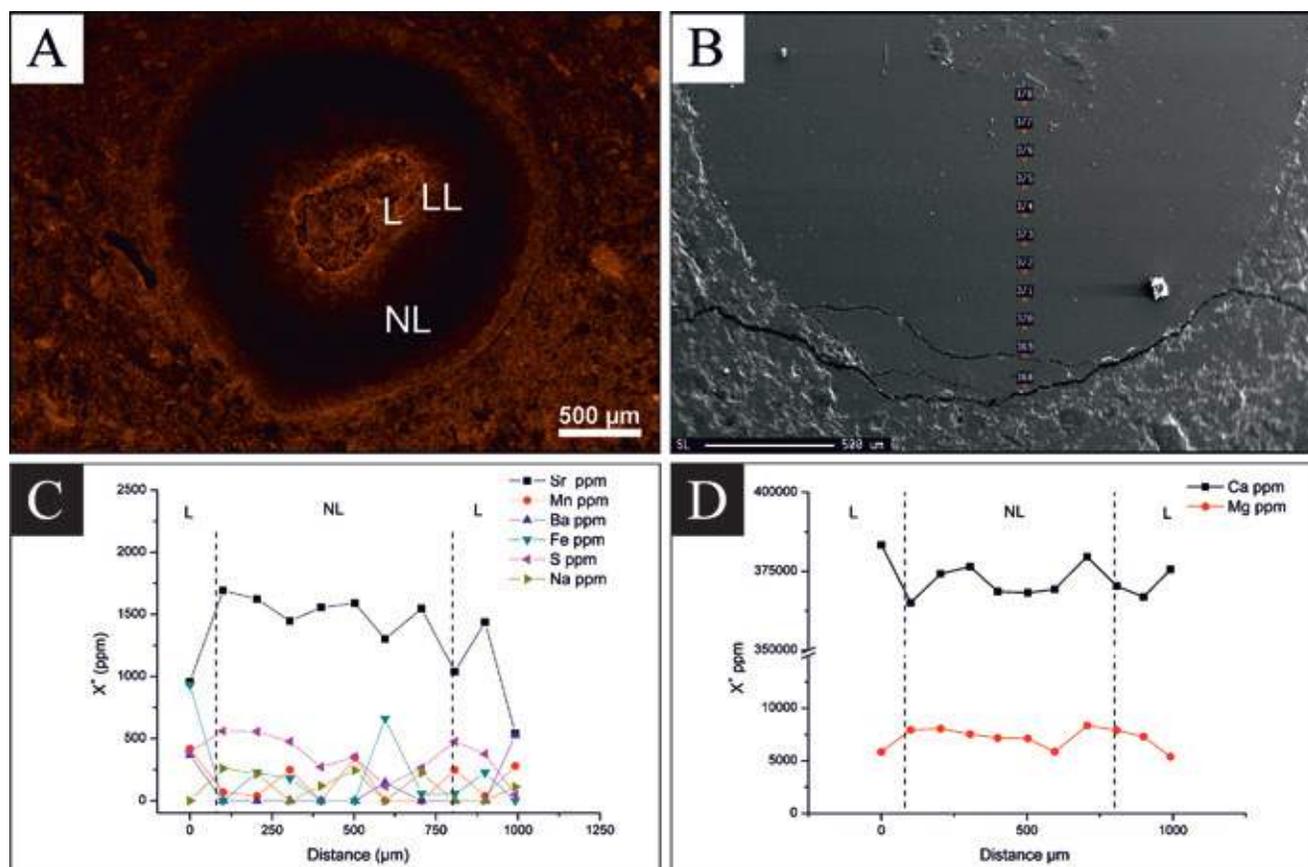


**Figura 14.** Imágenes de microscopio de fuerza atómica (AFM). En este microscopio se pueden distinguir tres tipos de imagen: de topografía de la muestra, de fase (nos muestra diferencias composicionales) y reconstrucciones tridimensionales de la superficie. A-B) Imagen topográfica (A) y de fase (B) de una lamela. Las flechas negras y las líneas discontinuas blancas marcan el contacto con otras lamelas. En la imagen de fase se observa la alineación de los nanocristales. C) Imagen de fase de detalle donde se observa la disposición ondulada de los nanocristales y la intralaminación. D) Detalle de la envoltura oscura que rodea los nanocristales y que nos indica que hay una composición heterogénea. E) Modelo tridimensional de una lamela, formada por el apilamiento de nanocristales orientados (a) formando nanoláminas onduladas (b); los diferentes cortes (c) de estos nanocristales apilados tienen diferentes secciones y formas. F) Reconstrucción tridimensional que nos muestra que todos los nanocristales están orientados en la misma dirección.

## Preservación de los elementos micro- y nanoestructurales

Como avanzábamos, los datos químicos derivados del uso de la microsonda de electrones y de la catodoluminiscencia nos ayudan a entender cómo está preservado el esqueleto del coral ¿sus cristales son biogénicos o diagenéticos?

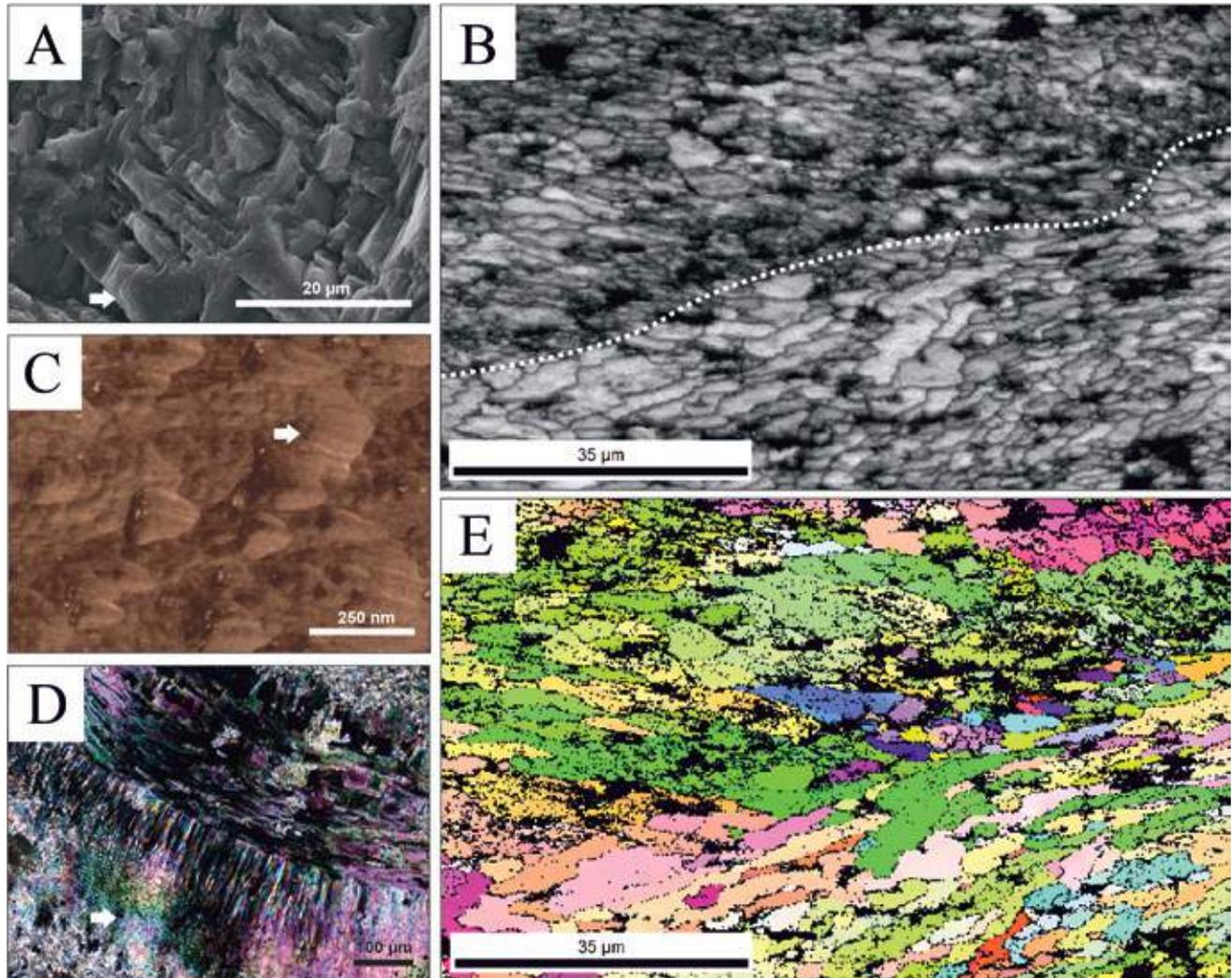
Las muestras bajo catodoluminiscencia siempre muestran unos patrones muy similares: el borde externo e interno del coral son luminiscentes, mientras que la parte interna no es luminiscente y solo en pocas ocasiones es ligeramente luminiscente, cuando conecta con las partes externas e internas. Estas áreas luminiscentes (Fig. 15) corresponden a las bandas fibrosas externa e interna. Curiosamente, los datos químicos indican que las bandas luminiscentes tienen una composición química ligeramente diferente. Por ejemplo el Ca, Mg y Sr son muy constantes



**Figura 15.** A) Imagen de catodoluminiscencia donde se observa una sección de *Multithecopora hontoriense*. Hay tres tipos de áreas luminiscentes: NL, No luminiscente; L, Luminiscente; LL, Ligeramente luminiscente. Las zonas más luminiscentes se concentran en el borde externo e interno, mientras que la no luminiscente lo hace en la zona central del esqueleto. B) Imagen de microscopio electrónico de barrido donde se muestran los diferentes puntos de análisis representados en C-D). C-D) La composición química en las zonas luminiscentes cambia a valores anómalos. Se observa que en estas zonas, cuando aumenta un elemento como el Fe o el Mn, desciende el S o el Sr. Lo mismo ocurre con el Mg y el Ca en (D).

en las áreas no luminiscentes y, sin embargo, tienen comportamientos diferentes en las bandas externas e internas mientras que, por el contrario, el Fe y Mn se concentran en estas bandas en mayor cantidad (Fig. 15).

Como comentábamos anteriormente, estos elementos son indicadores de modificaciones diagenéticas y no son los únicos indicios de alteración que hemos encontrado. En estas bandas, observadas con los microscopios



**Figura 16.** Diferentes grados de alteración diagenética. A) Imagen de microscopio electrónico de barrido donde se muestra que las fibras del borde externo están mal preservadas. B,E) Imágenes cristalográficas donde se observa una gran concentración de áreas disueltas en la banda fibrosa externa. C) Imagen de microscopio de fuerza atómica donde no se observan las envueltas oscuras alrededor de los cristales y no se distingue bien la topografía. D) Imagen de microscopio de luz transmitida donde se observa cómo las fibras reducen el tamaño de cristal y se vuelven gránulos en la zona externa del coral.

de alta resolución, se puede ver que la estructura de los cristales es más difusa, se pierden las formas (no se observan bien a nanoescala) y no aparecen los bordes oscuros tan característicos. Los datos cristalográficos nos muestran que en esas zonas hay áreas con indicios de disolución, lo que nos indica que tanto el borde externo como interno de los corales sufrió una disolución y recristalización por diagénesis (Fig. 16).

Pero, por suerte, la mayor parte del coral se encuentra bien preservada y, si repasamos las principales características que debe tener un esqueleto producido por un organismo, que propuso el profesor Steve Mann (2001), confirmamos que estos fósiles aún preservan sus estructuras biogénicas después de más de 300 millones de años enterrados en las rocas.

Un esqueleto debe tener:

- Tamaño uniforme de los cristales que lo forman: cristales bien definidos y con composición química similar, como se observa por los datos aportados.
- Presentar un alto grado de organización espacial de los cristales que lo forman: estos esqueletos están formados por bandas de microcristales y agregados nanocristalinos.
- Cristales con morfologías complejas: las lamelas y los nanocristales con forma de barra son cristales curvos.
- Textura y agregación de los cristales controlada: presenta una microestructura y una nanoestructura muy ordenada.
- Cristales con orientación cristalográfica controlada: como revelan los datos de difracción de electrones retrodispersados, el eje *c* de todos los cristales apunta hacia el interior del coral, por lo que no puede haberse producido durante la diagénesis.
- Están organizados en estructuras jerárquicas: Los nanocristales (que serían los ladrillos que componen el esqueleto) forman microcristales y estos a su vez forman bandas que componen el esqueleto.

Los datos presentados demuestran que existen similitudes entre la formación del esqueleto de los corales paleozoicos y la del de los escleractinios, como veíamos en el ejemplo anterior de *Dendrophyllia ramea*, pero también muchas diferencias.

## Implicaciones ambientales y evolutivas

Aquí termina nuestro breve paseo introductorio sobre cómo se forma un esqueleto, que nos ha llevado a comprender parte del funcionamiento de nuestro planeta, de la historia de la vida y de los avances en el conocimiento de la diversidad animal. Nos ha transportado a bucear entre corales y arrecifes y a conocer su diversidad, su paleobiología y la importancia de los corales como herramientas para entender nuestro pasado.

Estos datos sobre estructuras biogénicas de corales son solo el principio de futuros estudios que necesitan aún de mucha más investigación. Pero, evidentemente, como se mostraba a lo largo del texto, encontrar estructuras biogénicas preservadas en corales paleozoicos abre un sinfín de implicaciones en investigación: por ejemplo, permitirá usar los corales del Paleozoico en estudios paleoclimáticos y así comprender las variaciones del clima del pasado, la temperatura, la salinidad y el pH del agua del mar, o incluso identificar contaminantes naturales, como los derivados de erupciones volcánicas. Pero también este avance nos coloca en una posición única para entender qué relación existe entre los cnidarios actuales y los paleozoicos, estudiar otros cnidarios fósiles esqueléticos y ver sus relaciones a la hora de generar su esqueleto (biomineralizar). Por último, para comprender si los diferentes minerales que se encuentran en los cnidarios esqueléticos (calcita o aragonito) tienen una relación con la química global o bien son derivados de su código genético.

Desde aquí deseamos que hayan disfrutado con este paseo y ahora miren con otros ojos el mundo de los cnidarios.

- Bashkin, V.N., Howarth, R.W. (2002). *Modern biogeochemistry*, Dordrecht : Kluwer.
- Boggs, J.S., Krinsley, D. (2006). *Application of Cathodoluminescence Imaging to the Study of Sedimentary Rocks*, Cambridge University Press.
- Brühl, D.O.K. (1997). Secondary microstructures in tabulate corals of the genus *Alveolites* Lamarck, 1801 from the Middle Devonian of the Dollendorf Syncline (Eifel Hills/Germany). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, 92, 1-4.
- Brusca, R.C., Brusca, G.J. (2003). *Invertebrates*, Sinauer Ass., Sunderland, Massachusetts.
- Coronado, I., Pérez-Huerta, A., Rodríguez, S. (2013). Primary biogenic skeletal structures in *Multithecopora* (Tabulata, Pennsylvanian). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 286-299.
- Cuif, J.P., Dauphin, Y., Sorauf, J.E. (2011). *Biomaterials and fossils through time*, Cambridge University Press, Cambridge; New York.
- Esteban-Delgado, F.J., Harper, E.M., Checa, A.G., Rodríguez-Navarro, A.B. (2008). Origin and expansion of foliated microstructure in pteriomorph bivalves. *The Biological bulletin*, 214, 153-165.
- Falces, S. (1997). Borings, embeddings and pathologies against microstructure. New evidences on the nature of the microstructural elements in rugose corals. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Geologia)*, 92, 96-116.
- Fernández-Martínez, E.M. (2002). Revisión de *Favosites argentina* Thomas, 1905, especie tipo de *Argentinella* nov. gen., coral tabulado del Devónico Inferior de Argentina. *Revista Española de Paleontología*, 17, 101-116.
- Lafuste, J. (1983). Disparité microstructurale entre *Calceola* Lamarck et *Goniophyllum* Dybowski (Tetracoralla, Devonien et Silurien). *Comptes Rendus des Seances de l'Academie des Sciences, Serie 2: Mécanique Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, 296, 1749-1752.
- Lafuste, J., Plusquellec, Y. (1985). Attribution de "*Michelinia*" *compressa* Michelin, 1847 au genre *Yavorskia* Fomitchev (Tabule, Tournaisien). *Geobios*, 18, 381-387.
- Lowenstam, H., Weiner, S. (1989). *On biomineralization*, Oxford University Press, New York.
- Mann, S. (2001). *Biomaterialization: Principles and concepts in bioinorganic materials chemistry*, Oxford University Press, Oxford.
- Oekentorp, K. (1980). Aragonit und Diagenese bei jungpaläozischen Korallen. *Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie*, 52, 193-209.
- Oekentorp, K. (1984). Aragonite and diagenesis in Permian corals. *Palaeontographica Americana*, 54, 282-292.
- Rodríguez, S., Ramírez, C. (1987). Los siringopóridos de la Sección de la Playa de la Huelga (Carbonífero, Asturias, NW de España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Geologia)*, 83, 57-82.

- Rosales, I., Quesada, S., Robles, S. (2004). Paleotemperature variations of Early Jurassic seawater recorded in geochemical trends of belemnites from the Basque–Cantabrian basin, northern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 203, 253-275.
- Sorauf, J.E. (1971). Microstructure in the exoskeleton of some Rugosa (Coelenterata). *Journal of Paleontology*, 45, 23-31.
- Sorauf, J.E. (1978). Original structure and composition of Permian rugose and Triassic scleractinian corals. *Palaeontology*, 21, 321-339.
- Sorauf, J.E. (1980). Biomineralization, structure and diagenesis of the Coelenterate skeleton. *Acta Palaeontologica Polonica*, 25, 327-348.
- Sorauf, J.E. (1983). Primary biogenic structures and diagenetic history of *Timorphyllumwanneri* (Rugosa), Permian, Timor, Indonesia. *Mem. Assoc. Australas. Palaeontols.*, 1, 275-288.
- Sorauf, J.E. (1996). Biomineralization models and skeletal structure of Phanerozoic corals. In: *The Paleontological Society Papers* (ed Jr. GDS). The Paleontological Society Papers, Pittsburgh., pp. 159-185.
- Stolarski, J. (2000). Origin and phylogeny of Guyniidae (Scleractinia) in the light of microstructural data. *Lethaia*, 33, 13-38.
- Struve, A. (1898). Ein Beitrag zur Kenntnis des festen Gerüsts der Steinkorallen. *Verb. Russ. Kays. Min. Ges.*, 2, 43-116.
- Tourneur, F., Lafuste, J., Plusquellec, Y. (1989). Structure et microstructure de *Micheliniarectotabulata* VASSILJUK 1960 (Tabulata, Serpukhovien du Bassin de Donetz, URSS). *Bulletin de le Société Belge de Géologie*, 98, 443-450.
- Wang, H.C. (1950). A revision of the zoantharia rugosa in the light of their minute skeletal structures. *Philosophical Transactions B*, 234, 175-246.
- Webb, G.E., Sorauf, J.E. (2002). Zigzag microstructure in rugose corals: A possible indicator of relative seawater Mg/Ca ratios. *Geology*, 30, 415-418.
- Wendt, J. (1990). The first aragonitic rugose coral. *Journal of Paleontology*, 64, 335-340.

**Acicular:** Estructura de los cristales que presentan fibras delgadas como agujas.

**Biomíneral:** Mineral generado por un organismo, que puede formarse de manera inducida (fortuita) por el metabolismo o de manera controlada por un órgano o célula especializada.

**Biomíneralización:** Proceso por el cual los organismos forman biominerales, los cuales están constituidos por dos compuestos, uno mineral y otro orgánico, que se encuentran entrelazados.

**Calcioblastos:** Células del tejido epitelial (ectodermo) de los cnidarios que se encargan de bombear moléculas de  $\text{CaCO}_3$  a las zonas de precipitación.

**Cementación:** Proceso mediante el cual los poros de un sedimento, fósil o roca sedimentaria se rellenan por minerales cementantes durante la diagénesis. En el caso de un sedimento, la cementación es uno de los procesos que conduce a la litificación y, por tanto, a la formación de las rocas.

**Cianobacterias:** Grupo de bacterias que poseen clorofila y realizan la fotosíntesis. En presencia de luz producen oxígeno.

**Colágeno:** Proteína que forma fibras (escleroproteína); se encuentra en muchos animales, principalmente en vertebrados, y es un componente abundante de la piel y de los huesos.

**Conodontos:** Son una clase de cordados marinos extinta (solo tiene representantes fósiles) que se conoce por pequeñas piezas dentales fosfáticas. Los conodontos son comunes en rocas desde el Cámbrico al Triásico y pertenecen a la estructura bucal de organismos nadadores pisciformes (con forma de pez).

**Diagénesis:** (*dia-* cambio, *génesis-* origen). Cambios físicos y químicos que tienen lugar en los sedimentos y en las rocas, incluyendo a los restos esqueléticos o fósiles que contienen, desde su formación hasta que alcanzan presiones y temperaturas propias del metamorfismo.

**Diagenético:** Relativo a la diagénesis.

**Dolomía:** Roca sedimentaria que contiene entre el 50% y el 90% de dolomita. Se forma durante la diagénesis de calizas, mediante el reemplazamiento de calcita o de aragonito por dolomita, en aguas ricas en magnesio.

**Dolomita:** Mineral compuesto por carbonato cálcico y magnésico:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

**Esclerito:** Elemento formado por carbonato cálcico con morfología similar a una espícula, principalmente fusiforme, que puede presentar suturas, surcos o protuberancias. Es común en cnidarios de cuerpo blando y en otros organismos como artrópodos, a cuyo esqueleto orgánico proporciona rigidez.

**Esclerocronología:** Estudio de las variaciones químicas y físicas de los esqueletos de invertebrados y algas calcáreas.

**Esclerodermis:** Son paquetes de fibras de aragonito con forma de abanico formados durante la precipitación de los esqueletos de los escleractinios.

**Espeleotema:** Mineral que ha precipitado en una cueva. Los minerales más frecuentes son el aragonito y la calcita y se reconocen por sus diferentes morfologías: las estalactitas crecen desde el techo de la cueva de forma gravitatoria y las estalagmitas crecen desde el suelo de la cueva por goteo procedente del techo o de una estalagmita.

**Estolones:** Conexiones esqueléticas con forma de lámina de algunos cnidarios. Son comunes en tabulados y octocorales ya que dan soporte a la estructura de la colonia y, posiblemente, facilitan el intercambio de nutrientes y otras sustancias biológicas entre los distintos pólipos que la forman.

**Estromatolito:** Estructura sedimentaria laminada con forma de domo que se forma por la actividad de microorganismos (principalmente cianobacterias) que atrapan y fijan el sedimento o producen la precipitación de minerales (principalmente de carbonato cálcico).

**Exfoliación:** Tendencia de ciertos materiales cristalinos, como los minerales, a romperse a lo largo de planos estructurales cristalográficos definidos, debido a que estos planos presentan enlaces estructurales débiles como resultado de su composición química y de su estructura cristalina.

**Fauna de Ediacara:** La asociación más antigua conocida (590-570 millones de años) de fósiles, que pertenecen a formas primitivas de metazoos de cuerpo blando. El hallazgo tuvo lugar en la formación Ediacara (Australia), que dio su nombre a este tipo de fauna pero, posteriormente, se han encontrado en otras partes del mundo, como Namibia, Terranova, Inglaterra y Rusia. Está compuesta por organismos simples con cuatro morfologías predominantes: acorazonados, en forma de hoja, discoidales y circulares. Aún no se sabe con certeza si estos organismos fueron precursores de los metazoos actuales o, por el contrario, formaban un grupo independiente.

**Filo (*phylum*):** Categoría taxonómica, fundamental en la clasificación biológica, situada entre el Reino y la Clase. El filo agrupa organismos con ascendencia común y que responden a un modelo de organización. Se conocen 39 filos en el Reino Animal pero la mayoría de los animales pertenece a alguno de los 9 filos más comunes: Arthropoda, Mollusca, Porifera, Cnidaria, Platyhelminthes, Nematoda, Annelida, Echinodermata y Chordata.

**Grizzly:** La variedad de mayor tamaño de oso pardo (*Ursus arctos horribilis*), que habita principalmente en el norte del territorio norteamericano.

**Intralaminación:** Laminación interna de un cristal, que en los biominerales tiene habitualmente una anchura submicrométrica (por debajo de una micra).

**Lagoon:** También conocido como laguna costera, es un cuerpo de agua somera con una comunicación restringida hacia el mar. Es común encontrar estas lagunas delimitadas por arrecifes o islas que hacen de barrera.

**Litosfera:** Geoesfera compuesta por la capa superior de la Tierra sólida que comprende la corteza terrestre y la parte frágil del manto superior.

**Metaestable:** Relativo al mineral que en apariencia es estable pero que es capaz de reaccionar si es perturbado por las condiciones que le rodean. Por ejemplo, los minerales formados a altas presiones y temperaturas son metaestables a presión y temperatura superficiales, como ocurre con el diamante. Sin embargo, éste tiende a convertirse con el paso del tiempo en una fase más estable (grafito).

**Nanoescala:** Referido a la escala de longitud basada en el nanómetro. Se emplea en aquellos objetos que tienen una longitud entre 1 y 100 nanómetros.

**Nanómetro:** Unidad de longitud que equivale a una milmillonésima parte de un metro.

**Octocoral:** Subclase de cnidarios que pertenece a la clase Anthozoa. Son principalmente coloniales y engloban a los corales denominados “blandos”, por carecer de esqueleto mineral o porque éste rara vez forma un esqueleto masivo, como ocurre en los alcionarios y pennatuláceos, con la excepción de los heliporáceos y *Tubipora* (Alcyonacea), que son los únicos corales “blandos” que forman esqueletos masivos.

**Polimorfos:** Minerales que presentan la misma composición química pero diferente estructura cristalina.

**Protistas:** Organismos unicelulares con núcleo (eucariotas). Algunos autores también incluyen en protistas a los organismos pluricelulares eucariotas que no pueden incluirse en hongos, plantas o animales.

**Quitina:** Carbohidrato polisacárido que forma parte del esqueleto de muchos animales, como artrópodos, anélidos y cnidarios, debido a su alta resistencia.

**Registro geológico:** Conjunto de evidencias existentes en las rocas de los procesos ocurridos a lo largo de la historia de la Tierra.

**Simbionte:** Organismo que vive en estrecha asociación con su huésped durante largos periodos de tiempo. En una relación simbiótica se beneficia al menos uno de los organismos, aunque es común que lo hagan ambos (mutualismo), como ocurre en el caso de las algas zooxantelas y los corales o en el de los tiburones y las rémoras.

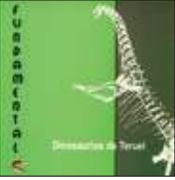
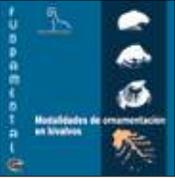
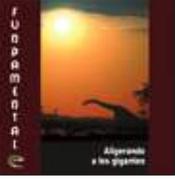
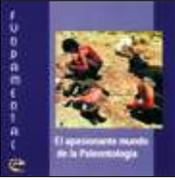
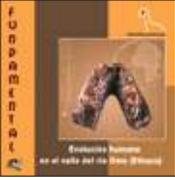
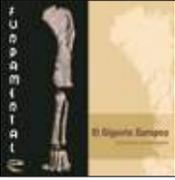
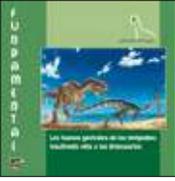
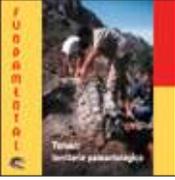
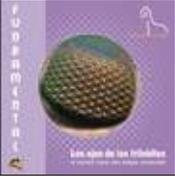
<a href="#">Introducción</a>	<a href="#">Página 11</a>
<a href="#">Principales tipos de corales. Los cnidarios y los cnidarios esqueléticos</a>	<a href="#">Página 15</a>
<a href="#">Los corales del Paleozoico</a>	<a href="#">Página 21</a>
<a href="#">Los corales y su esqueleto. Importancia en el registro fósil</a>	<a href="#">Página 22</a>
<a href="#">Creando un esqueleto</a>	<a href="#">Página 22</a>
<a href="#">La importancia de los corales como bioconstructores</a>	<a href="#">Página 28</a>
<a href="#">Importancia en estudios paleoclimáticos</a>	<a href="#">Página 30</a>
<a href="#">Los corales paleozoicos y la discusión sobre la mineralogía de su esqueleto</a>	<a href="#">Página 31</a>
<a href="#">Multithecopora hontoriense y las rocas donde se encuentra</a>	<a href="#">Página 32</a>
<a href="#">Observando más allá de lo que el ojo ve</a>	<a href="#">Página 34</a>
<a href="#">Microestructura de <i>Multithecopora</i></a>	<a href="#">Página 36</a>
<a href="#">Nanoestructura</a>	<a href="#">Página 36</a>
<a href="#">Preservación de los elementos micro- y nanoestructurales</a>	<a href="#">Página 38</a>
<a href="#">Implicaciones ambientales y evolutivas</a>	<a href="#">Página 40</a>

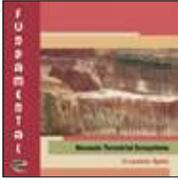




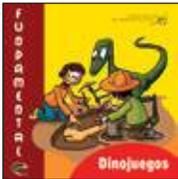
**iFundamental!** es una serie de publicaciones de difusión paleontológica de la Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis que consta de subseries temáticas para cuentos (*Fundacuentos paleontológicos*) o para versiones divulgativas de artículos científicos (*Paleonturología*).

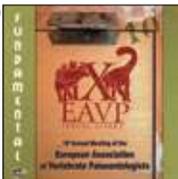
Dirección de la serie: Luis Alcalá.

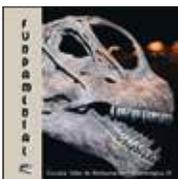
- 02**  El segundo número, *Dinosaurios de Teruel*, ha sido editado en el marco del III Seminario sobre Paleontología y Desarrollo de la Universidad de Verano de Teruel (Universidad de Zaragoza) y con la colaboración de ésta.
- 04**  *Teoría del Homosaurus (Paleontología imaginaria de Dino y Saura)* es un cuento del que es autor Elifio Feliz de Vargas (Teruel, 1964), veterinario. En 1990 obtuvo la "Ayuda a la Creación Literaria" concedida por el Instituto de Estudios Turoleses y en 1991 el Premio "Teruel" de relatos.
- 06**  *XVI Reunión Bial de la Real Sociedad Española de Historia Natural* contiene los trabajos de investigación presentados en dicha reunión, celebrada en Teruel (septiembre-octubre de 2005).
- 08**  El octavo número, *Modalidades de ornamentación en bivalvos*, se edita como consecuencia de la adjudicación del Segundo Premio Internacional de Investigación en Paleontología **Paleonturología 04**.
- 10**  *Laboratorios de Paleontología (IV Seminario sobre Paleontología y Desarrollo de la Universidad de Verano de Teruel)*, ha sido editado en el marco del Año de la Ciencia 2007 con una ayuda de la FECYT y del Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto *Paleontología en Teruel: dos libros mejor que uno* CCT005-07-00629).
- 12**  *Aligerando a los gigantes: los huesos neumáticos de los dinosaurios saurópodos y sus implicaciones para la estimación de la masa corporal* se edita durante el Año de la Ciencia 2007 como consecuencia de la adjudicación del Cuarto Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 06**.
- 01**  El primer número, *El apasionante mundo de la Paleontología*, se editó en el marco del proyecto *La paleontología al alcance de todos*, desarrollado por la Fundación y financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (DIF2003-I 0062-E).
- 2ª EDICIÓN**
- 03**  El tercer número, *Evolución humana en el valle del río Orma (Etiopía)*, se edita como consecuencia de la adjudicación del Primer Premio Internacional de Investigación en Paleontología **Paleonturología 03**.
- 05**  *El Gigante Europeo: excavando un dinosaurio*. Documental y juego interactivo de la excavación del gran dinosaurio de Riodeva (Teruel), *Turiasaurus riodevensis*. Programa Nacional de Fomento de la Cultura Científica y Tecnológica del Ministerio de Educación y Ciencia (492839C1).
- 07**  -3.200.000 + 2005 *Tejidos (óseos, arquitectónicos, pictóricos)* es el catálogo de la exposición artística presentada en el Museo de Teruel desde el 4 de noviembre al 11 de diciembre de 2005.
- 09**  El noveno número, *Los huesos gastrales de los terópodos: insuflando vida a los dinosaurios*, se edita como consecuencia de la adjudicación del Tercer Premio Internacional de Investigación en Paleontología **Paleonturología 05**.
- AGOTADO**
- 11**  *Teruel: territorio paleontológico* (Seminario sobre Paleontología y Desarrollo de la Universidad de Verano de Teruel), ha sido editado en el marco del Año de la Ciencia 2007 con ayuda de la FECYT y del Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto *Paleontología en Teruel: dos libros mejor que uno* CCT005-07-00629).
- 13**  *Los ojos de los trilobites: el sistema visual más antiguo conservado* se edita como consecuencia de la adjudicación del Quinto Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 07**.

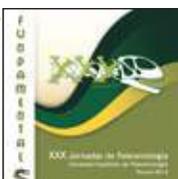
**14**  *Mesozoic Terrestrial Ecosystems in Eastern Spain* es una síntesis en inglés de ecosistemas mesozoicos continentales –Pirineos orientales y centrales, Teruel y Cuenca– preparada con motivo de su visita durante el 10<sup>th</sup> MTE Symposium, celebrado en Teruel (septiembre de 2009).

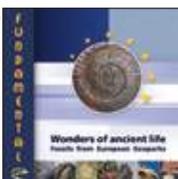
**16**  *XVI Simposio sobre Enseñanza de la Geología* incluye las 34 comunicaciones presentadas en la reunión conmemorativa del vigésimo aniversario de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (Teruel, julio de 2010).

**18**  *Dinojuegos* (serie *Fundajuegos paleontológicos*, de nivel infantil) se ha realizado en colaboración con el Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC) y en el marco del proyecto **e-dino 10**, financiado por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología – Ministerio de Ciencia e Innovación (FCT-10-980). Incluye un DVD.

**20**  *10<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Association of Vertebrate Palaeontologists* incluye las comunicaciones presentadas en la reunión anual de la EAVP celebrada en Teruel (junio de 2012).

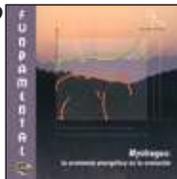
**22**  *Escuela Taller de Restauración Paleontológica IV* describe trabajos de laboratorio y de campo promovidos para la recuperación de patrimonio y para la formación profesional.

**24**  *XXX Jornadas de Paleontología* incluye las ponencias y comunicaciones presentadas en la reunión anual de la Sociedad Española de Paleontología celebrada en Teruel (octubre de 2014).

**26**  *Wonders of ancient life. Fossils from European Geoparks* es el resultado de un proyecto del Grupo de Trabajo Temático sobre Fósiles de la *European Geoparks Network*.

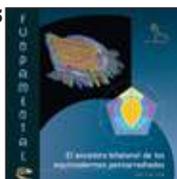
**15**  *El dinosaurio que excavó su madriguera* se edita como consecuencia de la adjudicación del Sexto Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 08**.

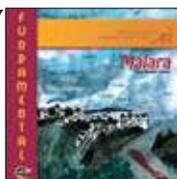
**17**  *En la Tierra como en el Cielo. Río Tinto como análogo terrestre de Marte* se edita como consecuencia de la adjudicación del Séptimo Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 09**.

**19**  *Myotragus: la economía energética en la evolución* se edita como consecuencia de la adjudicación del Octavo Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 10**.

**21**  *El Plateosaurus virtual* se edita como consecuencia de la adjudicación del Noveno Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 11**.

**23**  *Opiliones fósiles. Los arácnidos actuales de origen más remoto* se edita como consecuencia de la adjudicación del Décimo Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 12**.

**25**  *El ancestro bilateral de los equinodermos pentarradiados* se edita como consecuencia de la adjudicación del Undécimo Premio de Investigación en Paleontología **Paleonturología 13**.

**27**  *Malara* es un relato de ficción, ambientado en geoparques y escrito por José Manuel Quero, que fue galardonado con el premio de novela científica de la Comisión de Jóvenes Geólogos del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (2014).



FUNDACIÓN TERUEL SIGLO 



INFANTIL

GENERAL

AVANZADO